

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ АВИАЦИОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

СТАХОВА АНЖЕЛИКА ПЕТРОВНА

УДК 681.2:531.781:53.082.4(043.5)

**ПРИБОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность 05.11.01 – “приборы и методы измерения механических величин”

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
ФИЛОНЕНКО С.Ф.

Киев -2017

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	12
1.1. Анализ литературных источников в области измерения механических величин.....	12
1.2. Метод акустической эмиссии, как один из методов исследования и прогнозирования состояния твердых тел	18
1.3. Основные термины и определения относительно метода акустической эмиссии.....	20
1.4. Модели сигналов акустической эмиссии при трении и износе поверхностей фрикционного контакта	22
1.5. Системы для регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии при механических нагружениях.....	26
1.6. Постановка научной задачи	32
Выводы по первой главе	34
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ ОБЪЕКТА	36
2.1. Модель результирующего сигнала акустической эмиссии при механических нагружениях поверхностных слоев материалов.....	36
2.2. Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при преобладающем механизме разрушения поверхностных слоев материалов при механических нагружениях.....	46
2.3. Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменениях объема материала, вступившего в пластическую деформацию и площади локальных разрушений.....	58
2.4. Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при	

	3
переходе к стадии катастрофического разрушения	65
2.5. Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменениях объема материала, вступившего в пластическую деформацию при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания	71
Выводы по второй главе	78
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	80
3.1. Экспериментальный стенд при механических нагрузениях	80
3.2. Влияние условий нагружения на параметры акустического излучения.....	90
3.3. Взаимосвязь параметров акустической эмиссии с напряженно-деформированным состоянием изделия	96
Выводы по третьей главе	105
ГЛАВА 4. АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПРИБОРНОЙ АКУСТО-ЭМИССИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	107
4.1. Структура построения приборной акусто-эмиссионной системы диагностики состояния объекта.....	107
4.2. Структуры записи информации и обработка сигналов акустической эмиссии.....	113
4.3. Структура параметров контроля состояния и управления приборной системой	121
4.4. Структура логики управления приборной системой	129
4.5. Программное обеспечение акусто-эмиссионной системы диагностики состояния объектов.....	136
4.5.1. Внутренние операции общего интерфейса управления системой.....	142
4.5.2. Внешние операции общего интерфейса управления системы	147
4.6. Метрологическое обеспечение средств акусто-эмиссионной системы	155
Выводы по четвертой главе	163
ВЫВОДЫ.....	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	167

	4
ПРИЛОЖЕНИЯ	184
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	188

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АЭ – акустическая эмиссия

ПК - персональный компьютер

ПО - программное обеспечение

ПМО – программное математическое обеспечение

ПВВ - порт ввода-вывода

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь

АЭДК – акусто-эмиссионный диагностический комплекс

МК - мобильный компьютер

ПИУ - программный интерфейс управления

ИП - информационные потоки

НМД – накопитель на диске

ОЗУ - оперативное запоминающее устройство

ПУ - параметры управления

ПС - параметры состояния

ЛМД – логический массив данных

Origin - пакет прикладных программ

FRIC - программный пакет

СМТ-1 - универсальная машина трения

ГТД - газотурбинный двигатель

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современных условиях развития народного хозяйства актуальными являются измерения механических величин узлов машин и механизмов для обеспечения качества и конкурентоспособности продукции. Без внедрения быстродействующих и высокоточных приборных систем измерения механических величин, невозможно повышение качества промышленной продукции. Однако, несмотря на широкий спектр существующих методов и средств возрастает потребность в разработке новых высокоточных средств измерений, методов и методик с использованием новых информативных параметров. Поэтому получение достоверной информации о параметрах объекта по измерению механических величин является важной задачей, которая требует не только совершенствования существующих, но и разработки новых методов и средств в области измерения механических величин.

При исследованиях для контроля твердых тел используется широкий спектр методов измерения механических величин, позволяющих измерять основные характеристики, как поверхностей, находящихся в контакте, так и самого динамического процесса. Применяемые методы измерения механических величин позволяют проводить оптимизацию режимов работы фрикционных узлов, контролировать изменение условий механического нагружения и определять общие закономерности их изменения. Однако их инерционность к процессам протекающим на субмикро- и микро- уровнях приводит к значительным временным ошибкам в определении момента возникновения и развития процессов, ведущих к катастрофическому разрушению твердых тел в объекте.

С точки зрения исследования состояния объектов при механическом нагружении, особенно в производственных условиях, необходимо развитие методов измерения механических величин, несущих информацию о физических процессах, протекающих на субмикро- и микро- уровнях. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ).

Работы по исследованию динамических процессов при механических нагрузениях, а также изучения разрушения твердых тел с использованием метода АЭ проводятся во многих странах мира. Результаты исследований с использованием АЭ, опубликованные за последние десятилетия касаются, как теоретических разработок, так и прикладных исследований процессов, при контактном взаимодействии твердых тел. Результаты исследований показали высокую чувствительность метода и позволили определить общее влияние физико-механических характеристик материалов объекта и режимов работы фрикционных узлов, с использованием методов измерения механических величин на основе изменения параметров регистрируемых сигналов АЭ. Вместе с тем, сложность процессов, протекающих в поверхностных слоях материалов, отсутствие адекватных математических моделей формирования акустического излучения (сигналов акустической эмиссии), отсутствие обоснованных информативных параметров, закономерностей их изменения, методик измерения механических напряжений, а также обработки информации ограничивает практическое использование метода акустической эмиссии в исследовании и диагностировании напряженно-деформируемого состояния объекта. В первую очередь, это касается промышленных условий их эксплуатации.

Это требует развития метода измерения механических величин на базе параметров сигналов АЭ с разработкой теоретических подходов к интерпретации регистрируемой информации, методов её обработки, методов и систем диагностики состояний твердых тел и конструкций.

Цель работы: разработка метода измерения параметров механических напряжений, аппаратных и программных средств приборной акусто-эмиссионной системы.

Для достижения указанной цели в работе **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Разработать модель результирующего сигнала АЭ, формируемого при механических нагрузениях поверхностных слоев твердых тел.
2. Провести моделирование результирующего сигнала АЭ на стадии

нормального изнашивания с учётом изменения влияющих факторов (нагрузки, скорость вращения фрикционного узла и других) и преобладающих механизмов.

3. Провести моделирование результирующего сигнала АЭ при переходе со стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания с учетом изменения влияющих факторов и механизмов изнашивания. Определить основные закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ.

4. Установить экспериментальные закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ при механических нагружениях поверхностных слоёв материалов и изменении условий взаимодействия поверхностей контакта.

5. Разработать концепцию построения, технические и программные средства приборной системы сбора, обработки, анализа АЭ информации и вывода его результатов, а также метод диагностики объекта в лабораторных и производственных условиях.

Объект исследования – процесс измерения механических величин на базе явления акустической эмиссии при механических нагружениях поверхностных слоёв материалов.

Предмет исследования - приборная система измерения механических напряжений с повышением точности на базе акусто-эмиссионного метода.

Методы исследования. Проведенные исследования базируются на современных методах цифровой обработки сигналов, методах математического анализа информации с использованием компьютерной техники, современных компьютерных технологиях, материаловедения и натурных испытаниях.

Научная новизна работы. В работе получены следующие научные результаты:

1. Впервые разработана модель результирующего сигнала АЭ, формируемого при механических нагружениях поверхностных слоёв материалов, в основе которой лежат современные представления о разрушении вторичных структур I и II типов.

2. Впервые установлено, что на стадии нормального изнашивания форма и параметры результирующего сигнала АЭ зависят от времени начала разрушения

вторичных структур I и II типа и напряженно-деформированного состояния контактируемых поверхностей. При этом, с уменьшением времени начала разрушения вторичных структур происходит сжатие результирующего сигнала АЭ во времени, а возрастание напряженно-деформированного состояния приводит к увеличению разброса его амплитуды.

3. Установлено, что на стадии нормального изнашивания зависимость изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени при заданном напряженно-деформированном состоянии описывается линейной функцией. При переходе к стадии катастрофического изнашивания, сопровождаемой возрастанием напряжений и деформаций, зависимость изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени описывается степенной функцией, значение показателя степени которой зависит от скорости возрастания износа.

4. Теоретически обосновано, что при возрастании объема материала вступившего в пластическую деформацию и площади локальных разрушений, происходит возрастание амплитуды результирующего сигнала АЭ и уменьшение величины её разброса и, как следствие, возрастание показателя степени аппроксимирующего выражения.

5. Впервые разработан метод измерения контактных напряжений, в основе которого лежит установленная взаимосвязь контактных напряжений со средним уровнем амплитуды результирующего сигнала АЭ, что позволяет проводить мониторинг контактных напряжений.

Практическая ценность работы:

1. Разработана методика, обеспечивающая возможность проведения кратковременных и длительных испытаний деталей с измерением контактных напряжений.

2. Создана приборная система и программный математический комплекс для сбора, хранения, оперативной обработки и вывода результатов анализа сигналов АЭ при механических нагружениях поверхностных слоёв материалов.

3. Разработана методика и программное обеспечение, позволяющие проводить автоматическую калибровку мобильной АЭ системы.

4. Разработан способ определения контактных напряжений в фрикционных узлах в момент возникновения заедания.

Результаты проведенных исследований, методика, мобильная система, программный математический комплекс используются на ООО «Український кардан», при проведении научных исследований в Национальном авиационном университете, подготовке специалистов в области информационно-измерительных и диагностических систем.

Личный вклад автора. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в работах [7, 93, 94, 95, 117, 118]. В работах в соавторстве диссертантом получены следующие результаты: [7, 118] – проведено математическое описание сигналов АЭ, которые формируются при разрушении вторичных структур I и II типа, а также закономерности изменения их параметров; [94, 95, 117] – результаты моделирования сигналов АЭ при нормальном изнашивании поверхностных слоев материалов с учетом влияющих факторов, а также при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания и при изменении объема материала, вступившего в пластическую деформацию; [93] – разработана концепция построения акусто-эмиссионной системы с распределенной наращиваемой структурой, а также алгоритмы её работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и республиканских симпозиумах, конференциях и семинарах, в том числе: VII – X Міжнародна наукова конференція студентів та молодих учених “Політ-2007, 2008, 2009, 2010” (м. Київ, 2007 – 2010 рр.), VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Автоматизация, технология и качество в машиностроении” (м. Донецьк, 2007 р.), II Міжнародна науково-технічна конференція “Моделирование в электротехнике, электронике и светотехнике” (м. Київ, 2007 р.), I Науково-практична конференція молодих учених та аспірантів “Інтегровані інформаційні

технології та системи ” (м. Київ, 2007 р.), I-IV Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2008, 2009, 2010, 2011)” (м. Київ, 2008-2011 рр.), Міжнародний конгрес “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” (м. Київ, 2008, 2010 р.), Міжвідомча науково-практична конференція “Сучасні проблеми захисту інформації з проблемним доступом” (м. Київ, 2008 р.), науково-практична конференція “ Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки” (м. Київ, 2009 р.), Міжнародна науково-технічна конференція “AVIA-2009, 2011” (м. Київ, 2009, 2011), Науково-технічна конференція студентів і молодих учених “Наукоємні технології” (м. Київ, 2011 р.), Міжнародна науково-практична конференція “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” (м. Чернігів, 2011, 2016 р.), 5-та науково-практична конференція студентів і молодих учених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2015 р.), а також научних семінарах учебно-научного інститута информационно-диагностических систем НАУ в 2006-2017 годах.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе: 12 в ведущих профессиональных научно-технических изданиях, из которых 2 в иностранных изданиях, 1 в отечественном издании, которое входит в международные научно метрические базы, 7 в материалах конференций, 1 патент на полезную модель..

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из вступления, четырех разделов, основных выводов по работе, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 166 страниц машинописного текста, в том числе 62 рисунка, 3 таблицы и 2 приложения. Список использованных источников содержит 160 наименований на 17 страницах.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

1.1 Анализ литературных источников в области измерения механических величин

Наиболее эффективный подход к решению проблемы предупреждения, локации и быстрого вывода из эксплуатации для предупреждения чрезвычайных ситуаций заключается в создании актуальных технических средств, обеспечивающих быстрое и максимально точное измерение механических параметров объектов. Методы диагностики таких технических средств должны быть чувствительными к процессам, протекающим в структуре материалов при воздействии различных факторов, таких как механическая нагрузка, температура, скорость вращения и другие.

В нынешних условиях с интенсивным развитием приборостроения, все большее применение находят информационно-измерительные комплексы для измерения механических величин, деталей, узлов трения, пространственных поверхностей разной конфигурации. Вопросами измерения механических величин посвящены работы ведущих ученых, таких как Орнатский П.П., Новиков А.Н., Козырев Ю.Г., Кондрашов С.И. и других. Измерение механических величин одно из самых распространенных видов измерений. Измерения массы, силы, твердости, основные механические свойства используемого материала, такие как модуль Юнга, в большой степени используются в науке и технике.

Задачи, которые можно решить с помощью измерений механических величин, разделяют на группы: измерение количества веществ и материалов, а так же определение их механических свойств, определения параметров движения твердых, жидких и газообразных веществ и материалов, определение геофизических и геодинамических параметров. Однако измерение таких механических величин обычно проводится как часть разработки конкретного устройства и его характеристик. В результате для оценки свойств используются

простые структуры и простой анализ.

Авторами [123] рассматривается нынешнее состояние и перспективы использования метода точного измерения силы. Автор предложил метод массы левитации (LMM), который позволяет измерять силу с высокой точностью без использования датчика силы. В этом методе жесткая масса левитируется пневматическим линейным подшипником, а сила инерции левитированной массы используется в качестве эталонной силы, прилагаемой к проверяемому объекту, например материалам, конструкциям или силовым преобразователям.

В работе [132] предложен метод определения механических величин, который основан на использовании одного или более интегрированных вычислительных элементов для определения одной или более механических величин, связанных с силой деформации, воздействующей на конструкцию. Предлагаются способы определения любой механической величины, при условии создания смещения в структуре, под действием нагрузок. Предложено измерение механических величин в исполнении датчика деформации, датчика напряжения, датчика давления, температурного датчика или любой их комбинации.

При представлении механических величин в удобную форму для дальнейшей передачи и восприятия используют разнообразные физические явления, которые обладают достаточно строгими закономерностями. При использовании одного и того же физического эффекта, становится возможным преобразовывать различные механические величины, однако для преобразования одной механической величины можно использовать различные физические эффекты.

В работе [78] предложено применять пьезооптический эффект поглощающей среды для определения величин коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), а так же разработан метод определения КИН по данным измерения поглощения интенсивности света. Определение КИН возникло при определении напряжений в теле с трещиной и успешно используется в линейной механике разрушения для определения вершины трещины с помощью полей напряжений. В работе [47] приведены данные по которым предложено

определять напряженно-деформированного состояния (НДС) используя данные измерения поглощения света. Применяя эти подходы к механике разрушения, получены формулы, позволяющие определить величины КИН, используя пьезооптический эффект поглощающей среды. Величины КИН определяют напряженное состояние вблизи вершины трещины. Много численных и экспериментальных методов решают эту проблему [43, 46, 97]. Среди экспериментальных - поляризационно-оптический наиболее применяемым для решения задач механики разрушения. При этом величины КИН определяют по данным фотоупругих измерений [46, 47].

Волны напряжения возникают в материале вследствие пластической деформации, вызванной внешними, термическими остаточными или другими напряжениями, обуславливающих накопление упругой энергии в потенциальных дефектах. Вокруг дефектов повышается интенсивность напряжений. При превышении этих напряжений конкретного значения происходит разрыв связей и рост трещин. При росте трещины выделяется энергия в виде волн напряжения, или АЭ [39, 48, 76].

Количество энергии, трансформируется в волну напряженности, зависит от характера распределения энергии в процессе роста трещины а также [67]:

- природы релаксационного процесса роста трещины;
- скорости релаксации и частоты повторения процессов;
- микроструктуры материала.

В процессе роста трещины наибольшую роль играют: развитие локальной зоны пластических деформаций вблизи вершины трещины и скачок фронта трещины. В металлических конструкциях АЭ происходит при возникновении и росте трещины или развития пластической зоны в ее вершины. В конструкциях из композиционных материалов источником акустической эмиссии разрыв волокон, расслоение и превращения в матрице.

Даже микроскопический дефект, под действием локальных напряжений или деформации, генерирует волны напряжения, можно зафиксировать с помощью пьезо- преобразователей, устанавливаемых на конструкцию

определенным образом.

Одним из основных положений современной теории измерительных устройств является положение об измерительном преобразовании [26, 71]. В соответствии с ним измерение рассматривается как процесс приема и преобразования информации об измеряемой величине, происходящий в измерительных устройствах.

Так в настоящее время разрабатывается много различных способов [72] и методов [45, 67], а также систем для измерения механических напряжений [34, 70, 87, 88, 89].

Одним из методов который чувствителен к процессам, протекающим в структуре материалов при воздействии различных факторов таких как механическая нагрузка, температура, скорость вращения, является метод АЭ [48, 79]. Измерение, обработка и анализ АЭ при контактном взаимодействии поверхностей твердых тел направлены на получение взаимосвязи параметров регистрируемого акустического излучения [61] с физико-химическими процессами [24, 38, 42], которые развиваются в поверхностных слоях материалов при их контактном взаимодействии.

Модельный подход к разработке методики приближенного определения величины докритического роста сквозной микротрещины на этапе начала ее субкритического развития разработан в работе [81] и базируется на следующих положениях. Учитывая характер распределения напряжений и деформаций перед ее вершиной [59, 138], предполагается, что локальное разрушение начинается в некотором микрообъемах тела у вершины трещины там, где достигают максимума напряжения или деформации. По результатам численных расчетов, проведенных в работе [138] методом конечных элементов показано, что эта расстояние сопоставима с 2δ , где δ - раскрытие трещины в ее вершине. Тем самым принимается, что сначала вблизи фронта микротрещины, в микрообъемах, где началось локальное разрушение, образуются микротрещины, которые подрастая, сливаются с микротрещиной. Таким образом, продвижение последней проходит путем такого последовательного слияния микротрещин в материале и

на начальных этапах может не выходить на внешнюю поверхность (туннелирования микротрещин). Поэтому единичный скачок микротрещины, который сопровождается излучением упругих волн - акустической эмиссии, можно рассматривать примерно как образование изолированной микротрещины, поскольку ее размеры гораздо меньше, например, от линейных размеров образца для испытаний. В работах [59, 81] с учетом положений [138] показано, что в окрестности вершины микротрещины за состояния плоской деформации расстояние от точек действия максимальных деформаций и напряжений до кончика трещины зависит от величины δ . На основе этого обнаружено, что величина скачка сквозной микротрещины Δl лежит в пределах $\delta < \Delta l < 2\delta$ и может определяться экспериментальным путем в условиях действия смешанных механизмов разрушения реального материала.

Для сквозных микротрещин нормального отрыва или аналогичных дискообразных, образующихся по их фронту, в модели установлена следующая связь между величиной скачка или образованием сквозной трещины и амплитудами сигналов АЭ, генерируемые такими процессами [59, 81]:

$$\Delta l = \beta \sum_{k=1}^K A_k^{2/3} \quad (1.1)$$

где β - множитель пропорциональности, является функцией параметров АЭ-тракта отбора, обработки и регистрации сигналов АЭ и механических характеристик материала и находится экспериментально, A_k - амплитуда k -го сигнала АЭ, который сопровождает k -й прыжок трещины. Аналитическое выражение для нахождения площади единичного скачка сквозной трещины нормального отрыва в модели представлено в виде

$$\Delta S_{cp} = 0,25\pi\beta^2 \left(K_{l_0}^4 + K_{l_1}^4 \right) / \sum_{k=1}^K A_k^{2/3}, \quad (1.2)$$

где K_{l_0} - КИН момента старта, а K_{l_1} - КИН её остановки.

Мощное использования метода АЭ для диагностики развития трещинообразования началось после того, как Котрелл модернизировал формулу Гриффитса, исходя из условия, что для образования зародждения трещины

необходимо n дислокаций, а произведение na (где a - межатомное расстояние в плоскости трещины) определяет относительное смещение поверхностей дислокационной трещины :

$$2\gamma/\sigma_F = na \quad (1.3)$$

Тут γ - поверхностная энергия разрушения, σ_F - критическое напряжение разрушения.

Уже в первых работах, где изучались дислокационные механизмы пластической деформации [21, 62, 109, 110, 113, 115, 121, 122, 131, 141, 146], было показано высокую чувствительность метода АЭ, что стало основанием для его дальнейшего интенсивного внедрения и создания на этой основе эффективных методик неразрушающего контроля и технической диагностики. Так, например, где изучали взаимосвязь АЭ, радиуса зоны деформации и диаграмм разрушения, было установлено, что между ними существует корреляция [101]. В работах сигналы АЭ почти во всех материалах (как низко- так и высокопрочных) начинают генерироваться при достаточно низких значений нагрузки [63]. Эти результаты хорошо коррелируют с данными труда [157]. Кроме того, авторы [41] показали, что когда условия нагрузки в вершине трещины соответствуют состоянию плоской деформации, то активность АЭ высокая, а при плоско- напряженном состоянии – низкая.

Авторы [41] утверждают, что излучение АЭ происходит раньше макроскопического распространения микротрещины и непосредственной связи с этим процессом не имеет. То есть возникновение АЭ зависит от пластической деформации в вершине микротрещины и пропорционально объему пластической зоны при состоянии плоской деформации, где возникает трехосное напряженное состояние и генерируется АЭ именно в момент формирования там микротрещин, когда в этой пластической зоне возникает растрескивание частиц второй фазы или их отслоение от матрицы.

1.2 Метод акустической эмисии, как один из методов исследования и прогнозирования состояния твердых тел

Возможность получения достоверной информации о процессах упруго-пластической деформации [12, 35] и разрушения поверхностей материалов [3, 27, 33] обусловило к распространению использования метода АЭ в исследовании, контроле и диагностике состояния узлов трения [28, 44, 53].

Метод АЭ - это один из пассивных акустических методов для неразрушающего контроля и диагностики, основанный на распространении упругих смещений в твердых телах [36, 44, 56]. К главным источникам акустического излучения [32] относят процессы пластической деформации, которые связанные с появлением движений и исчезновением дефектов кристаллической решетки, возникновением и развитием микро- и макротрещин, а так же фазовые превращения в твердых телах. При этом акустическое излучение регистрируется в диапазоне частот от 100 кГц до 2500 кГц.

Регистрация упругих смещений осуществляется с помощью датчика, который нужно установить на поверхность исследуемого материала или на волноводе, который имеет стабильный акустический контакт с поверхностью исследуемого образца материала [100]. Датчик АЭ превращает упругие смещения частиц материала в электрический сигнал, который усиливается и обрабатывается электронной аппаратурой на основе разработанных концепций.

Общие подходы обработки, а также параметры регистрируемых сигналов АЭ показаны на рис.1.1. Согласно существующих методологий обработки и анализа сигналов АЭ приняты два основных подхода, которые основываются на высокочастотной и низкочастотной составляющих электрического сигнала, регистрируются на выходе датчика АЭ.

Следует отметить, при исследовании процессов, происходящих в материалах, а также решения прикладных задач, связанных с проведением контроля и диагностики состояния изделий [56] способствуют разработке новых параметров формируемых сигналов АЭ.

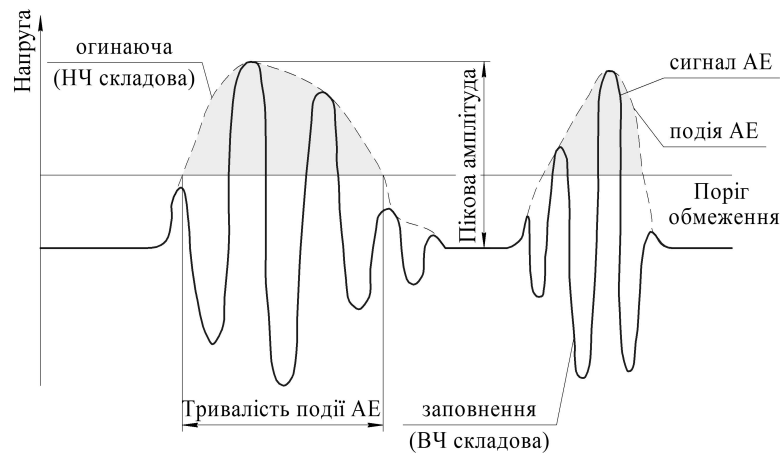


Рис.1.1 Обработка регистрируемого сигнала акустической эмиссии

Основными преимуществами метода АЭ является высокая чувствительность к процессам деформирования и разрушения материалов, которые происходят на микро- уровне, интегральность, а также возможность автоматизации контроля и диагностики узлов трения [107, 112, 140].

Проведенные исследования [111, 154, 156] показывают высокую чувствительность метода АЭ к образованию малых дефектов по сравнению с вибрационным методом. Как отмечают исследователи, основная особенность в использовании АЭ метода заключается в гораздо более высокой частоте сигналов АЭ по сравнению с собственными вибрациями узлов трения и окружающих шумов. При этом чувствительность метода АЭ к деформациям в различных областях контакта делает метод АЭ одним из основных методов при контроле и диагностике узлов трения.

Метод АЭ широко используется в сфере контроля и диагностики состояния таких трибосистем, как: турбины генераторов [102, 136, 144], подшипниковые узлы скольжения и качения [120, 133, 152, 153]; подвижные узлы авиационной техники [53, 73, 80, 124]; дизельные двигатели и двигатели внутреннего сгорания [34, 126, 127]; основные подвижные узлы режущих станков [143, 158]; редукторы и зубчатые передачи [149, 151], компрессорные установки [111, 145], низкоскоростные агрегатные установки [130, 137].

Источники акустического излучения, возникающие при фрикционной взаимодействия поверхностей, делятся на макроскопические и

микроскопические. В первом случае, сигнал АЭ обусловлен дислокационными явлениями и локальной перестройкой дефектов в поверхностных слоях материалов [18]. Во втором случае источниками сигналов АЭ являются процессы разрушения поверхностей фрикционного контакта [11, 52, 82].

Систематизировав основные явления, которые возникают в условиях трения поверхностей [27], все источники АЭ излучения можно разделить на следующие основные группы:

процессы столкновения микрорельефной элементов поверхностей трения [49];

процессы повреждения поверхностей, включая коррозионное повреждение [11, 52];

процессы формирования и разрыва фрикционных связей [142].

При этом вклад названных источников в общий уровень сигналов АЭ не определен.

К основным факторам, которые вносят влияние на характер изменения параметров сигналов АЭ при поверхностном разрушении материалов, относят геометрические [16, 142], физико-механические [24, 38, 42], механические и химические [39, 40, 50].

1.3 Основные термины и определения относительно метода акустической эмиссии

В соответствии с опубликованными и действующими стандартами [29, 103], можно сказать, что акустическая эмиссия (АЭ) - это процесс испускания объектом испытаний акустических волн, а переменная стохастическая физическая величина, несущая информацию об акустической эмиссии, - сигналом АЭ.

В принятых стандартах [29, 103] для явления АЭ приведены основные определения параметров и терминов АЭ, которыми принято пользоваться при проведении испытаний с использованием метода АЭ. Приведем определения некоторых параметров АЭ, согласно действующим стандартам.

Порог ограничения (уровень дискриминации) – уровень электрического напряжения относительно, которого осуществляется выявление (регистрация) сигналов (импульсов) АЭ.

Сигнал акустической эмиссии - постоянно переменная стохастическая физическая величина, которая отображает сообщение об акустической эмиссии.

Импульс акустической эмиссии - сигнал акустической эмиссии, значение которого не ноль в интервале времени, в течение которого его значение превышает поставленный относительный уровень от максимального.

Счет АЭ – число превышения сигналом порога ограничения (счет по ВЧ составляющей регистрируемых сигналов АЭ).

Событие АЭ – любые изменения в материале, вызывающие АЭ (события АЭ связывают с огибающей зарегистрированных сигналов АЭ).

Огибающая АЭ – протектированный электрический сигнал АЭ, зарегистрированный на выходе пьезокерамического датчика.

Длительность события АЭ – время нахождения события над порогом ограничения.

Пиковая амплитуда (амплитуда) АЭ – максимальная амплитуда уровня зарегистрированного аналогового сигнала (события) АЭ.

Время нарастания – определяется как время между появлением события АЭ над порогом ограничения и максимальной амплитудой события.

Энергия АЭ – средняя измеренная общая энергия, зарегистрированная на выбранном интервале испытаний (наблюдений), или энергия события АЭ, или “MARSE” (Measured area of the rectified signal envelope – измеренная площадь под огибающей события АЭ).

Амплитудное распределение – распределение количества сигналов АЭ по их амплитудам.

Скорость счета – скорость изменения счета АЭ (активность), событий АЭ (интенсивность), энергии в единицу времени.

Суммарный счет – общее количество события, счета АЭ, энергии во времени или от какого-либо параметра.

1.4 Модели сигналов акустической эмиссии при трении и износе поверхностей фрикционного контакта

Теоретические исследования процессов акустического излучения (формирование сигналов АЭ) при износе и разрушении поверхностей фрикционного контакта имеют важное значение. Такие исследования [74, 85, 86, 90] позволят проводить моделирование сигналов АЭ в зависимости от влияющих факторов, анализировать информативность параметров сигналов АЭ [14, 22, 61, 150] и, в конечном счете, определять закономерности их изменения [54, 55], а также позволяют разрабатывать критерии оценки опасных процессов, развивающихся в структуре материалов при их деформации и разрушении.

В общем случае, в условиях статических и динамических видов нагрузки, при разработке моделей сигналов АЭ, которые формируются при деформации и разрушении материалов, используется три основных подхода [1, 84, 106]. Во-первых, модели, основанные на определении изменения полей напряжений при росте (подростании) трещин в материале с использованием расчетно-аналитических методов. Во-вторых, модели, основанные на рассмотрении случайности процессов, приводящих к формированию акустического излучения, когда сигнал АЭ, рассматривается как стохастический сигнал на выходе приемного преобразователя. В данном случае, задача сводится к определению параметров, характеризующих случайный процесс, развивающийся в структуре материала. В-третьих, модели, основанные на физических представлениях о процессах протекания пластической деформации и роста трещин. Безусловно, что физические модели представляют наибольший интерес, так как они позволяют определять взаимосвязи параметров сигналов АЭ с параметрами процессов, развивающихся, а также учитывать различные факторы, которые влияют на протекание этих процессов [6, 118].

Стохастические модели сигнала АЭ, описывающие случайный процесс, который протекает в структуре материала [51, 125, 139, 160], без учета природы его возникновения. При построении стохастических моделей предполагают, что сигнал АЭ формируется за счет протекания значительного количества

элементарных событий в объеме материала в течение малого промежутка времени. В общем случае результирующий сигнал АЭ $z(t)$ может быть представлен в виде выражения вида [51, 139]

$$z(t) = \sum_{i=1}^n A_i F_i(t - t_i) \quad (1.4)$$

где A_i - амплитуда одиночного i -го импульса, который возникает в момент времени; F_i - характеристика формы одиночного импульса; n - число зарегистрированных импульсов.

Выражение (1.4) описывает формируемый сигнал АЭ как совокупность случайной последовательности импульсов, которые имеют случайную амплитуду и время появления. При этом считается, что характеристика формы импульсов $F_i(t)$ известна. Существует большое количество интерпретаций различных форм импульсов АЭ. Однако все они сводятся практически к импульсам, которые описываются экспоненциальными функциями.

В работе [125] функцию $F_i(t)$ представлено в виде

$$F(t) = \alpha_0 e^{-\beta t} \quad (1.5)$$

где α_0 - начальная постоянная амплитуда; β - коэффициент затухания.

В работе [160] форма импульса АЭ принимается, согласно (1.5), или имеет следующий вид

$$F(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m t^m e^{-\beta t} \quad (1.6)$$

где α_m - амплитуда m -го импульса АЭ.

С учетом реальных регистрируемых сигналов [108, 128, 147] в работе [135] сигнал АЭ представлен в виде

$$U(t) = U_0 [e^{-\lambda t} - e^{-\nu t}], \quad 0 < \lambda < \nu \quad (1.7)$$

где U_0 - начальная амплитуда; λ и ν - параметры затухания, которые влияют на форму сигналов АЭ.

В работе [25] сигнал АЭ представлены в виде

$$U(t) = \sum_i A_i F_i(t - t_i) + \sum_j B_j f_j(t - t_j^*) + S(t) + \lambda(t) \quad (1.8)$$

где A_i - амплитуда импульса АЭ, который появляется в момент времени t_i ; F_i -

характеристика его формы; B_j - амплитуда импульсной компоненты помехи, которая появляется в момент времени t_j^* ; f_j - характеристика формы импульсной компоненты помехи; $S(t)$ - синусоидальная составляющая непрерывной помехи, $S(t) = S_0 \sin(\omega t)$, S_0 - её амплитуда; ω - частота; $\lambda(t)$ - случайная составляющая непрерывного помехи.

Как отмечают авторы работ [25, 105], первая составляющая в (1.8) является информационной компонентой, а от других можно избавиться с помощью фильтрации, введением порога ограничения и так далее.

Существуют и другие модели, которые не учитывают физические процессы, протекающие в структуре материала при его деформации и разрушении [2, 68, 148, 159]. Поэтому их практическое использование ограничено.

При разработке моделей АЭ с использованием расчетно-аналитических методов считают, что источниками АЭ является распределение полей перемещений или напряжений. При этом предполагается, что возникновение и развитие трещин сопровождается падением напряжения в пределах от предела прочности к нулю. Такие исследования позволяют оценить форму сигналов АЭ и ее трансформацию, а также параметры сигналов АЭ и их информативность. Другой подход при разработке расчетно-аналитических моделей сигналов АЭ основан на расчетах полей напряжений или деформаций с учетом работы, которая выполняется для образования, в материале трещин предполагая, что их геометрические размеры имеют зависимость от акустического излучения или его параметров [13, 58].

Исходя из того, что источник АЭ физически охватывает некоторое локальный объем материала внутри твердого тела, в [31] рассмотрена задача, когда в материале возникает микро-разрыв, который представляется как полость, на поверхности которой напряжения падают от некоторой начальной величины до нуля. При этом считается, что размер полости и возникающие деформации малы, нагрузка имеет сферическую симметрию и является константой. Расчеты с

учетом предположений, позволили получить выражение для поля перемещений, которое распространяется от полости.

$$u = \frac{p_0 R^2}{r\sqrt{2}} - \frac{(1 + \mu)}{E} \exp\left[\frac{\delta}{\sqrt{2}}\left(t - \frac{r - R}{c_1}\right)\right] \sin\delta\left(t - \frac{r - R}{c_1}\right),$$

при $t \geq [(r - R)/c_1]$, если $t < [(r - R)/c_1]$, то $u=0$ (1.9)

где $\delta = (2\sqrt{2 \cdot c_1})/3R$; R – радиус полости; r – радиальная координата ($r \gg R$); μ – Коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; c_1 – скорость распространения продольных волн в материале; p_0 – постоянная нагрузка.

Форма волны сдвига, согласно (1.9), представляет собой затухающую синусоиду с максимальной энергией в первой возникающей полуволне. Подобные результаты получены и в работах [32, 114], где указана необходимость анализа первой полуволны, которая несет в себе информацию о параметрах дефекта, развивается.

Для реальных материалов решение задачи по определению поля перемещений усложняется за счет того, что трещины, как источник излучения, образующиеся в теле при различных (сложных) условиях напряженно-деформированного состояния, а так же имеют различные формы и раскрытия.

Физические модели сигналов АЭ базируются на учете процессов, протекающих в структуре материалов, например, образование и развитие трещин, их подрастания, а также протекания пластической деформации. Полученные аналитические выражения для сигналов АЭ показали, что сигналы АЭ при развитии трещин, а также сигналы АЭ при протекании пластической деформации отличаются между собой [4, 8]. Рассмотрены модели сигналов АЭ, как правило, относятся к статическим условий нагрузки материалов. Модели сигналов АЭ, касающиеся динамических условий нагрузки, в частности в условиях трения, достаточно мало.

В работах [7, 94] рассмотрена модель и результаты моделирования результирующего сигнала АЭ при износе поверхностных слоев материалов. Модель результирующего сигнала основана на моделях сигналов АЭ,

формирующиеся при разрушении вторичных структур I и II типа, которые рассмотрены в работе [7]. При разработке модели считалось, что в пределах площадки контакта поверхностей трения происходит разрушение вторичных структур I и II типов, то есть при условии того, что вторичные структуры I и II типа, в данной площади контакта, могут существовать совместно. С учетом динамического изменения пятен контакта и уменьшения времени разрушения вторичных структур I и II типа будет происходить переход от результирующего импульсного к результирующему непрерывного излучения сигналов АЭ, который представляется в виде суммы сигналов, возникающих в случайные моменты времени

$$U'(t) = \sum_i U_T(t - t_i) + \sum_j U_d(t - t_j), \quad (1.10)$$

где $U_T(t)$, $U_d(t)$ – сигналы АЭ, которые формируются при разрушении вторичных структур, соответственно, II и I типа; t_i , t_j – случайные моменты времени появления сигналов АЭ $U_T(t)$ и $U_d(t)$ при разрушении вторичных структур, соответственно, II и I типа.

Следует отметить, что модель результирующего сигнала АЭ, который формируется на этапе нормального износа пары трения. Модель построена на основе существующих представлений о процессе нормального износа, связанного с разрушением вторичных структур I и II типа.

1.5 Системы для регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии при механических нагружениях

Методика проведения экспериментальных исследований с АЭ основана на регистрации волн напряжений, возникающих в твердом теле при воздействии на него внешней нагрузки [63]. Как известно [103], при разрушении материалы испускают волны напряжений. Широкий спектр материалов при нагружении начинают испускать акустические колебания еще задолго до разрушения.

Развитие техники измерения сигналов АЭ при механических нагружениях

[63] идет по пути решения двух основных задач: повышения точности измерения [23] и увеличения производительности средств измерений путем их автоматизации. Изучение и регистрация сигналов АЭ стала возможной с созданием специальной аппаратуры [15, 23, 64, 65, 70, 100].

Комплекс физико-химических процессов [20], происходящих в материалах в процессе их трения и износа, определяет природу источников излучения АЭ и накладывает определенные требования на специфику методик проведения экспериментальных исследований и на аппаратуру, используемую для регистрации и обработки сигналов АЭ. Анализ сигналов АЭ позволяет изучать процессы [39], происходящие в материалах, в реальном масштабе времени. Полученные результаты используются для описания течения процессов и построения моделей источников излучения АЭ, которые позволяют не только оценить информативность параметров регистрируемых сигналов [61], но и сформулировать некоторые требования к электронной аппаратуре.

Изучая явление АЭ, большинство исследователей получили практические результаты, имеющие хорошее согласование друг с другом в отношении требований, предъявляемых к аппаратным средствам регистрации [19, 30, 75, 77, 129] и обработки акустической информации [45, 99]. К основным требованиям можно отнести: уровень шумов, приведенный ко входу предварительного усилителя - $3 \div 10$ мкВ; частотный диапазон от $100 \div 200$ кГц до $2 \div 5$ МГц; динамический диапазон $40 \div 60$ дБ.

Спектр используемых аппаратных средств регистрации и обработки АЭ при трении и износе достаточно разнообразен. Применяются промышленные системы и блоки, выпускаемые фирмами и организациями: «Dunegan / Endevco» (США), «Trodyne» (США), «Setim» (Франция), «AVT» (Англия), «ВНИИНК» (Молдова), «НПО Дальстандарт» (Россия). Следует отметить, что все большее распространение получает использование вычислительной техники не только для моделирования и вторичной обработки экспериментальных данных, но и для регистрации и измерения информации о АЭ.

Рассматривая аппаратные средства, можно выделить три направления,

используемых в организации измерения и обработки информации. Они базируются на общей концепции, сроках и определениях явления АЭ: аналоговый, аналого-цифровой и цифровой.

Построение аппаратных средств АЭ контроля рассмотрено многими авторами [14, 19, 37, 57, 65, 66, 69, 83, 104, 134] при этом аппаратура должна решать следующие задачи: прием сигналов АЭ [15, 64], усиление сигналов АЭ [65], обработку сигналов АЭ [99], определение значений параметров сигналов АЭ, фиксация результатов и выдача информации.

В наше время наиболее востребованная аппаратура, позволяющая с параметрами АЭ регистрировать параметры испытаний, такие как нагрузка, давление, температура и др. Структурная схема приведена на рис. 1.2. Системы регистрации и обработки сигналов АЭ зачастую включают следующие важные элементы: 1 - пьезокерамический датчик; 2 - предварительный усилитель; 3 - фильтр; 4 - основной усилитель; 5 - блок обработки сигналов АЭ; 6 - центральный процессор для обработки, хранения и представления информации; 7- клавиатура; 8 - монитор; 9 - датчики и кабельные линии параметрических каналов. Аппаратурные элементы 3 - 8 конструктивно выполняются в виде одного блока на базе мобильного компьютера.

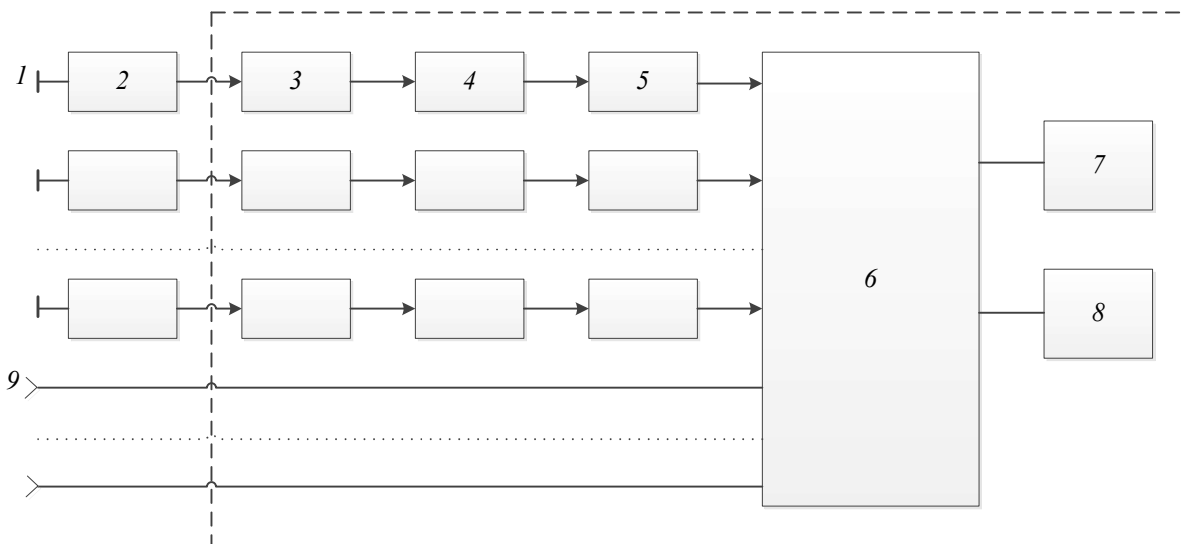


Рис.1.2. Структурная схема построения системы регистрации и обработки сигналов АЭ

Пьезокерамический датчик (1) устанавливается на образец испытуемого материала или конструкции. Упругие смещения, возникающие в материале при воздействии на него внешних нагрузок, превращаются датчиком в электрический сигнал. Уровень сигнала на выходе датчика недостаточный для непосредственной обработки электронной аппаратурой и требует дальнейшего усиления, что и осуществляется в блоке предварительного усилителя (2), а так же в блоке основного усилителя (4). Блок фильтра (3) предназначен для ограничения полосы пропускания усилительного тракта.

Сигналы на выходе основного усилителя (рис. 1.2), как правило, состоят из смеси зарегистрированных сигналов АЭ и помех, от которых не удастся избавиться фильтрацией. Сигналы поступают на блок аналоговой обработки 5 для получения какой-либо зависимости изменения регистрируемых параметров. Информация с выхода блока обработки превращается в цифровые коды с последующим использованием блока цифровых преобразований 6 и последующей записи информации в ЭВМ.

Фактически в ЭВМ осуществляется запись или ввод цифровых значений изменения параметров сигналов АЭ на аналоговых диаграммах, с привязкой ко времени (нагрузке, деформации, температуре и т.д.) с дискретностью, которая позволит осуществить восстановление сигналов с минимальными ошибками.

Преобразование аналоговых диаграмм в цифровые коды позволяет проводить автоматизацию сбора, накопления и статистическую обработку информации для поиска коррелируемых связей между параметрами импульсных сигналов АЭ и параметрами аналоговых диаграмм деформирования материалов.

В аналоговом способе организации измерения и обработки сигналов АЭ для получения какой-либо зависимости изменения регистрируемых параметров осуществляется жесткая аппаратная реализация вычислительного алгоритма. В аналого-цифровым способе прием, усиление и обработка сигналов АЭ осуществляется аналогично описанному.

Цифровой способ является более сложным. Он базируется на разработке определенных концепций, создании жестких алгоритмов и программных

продуктов для анализа и вывода информации, систем управления и систем контроля за состоянием аппаратуры.

Прием, усиление и выделение сигналов АЭ осуществляется аналогично описанному. Сигналы АЭ поступают в блоки цифровых измерений, выполняют цифровые измерения значений параметров импульсных потоков в соответствии с принятыми концепций. Измеренные значения накапливаются в буфере с последующей передачей в ЭВМ (центральный процессор).

Управление процессом выделения сигналов АЭ, измерения их параметров, накопления данных в буфере и передача их значений в центральный процессор осуществляется микропроцессором управления, работает по жесткому алгоритму. Анализ записанной информации осуществляется с использованием разрабатываемых пакетов прикладных программ [65, 89]. Результаты анализа выводятся в виде графиков и таблиц на различные устройства отображения информации: мониторы, самописцы, графопостроителей, экраны, табло и другие.

При исследовании процессов трения и износа методом акустической эмиссии важно существование ряда факторов, которые накладывают определенные ограничения на скорость ввода информации, ее объем, вычислительные алгоритмы, количество каналов и количество анализируемых параметров. Поэтому перспективным является реализация цифрового способа регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии с использованием технологии "Labcard" [85, 92], которая предусматривает использование высокоточных скоростных портов ввода-вывода (ПВВ) аналоговой и цифровой информации. При этом осуществляется распределение функций в проведении измерений с минимальной жесткой аппаратной реализацией первичной обработки информации и максимального использования гибких программных средств. Сочетание преимуществ различных устройств (быстродействия, точности, разрешающей способности, памяти и т.д.) направлено на получение максимальной выходной, первичной информации с последующей разнообразной ее вторичной обработкой. Структурная схема систем для анализа АЭ при исследовании процессов трения и износа показано на рис 1.3.

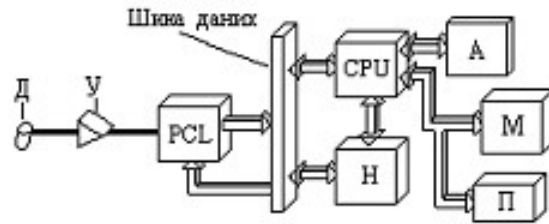


Рис. 1.3. Структура системы для анализа АЭ при исследовании процессов трения и износа с использованием технологии "Labcard".

При исследовании физических процессов (рис.1.3) упругие смещения, возникающие в материале, превращаются датчиком АЭ (Д) в электрический сигнал. Далее осуществляется усиление и выделение огибающей сигнала АЭ (У), который поступает непосредственно на универсальный ПВВ (PCL), что обеспечивает преобразование аналогового сигнала в цифровой код с последующей передачей его значение по шине данных ПК и запоминания в накопителе информации (Н). При этом измеряются НЕ пиковые значения параметров, а осуществляется непрерывный процесс дискретизации входного сигнала с сохранением измеренных значений физически построения запоминающих устройств информации (байт - слово - сектор и т.д.). Это позволяет сохранить исходную информацию и осуществлять ее неоднократное гибкую обработку с получением максимально возможного набора анализируемых параметров индивидуальных сигналов и импульсных потоков АЭ.

Управление процессом измерения осуществляется через порт ввода-вывода с использованием программного комплекса (А), который осуществляет также фильтрацию, обработку данных и сохранение полученных результатов на логическом уровне построения запоминающих устройств информации в виде файловых структур, вывод текстовой и графической информации на экран монитора (М) или печатающее устройство (П).

Программный комплекс, поддерживающий работу процессора (CPU), трансформирует непрерывную, независимую работу отдельных элементов в определенную последовательность выполняемых операций и определенную последовательность обмена данными по каналам. ПВВ воспринимает входную

информацию только по аналоговому интерфейсу с последующей передачей цифровых данных для их временного хранения по шине компьютера.

Наличие исходной информации о ходе физического процесса позволяет использовать гибкие алгоритмы ее фильтрации, а также применять гибкую разделенную обработку в зависимости от характера зарегистрированной АЭ (процесс излучения в виде импульсной последовательности малой или большой интенсивности, процесс излучения в виде колебаний вокруг некоторого уровня). Разрешение и точность измерения с амплитудно-временными параметрами определяется разрешением и точностью ПВВ, а объем вводимой ограничен только объемом накопителя для ее сохранения (Гбайта).

Погрешности могут быть определены погрешностями измерения времени за которое сигнал поступает на преобразователь. Составляющими погрешностей могут быть:

- погрешность измерения времени сигналов;
- отличие реальных от теоретически принятых путей распространения;
- наличие анизотропии скорости распространения сигналов;
- изменение формы сигнала из-за распространения по конструкции;
- действие нескольких источников , а также наложение по времени сигналов и др.

Последующее усовершенствование автоматизированной техники для проведения регистрации и обработки сигналов АЭ при механических нагрузениях, расширение круга решаемых с ее помощью задач связаны с совершенствованием метрологического обеспечения измерений в этой области и, в частности, с развитием метода АЭ с разработкой теоретических подходов к интерпретации регистрируемой информации, методов её обработки, методов и систем диагностики объекта.

1.6 Постановка научной задачи

Разработка и исследования направленные на повышение долговечности узлов трения ведутся в разных областях науки. Работа машин и агрегатов

современной техники происходит со всевозрастающими скоростями и давлениями, высокими и низкими температурами, в вакууме. Повышаются требования к надежности и долговечности вместе со стремлением к упрощению и удешевлению разрабатываемых конструкций, к кондиционности вырабатываемых продуктов. Тенденции развития трибологии и её современное аппаратное оснащение позволяют говорить о возможности осуществления новой попытки проникновения в природу трения и изнашивания, учитывающей многомасштабность процессов фрикционного взаимодействия. Масштаб определяется не только размерами неровностей на поверхностях трения, но и размерным диапазоном измерения внешних нагрузок и физико-механических свойств. Естественно, все эти факторы не являются независимыми, в зависимости от размеров деформируемых неровностей и приложенной нагрузки. Практически любая модель фрикционного взаимодействия основывается на решении соответствующей контактной задачи.

Для оценки физико-механических процессов, происходящих при фрикционном взаимодействии тел, используются различные электронные, оптические, акустические и другие методы. Самым эффективным методом исследований в области физики прочности и разрушения изделий становится акустическая эмиссия. Наличие устойчивых связей между параметрами АЭ и закономерностями разрушения позволяет успешно проводить диагностику простых и сложных элементов конструкций. При проведении оценок состояния изделий важное значение имеет определение механизма развивающегося процесса. Поэтому одной из приоритетных задач является исследование механизмов и закономерностей деформирования и разрушения изделий при различных режимах нагружения. Поэтому важное значение имеет разработка моделей, позволяющих определить основные различия в характере изменения формируемых сигналов АЭ и использования полученных различий для разделения процессов пластической деформации и образования трещин в материалах.

Исходя из выше сказанного, целью работы являются разработка на основе

полученных исследований и уже существующего опыта новой системы для исследования и прогнозирования состояния узлов трения при контактном взаимодействии поверхностей и механических нагрузениях.

На основании проведённого анализа, для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

- исследование состояния вопроса по использованию способов диагностики узлов трения. Обоснование актуальности разработки акусто-эмиссионного способа исследований
- расширение, углубление и формирование новых взглядов на явления и процессы в различных областях научных исследований
- теоретически установить зависимость между процессами деформации и разрушения и параметрами сигналов АЭ
- разработка моделей формирования сигналов АЭ при деформировании и разрушении материалов, определение основных закономерностей
- разработка концепции построения акусто-эмиссионных систем для диагностики узлов трения
- разработка методики и программного обеспечения, необходимого для работы акусто-эмиссионного диагностического комплекса
- провести экспериментальные исследования

Выводы по первой главе

1. Изложены основные литературные данные о явлении и методе АЭ, способах анализа, факторах, которые влияют на АЭ информацию. Основное внимание уделяется исследованию вопросов о развитии процессов разрушения поверхностей трения, небезопасность их для узлов трения, исследования физики процессов трения и изнашивания, а также изучения разрушения материалов узлов трения с использованием метода АЭ.

2. Рассмотрены основные термины, определения и параметры сигналов АЭ. Рассмотрены известные теоретические модели сигналов АЭ. Анализируются

основные концепции построения АЭ систем и методологические особенности выявления и обработки регистрируемых сигналов. Приводятся закономерности взаимосвязи акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения материалов узлов трения.

3. Исследования проблемы показали, что в литературных источниках отсутствуют адекватные модели формирования акустического излучения, обоснованные информативные параметры, закономерности их изменения, методики обработки информации, что ограничивает практическое использование метода АЭ в диагностике узлов трения. Существует ряд нерешенных или недостаточно решенных вопросов, который свидетельствует об ограниченном характере существующих научных исследований и не позволяет решить актуальную задачу своевременного обнаружения повреждений узлов трения. В первую очередь, это касается промышленных условий эксплуатации.

4. Сделан вывод, что существующие представления о методе АЭ и системы диагностирования узлов трения не позволяют в полной мере решить задачу диагностики узлов трения в эксплуатации с достаточной достоверностью. Эту задачу можно решить лишь на основе использования и последующего развития метода АЭ и средств, с разработкой теоретических подходов к интерпретации зарегистрированной информации, методов ее обработки, методов и систем диагностики узлов трения.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ ОБЪЕКТА

2.1 Модель результирующего сигнала акустической эмиссии при механических нагрузениях поверхностных слоев материалов

Как было отмечено в главе 1, при построении физических моделей сигналов АЭ базируются на учете реальных процессов, развивающихся в структуре материалов, таких как образование и рост трещин, а так же протекание пластической деформации. Модели такого типа при статических условиях нагружения рассмотрены в работах [4, 8]. В их основе положены существующие представления о процессах разрушения материалов [17, 60, 96, 98]. При этом были получены аналитические выражения для сигналов АЭ, а так же показано, что сигналы АЭ при развитии трещин и протекании пластической деформации различаются между собой. Моделирование сигналов АЭ [5, 9] с описанием различных сценариев роста трещин и протекания пластической деформации позволили не только описать разнообразие реальных форм сигналов АЭ, но и установить закономерности их изменения в зависимости от механизмов процессов разрушения, протекающих в структуре материала.

Подходы, принятые в [4, 8], использованы при построении моделей сигналов АЭ и в условиях динамических видов нагружения, а именно трении поверхностных слоев материалов на стадии нормального изнашивания [7], когда излучение сигналов обусловлено разрушением вторичных структур I и II типа. Модели формировались для пары трения, которая представляет собой кинематическую схему из образцов в виде роликов (рис.2.1). При этом поверхность фрикционного контакта ограничена некоторой площадью S , которая представляет собой линию малой ширины. Считалось, что поверхности контакта приработаны. Материал образцов с площадью контактного взаимодействия S (рис.2.1) является изотропным, за исключением некоторой малой области неоднородности S_T , которая расположена в площади S . При этом область

неоднородности S_T намного меньше, чем S , $S_T \ll S$. Рассмотрение процессов разрушения области S_T , как разрушение вторичных структур I и II типа позволило получить математические выражения для результирующих сигналов АЭ во времени в следующем виде. Для вторичной структуры II типа (хрупкое разрушение)

$$U_T(t) = U_0 \delta_0 \sigma_{0e}^3 e^{4zt} e^{-b\sigma_{0e} z t}, \quad (2.1)$$

где: $U_0 = kN_0 cz$ - максимально возможное смещение при разрушении без дисперсного по прочности поверхностного слоя S_T материала; k - коэффициент пропорциональности; N_0 - количество элементарных объемов в области неоднородности S_T ; c, b - коэффициенты распределения элементарных объемов по прочности (зависят от физико-механических характеристик материала; σ_{0e} - начальные эквивалентные напряжения на этапе нормального изнашивания; t - время; $z = E/\xi$; ξ - коэффициент вязкости; E - модуль упругости; $\delta_0 = \int_{t-\delta/2}^{t+\delta/2} a(\tau) d\tau$ - средняя длительность возмущения при разрушении элементарного объема; $a(\tau)$ - функция, которая определяет форму одиночного импульса возмущения (одинакова для всех элементарных объемов).

Выражение (2.1) получено с учетом зависимости амплитуды одиночного возмущения от величины прочности элементарного объема в области S_T .

Для вторичной структуры I типа (пластическая деформация)

$$U_d(t) = U_{0d} \varepsilon_{0d} e^{rt} e^{-B\varepsilon_{0d} e^{rt}}, \quad (2.2)$$

где $U_{0d} = a_0 M \frac{\nu_d}{\ell_0} \delta_d$ - амплитуда смещения, которая зависит от физико-механических характеристик материала; a_0 - амплитуда импульса одиночного возмещения при движении дислокации (постоянна и не зависит от деформации); ℓ_0 - расстояние между двумя актами излучения одиночной дислокации; ν_d - средняя скорость движения дислокаций (считается постоянной); ε_{0d} - начальная

относительная деформация; $\delta_d = \int_{t-\delta_1/2}^{t+\delta_1/2} a_1(\tau) d\tau$ - средняя длительность импульса

возмущения; $a_1(\tau)$ - функция, которая определяет форму импульса возмущения (является неизменной); M , B , r – постоянные (зависят от физико-механических характеристик материалов).

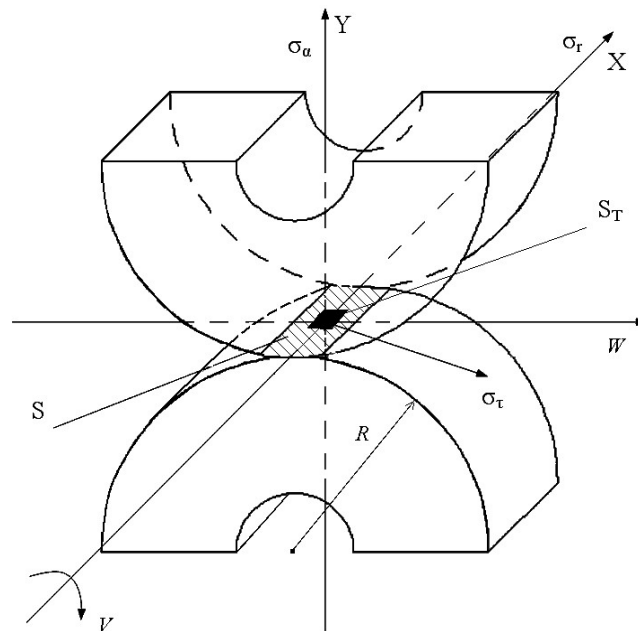


Рис. 2.1 Схема контактного взаимодействия образцов пары трения для построения моделей сигналов АЭ: S – площадь фрикционного контактного взаимодействия пары трения в виде роликов; S_T – область неоднородности в площади контактного взаимодействия S ; $\sigma_r = \sigma_n$ – радиальные напряжения; σ_τ – тангенциальные напряжения; σ_a – осевые напряжения; R – радиус образца; V – скорость вращения образца

Следует отметить, что процессы формирования сигналов АЭ и их моделирование в [7] осуществлялось при условии того, что разрушение вторичных структур I, II типа для выбранной кинематической схемы происходит в одной площади фрикционного контактного взаимодействия, которая представляет собой площадку S (рис.2.1) в виде линии некоторой ширины. В рассматриваемой площади контакта вторичные структуры I и II типа могут существовать совместно. При этом процессы их разрушения могут развиваться последовательно или с достаточно малым промежутком времени. По завершении данных процессов происходит завершение формирования сигнала АЭ.

Однако в реальных условиях работы пары трения с заданной скоростью вращения ее образца (образцов) происходит последовательная смена площадок S контактного взаимодействия вдоль образующей поверхности образцов. В соответствии с этим разрушение вторичных структур I и II типа будет происходить в последовательно изменяющихся площадках фрикционного

контакта образцов пары трения. Очевидно, что, в этом случае, при формировании результирующего сигнала АЭ значительный вес приобретает время возникновения процессов разрушения вторичных структур I и II типа. Это время будет зависеть от скорости смены площадок контакта образцов пары трения, т.е. скорости вращения образцов с учетом конечной ширины площадки фрикционного контакта. Совместное существование вторичных структур I и II типа, разрушаемых последовательно в площадке контакта с достаточно малыми промежутками времени, а так же наличие динамической перемещаемой нагрузки, обуславливающей смену площадок фрикционного контакта с заданным (малым) промежутком времени приводит к тому, что импульсные сигналы АЭ будут перекрываться не только в площадке контакта, но и при переходе от площадки к площадке. Это означает, что с уменьшением времени возникновения разрушений вторичных структур I и II типа (увеличением интенсивности разрушения), и непрерывности данного процесса во времени будет происходить переход от результирующего импульсного к результирующему непрерывному процессу излучения сигналов АЭ, т.е. результирующий сигнал АЭ будет представлять собой непрерывный сигнал.

В соответствии со сказанным, результирующий сигнал АЭ можно представить в виде суммы импульсных сигналов, возникающих в случайные моменты времени при разрушении вторичных структур I и II типа

$$U'(t) = \sum_i U_T(t - t_i) + \sum_j U_d(t - t_j), \quad (2.3)$$

где $U_T(t)$, $U_d(t)$ - сигналы АЭ при разрушении вторичных структур, соответственно, II и I типа, согласно выражениям (2.1) и (2.2); t_i , t_j - случайные моменты времени появления сигналов АЭ $U_T(t)$ и $U_d(t)$ при разрушении вторичных структур, соответственно, II и I типа.

Если учесть математические описания импульсных сигналов АЭ (2.1) и (2.2) при разрушении вторичных структур II и I типа, выражение (2.3) можно записать

$$U'(t) = \sum_i U_0 \delta_0 \sigma_{0e}^3 e^{4z(t-t_i)} e^{-b\sigma_{0e} z(t-t_i)} + \sum_j U_{0d} \varepsilon_{0d} e^{r(t-t_j)} e^{-B\varepsilon_{0d} r(t-t_j)}, \quad (2.4)$$

где параметры U_0 , b , σ_{0e} , z , δ_0 , U_{0d} , ε_{0d} , r - параметры, согласно (2.1) и (2.2).

Из выражения (2.4) видно, что при принятых начальных условиях (заданных физико-механических характеристиках материалов образцов пары трения, постоянстве размера площадки фрикционного контакта) результирующий сигнал АЭ определяется начальным напряженно-деформированным состоянием $(\sigma_{0e}, \varepsilon_{0d})$ и временем начала разрушения вторичных структур I и II типа (t_i, t_j) .

С учетом начального напряженно-деформированного состояния и времени начала разрушения вторичных структур I и II типа проведем моделирование результирующего сигналов АЭ, в соответствии с (2.4), в два этапа. На первом этапе при постоянных значениях $\sigma_{0e}, \varepsilon_{0d}$ будем проводить исследования изменения результирующего сигнала АЭ в зависимости от времени начала разрушения вторичных структур I и II типа. На втором этапе при некотором постоянном значении времени разрушения вторичных структур I и II типа проведем исследования изменения результирующего сигнала АЭ в зависимости от значений напряжений σ_{0e} и деформаций ε_{0d} .

Результаты моделирования [117, 118, 119] результирующего сигнала АЭ для первого и второго этапов исследований в виде графиков изменения $\tilde{U}(t) = U'(t)/U_{\max}$ в относительных единицах показаны на рис.2.2 и рис.2.3. При построении графиков время нормировано на время действия нагрузки на пару трения, которое составляет величину t_{\max} . Параметры $\sigma_{0e}, \varepsilon_{0d}, b$ и B , входящие в выражение (2.4) приведены к безразмерным величинам.

При моделировании результирующих сигналов АЭ на первом этапе было принято, что $\sigma_{0e} = 17, \varepsilon_{0d} = 17$, а значения b и B равны между собой, $b = B = 10$. При этом результирующий сигнал АЭ, согласно (2.4), формировался по некоторому выбранному сценарию последовательного разрушения вторичных структур I и II типа с определенным их чередованием. Например, разрушение структур происходит по сценарию – I, I, I, II, II, I, II, II, I, I, I, II, II, II,... и т.д. Данный сценарий разрушения сохранялся неизменным на последующих ступенях моделирования. Шаг по времени начала разрушения каждой последующей структуры I или II типа изменялся от 0,0007 до 0,00001 относительных единиц.

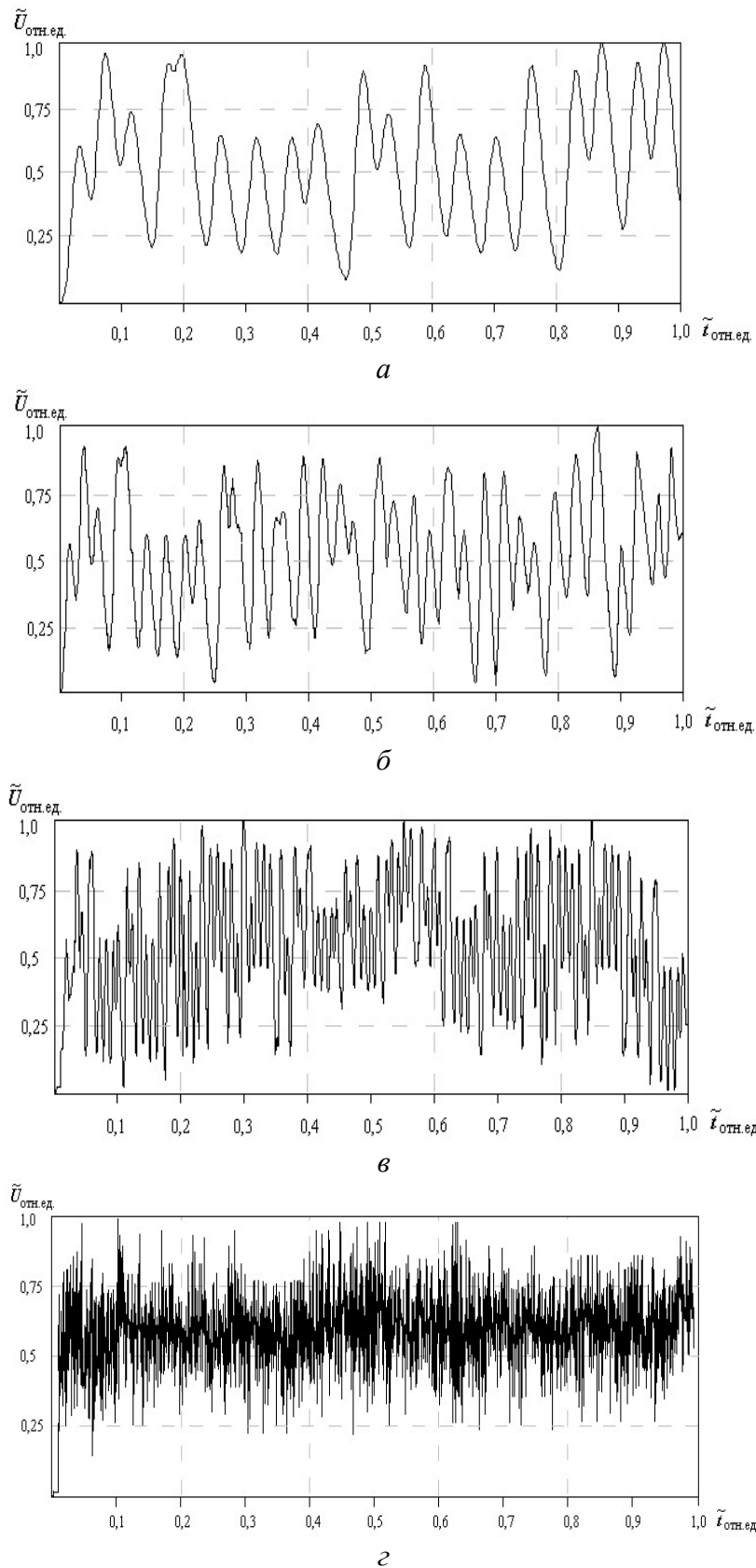


Рис. 2.2 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального износа пары трения при различных начальных временах разрушения вторичных структур I и II типа: $\sigma_{0e}=17$; $\varepsilon_{0d}=17$; $b=B=10$. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} . $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Шаг по времени начала разрушения каждой последующей структуры I или II типа в относительных единицах:
а – 0,0007; *б* – 0,0004; *в* – 0,0001; *г* – 0,00001

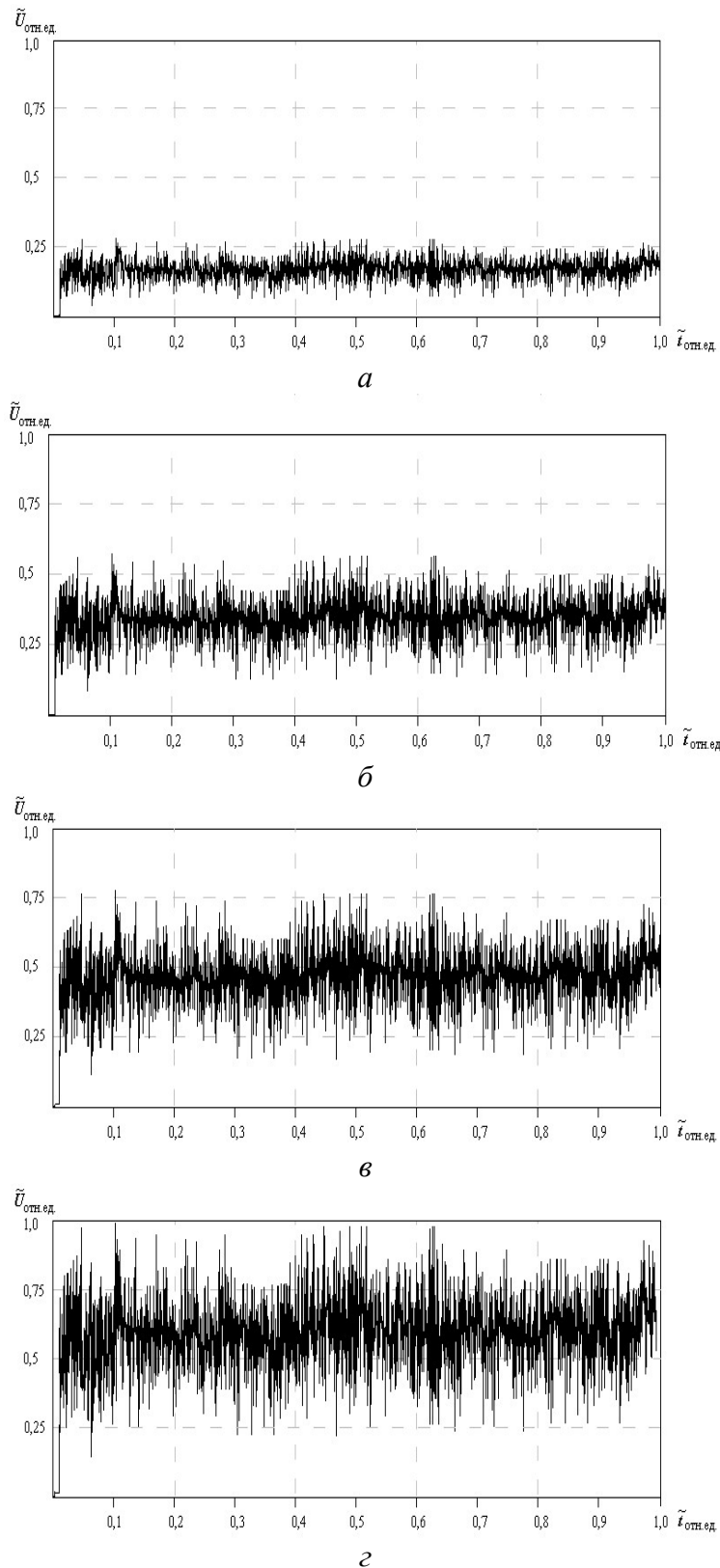


Рис. 2.3 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального износа пары трения при разрушении вторичных структур I и II типа для различных значений напряжений и деформаций: $b=B=10$. Шаг приращения времени начала разрушения каждой последующей структуры I или II типа составляет 0,00001 в относительных единицах. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ -

нормированное значение на U_{\max} . $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{\max} = const$.

Значения напряжений и деформаций составляет: $a- \sigma_{0e}=11; \varepsilon_{0d}=11;$

$б- \sigma_{0e}=13; \varepsilon_{0d}=13; в- \sigma_{0e}=15; \varepsilon_{0d}=15; г- \sigma_{0e}=17; \varepsilon_{0d}=17$

При этом время между началом разрушения структур I и II типа на каждой ступени моделирования оставалось неизменным.

При моделировании результирующих сигналов АЭ на втором этапе было принято, что значения b и B равны между собой, $b=B=10$. При этом результирующий сигнал АЭ, согласно (2.4), как и в предыдущем случае, формировался по некоторому выбранному сценарию последовательного разрушения вторичных структур I и II типа с определенным их чередованием. Например, разрушение структур происходит по сценарию – I, I, I, II, II, I, II, II, I, I, I, II, II, II,...и т.д. Сценарий разрушения сохранялся неизменным на последующих ступенях моделирования. Однако, в отличие от предыдущего случая, шаг по времени начала разрушения каждой последующей структуры I или II типа на каждой ступени моделирования оставался неизменным и составлял 0,00001 в относительных единицах. При этом значения σ_{0e} и ε_{0d} изменялись от 11 до 17 (в безразмерных величинах) с шагом приращения, равным 2.

Из результатов проведенного моделирования (рис.2.2, рис.2.3) видно, что при последовательном разрушении вторичных структур I и II типа с достаточно малыми промежутками времени результирующий сигнал АЭ представляет собой не импульсный, а непрерывный сигнал. Другими словами, импульсные сигналы АЭ, формирование которых происходит при условии отдельного разрушения структуры I или II типа, трансформируются в непрерывный сигнал АЭ. Возникновение такого непрерывного сигнала обусловлено условием последовательного разрушения вторичных структур I и II типа с произвольными начальными временами.

С постепенным уменьшением времени начала разрушения вторичных структур I и II типа, как видно из рис.2.2, наблюдается постепенное сжатие сигнала АЭ во времени, а так же трансформация его формы. При этом сигнал АЭ приобретает вид гребенчатого сигнала с выбросами его амплитуды. Так как, при заданных начальных напряжениях σ_{0e} и деформациях ε_{0d} , амплитуда импульсного сигнала АЭ при разрушении вторичной структуры II типа значительно превышает амплитуду сигнала АЭ при разрушении вторичной

структуры I типа, что показано в [7], то, совершенно очевидно, что выбросы амплитуды на результирующем сигнале будут определяться разрушением вторичных структур II типа.

Преобладающее влияние разрушения вторичных структур II типа на разброс и выбросы и разброс амплитуды результирующего сигнала подтверждается данными, полученными на втором этапе моделирования, когда изменялись значения начальных напряжений σ_{0e} и деформаций ε_{0d} . Результаты моделирования результирующих сигналов АЭ при данных условиях нагружения пары трения показаны на рис.2.3. Из рис.2.3 видно, что при заданном и неизменном временном шаге начала последовательного разрушения вторичных структур I и II типа с выбранным неизменным сценарием, увеличение начальных напряжений σ_{0e} и деформаций ε_{0d} приводит не только к возрастанию средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, но и к увеличению разброса по амплитуде (разница между максимальным и минимальным значением выбросов амплитуды в результирующем сигнале АЭ). Обработка и анализ полученных результатов на первом шаге моделирования (рис.2.3, а) показали, что при заданных величинах напряжений и деформаций, которые, соответственно, равны $\sigma_{0e} = 11$ и $\varepsilon_{0d} = 11$ (в безразмерных единицах) значение средней амплитуды результирующего сигнала АЭ составляет $\bar{U}_{\text{отн.ед.}} = 0,16$ (в относительных единицах). При этом величина максимального разброса по амплитуде равна $\Delta\tilde{U}_{\text{отн.ед.}} = 0,23$ (в относительных единицах). В тоже время, при увеличении напряжений и деформаций до значений $\sigma_{0e} = 13$ и $\varepsilon_{0d} = 13$ величина средней амплитуды результирующего сигнала АЭ уже составляет $\bar{U}_{\text{отн.ед.}} = 0,37$, а величина максимального разброса по амплитуде равна $\Delta\tilde{U}_{\text{отн.ед.}} = 0,48$ (рис.2.3, б). При дальнейшем увеличении напряжений и деформаций происходит возрастание, как средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, так и величины ее разброса (рис.2.3, б, в).

Полученные закономерности изменения средней амплитуды

результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса можно объяснить следующим образом. Как было отмечено в [7], при условии одинаковости размера разрушаемых вторичных структур I и II типа, амплитуда сигнала АЭ от структуры II типа превышает амплитуду сигнала АЭ от структуры I типа. Кроме того, при увеличении напряжений амплитуда сигнала АЭ от вторичной структуры II типа возрастает и происходит сжатие сигнала. При увеличении деформаций амплитуда сигнала АЭ от вторичной структуры I типа остается неизменной, а наблюдается сжатие сигнала. При наличии такой разницы в амплитуде сигналов АЭ, формируемых в процессе разрушения вторичных структур I и II типа, верхний уровень амплитуды результирующего сигнала будет определяться амплитудой сигнала вторичной структуры II типа, а нижний уровень амплитуды результирующего сигнала – амплитудой сигнала вторичной структуры I типа. При минимальных начальных напряжениях и деформациях значения амплитуд сигналов АЭ при разрушении вторичных структур I и II типа не значительно отличаются друг от друга (на порядок). Поэтому при наложении сигналов вклад в результирующий сигнал АЭ сигналов при разрушении вторичных структур I типа будет, соизмерим с вкладом сигналов, возникающих при разрушении вторичных структур II типа. При таких условиях, совершенно очевидно, что разброс амплитуды результирующего сигнала должен быть минимальным, что и наблюдается в данных проведенного моделирования (рис.2.3, а). Однако, с увеличением начальных напряжений σ_{0e} и деформаций ε_{0d} разница в амплитуде сигналов АЭ для структур I и II типа возрастает. Поэтому при возрастании напряжений и деформаций вклад в результирующий сигнал АЭ сигнала, возникающего при разрушении вторичной структуры I типа уменьшается. Причем, чем выше напряжения и деформации, тем меньший вклад в результирующий сигнал АЭ сигнала от разрушения вторичной структуры I типа. Это, естественно, должно приводить к уменьшению нижнего уровня результирующего сигнала, и, как следствие, увеличению среднего уровня и разброса амплитуды сигнала АЭ, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис.2.3, б, в, г).

Таким образом, разработанная модель результирующего сигнала АЭ, которая базируется на существующих представлениях о разрушении вторичных структур I и II типа в процессе трения поверхностных слоев материалов, результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, показали хорошее согласование с данными экспериментальных исследований.

2.2 Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при преобладающем механизме разрушения поверхностных слоев материалов при механических нагружениях

Разработанная модель результирующего сигнала АЭ (2.4) строилась в предположении того, что материалы пар трения являются сложными, многокомпонентными материалами. При этом процессы изнашивания поверхностных слоев материалов представляет собой процессы, связанные с разрушением вторичных структур I и II типа. Однако в парах трения могут использоваться и материалы, при разрушении поверхностных слоев которых в процессе трения преобладающим является один из механизмов разрушения вторичных структур. Другими словами, преобладающим может быть, как разрушение вторичных структур I типа, так и вторичных структур II типа, а вклад второй компоненты является незначительным. В данном случае, при преобладающем механизме разрушения, для результирующих сигналов АЭ, исходя из (2.4) можно записать следующие выражения.

При преобладающем механизме разрушения структур I типа

$$U'_1(t) = \sum_j U_{0d} \varepsilon_{0d} e^{r(t-t_j)} e^{-B\varepsilon_{0d}} e^{r(t-t_j)}, \quad (2.5)$$

При преобладающем механизме разрушения структур II типа

$$U'_2(t) = \sum_i U_0 \delta_0 \sigma_{0e}^3 e^{4z(t-t_i)} e^{-b\sigma_{0e}} e^{z(t-t_i)}. \quad (2.6)$$

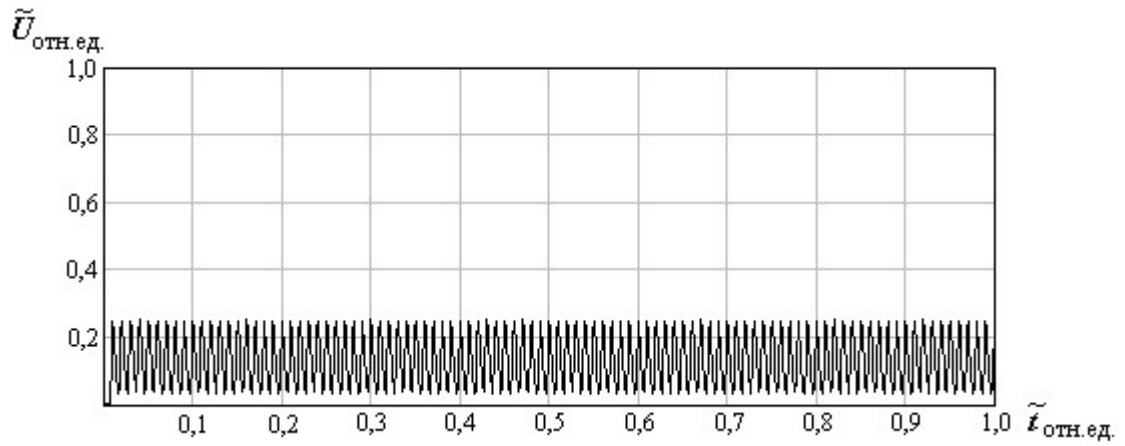
Проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, в соответствии с выражениями (2.5) и (2.6). Моделирование, как и в предыдущих случаях, будем проводить при изменении двух составляющих. Во-первых, при постоянстве напряжений и деформаций будем исследовать влияние начала времени

разрушения вторичных структур на форму и параметры результирующего сигнала АЭ. Во-вторых, при постоянстве времени начала разрушения вторичных структур будем исследовать влияние изменения напряжений и деформаций на форму и параметры результирующих сигналов АЭ. Моделирование с реализацией данных условий выполним, как для преобладающего механизма разрушения структур I типа, так и для преобладающего механизма разрушения структур II типа, согласно (2.5) и (2.6).

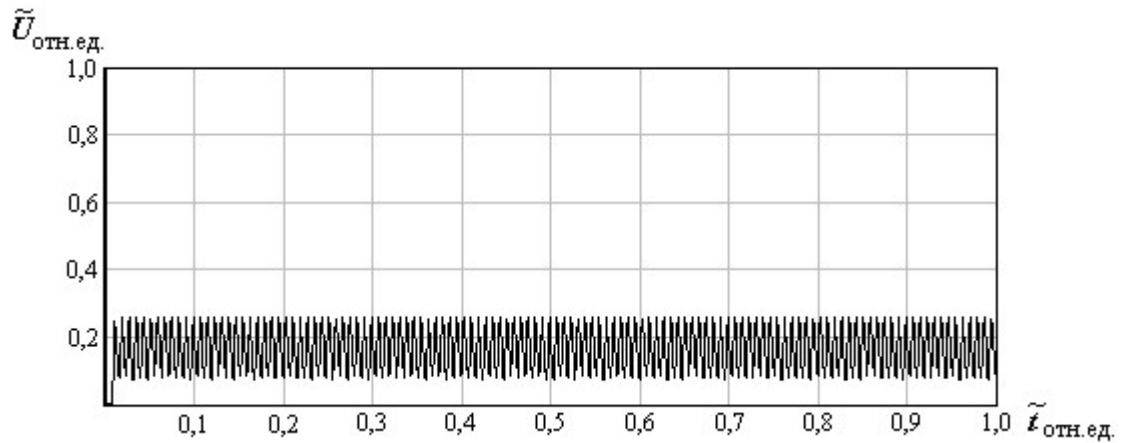
Данные моделирования результирующих сигналов АЭ, согласно (2.5), на стадии нормального изнашивания поверхностных слоев материалов пары трения, в соответствии, с рассмотренными выше условиями показаны на рис.2.4 и рис.2.5 в виде графиков изменения $\tilde{U}(t) = U'(t)/U_{\max}$ в относительных единицах. При построении графиков время нормировано на время действия нагрузки на пару трения, которое составляет величину t_{\max} . На рис.2.4 приведены результирующие сигналы АЭ, которые получены при условии постоянства деформаций и изменении времени начала разрушения вторичных структур I типа. На рис.2.5 приведены результирующие сигналы АЭ, которые получены при условии постоянства напряжений и изменении времени начала разрушения вторичных структур II типа. Моделирование осуществлялось по сценарию последовательного разрушения вторичных структур.

При разрушении вторичных структур I типа на первом этапе моделирования было принято, что $\varepsilon_{0d} = 17$, а значение $B = 10$. При этом время начала разрушения каждой последующей структуры I типа изменялось от 0,01 до 0,006 относительных единиц. Другими словами моделирование осуществлялось при уменьшении времени начала разрушения вторичных структур I типа от 0,01 относительных единиц с шагом уменьшения равным 0,002 относительных единиц.

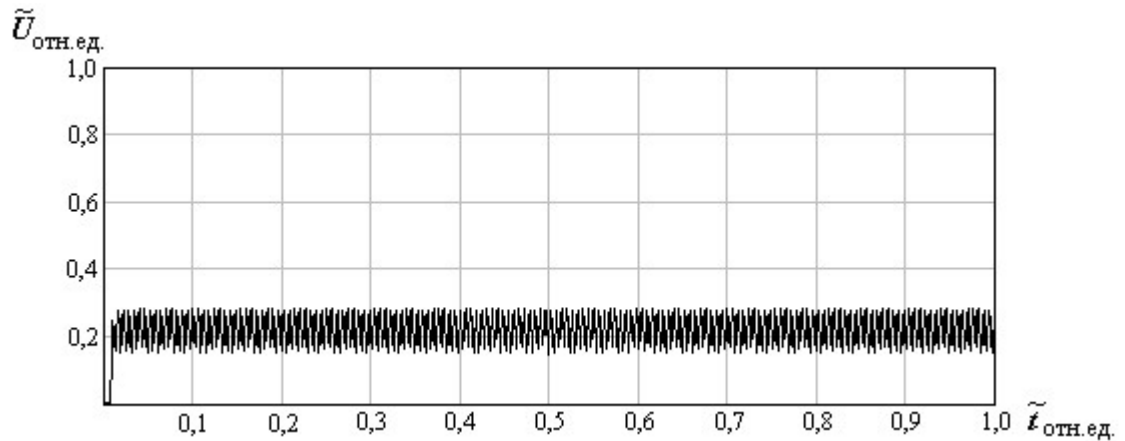
Из результатов проведенного моделирования (рис. 2.4) видно, что при последовательном разрушении вторичных структур I типа результирующий сигнал представляет собой непрерывный сигнал АЭ. При этом с уменьшением



а



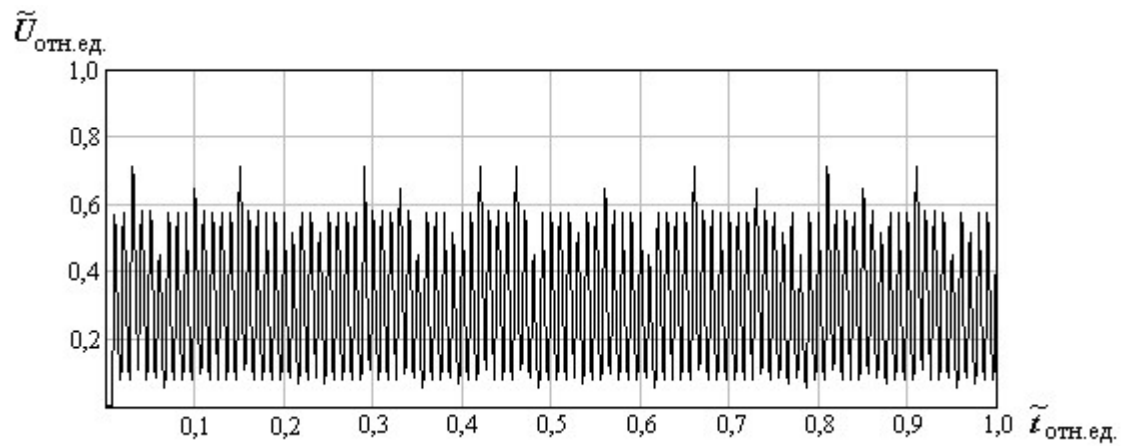
б



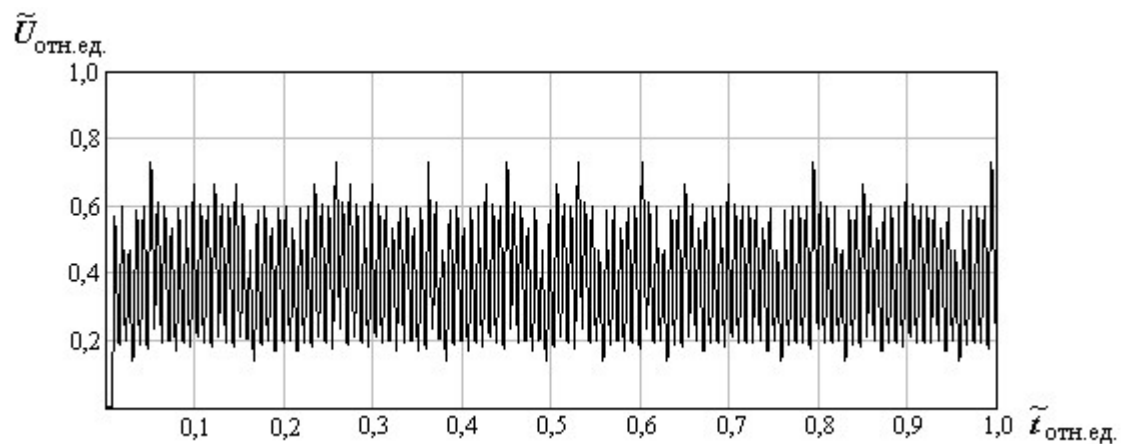
в

Рис. 2.4 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального изнашивания пары трения при разрушении вторичных структур I типа при условии постоянства деформации и различных начальных временах разрушения вторичных структур I типа: $\varepsilon_{0d} = 17$; $B = 10$.

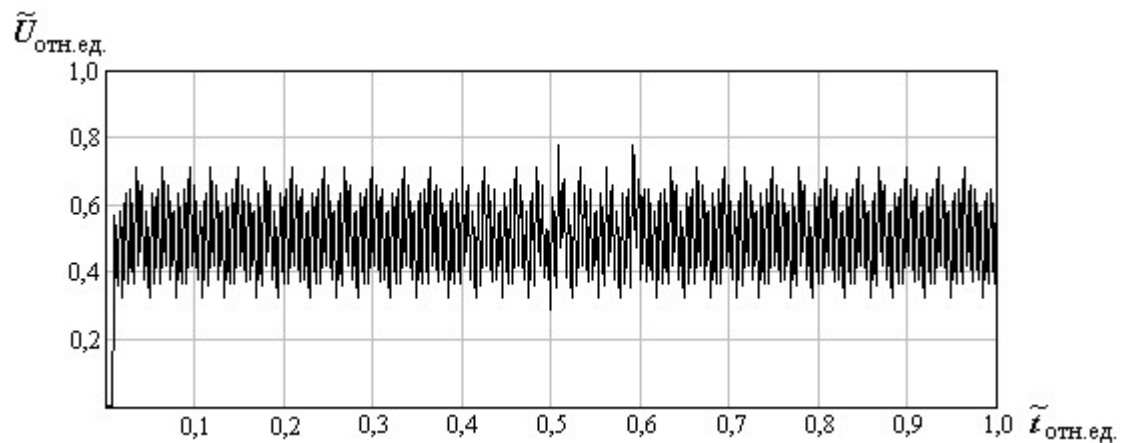
$\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} . $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Время начала разрушения каждой последующей структуры I типа в относительных единицах: а - 0,01; б - 0,008; в - 0,006.



а



б



в

Рис. 2.5 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального изнашивания пары трения при разрушении вторичных структур II типа при условии постоянной напряженности и различных начальных временах разрушения вторичных структур II типа: $\sigma_{0e} = 17$; $b = 10$.

$\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} . $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Время начала разрушения каждой последующей структуры II типа в относительных единицах: а - 0,01; б - 0,008; в - 0,006.

времени начала разрушения вторичных структур I типа, наблюдается сжатие сигнала АЭ во времени, а также трансформация его формы.

Из полученного результата (рис. 2.4) также видно, что при разрушении вторичных структур I типа на этапе нормального изнашивания, с уменьшением времени начала их разрушения, максимальный уровень амплитуды результирующего сигнала возрастает не значительно. При этом, наблюдается уменьшение разброса по амплитуде. С уменьшением величины приращения времени начала разрушения вторичных структур I типа от 0,01 (рис.2.4, а) до 0,008 (рис.2.4, б) среднее значение амплитуды результирующего сигнала АЭ возрастает на 3,3%, а при величине времени приращения 0,006 (рис.2.4, в) – на 18% по отношению ко времени приращения 0,01. Это обусловлено следующим.

Амплитуда сигнала АЭ при развитии пластической деформации [93] зависит от количества подвижных дислокаций. Чем их больше, тем больше амплитуда сигнала АЭ. При этом количество подвижных дислокаций не зависит от скорости деформирования, а определяется величиной объема материала, вступившего в пластическую деформацию. При моделировании предполагалось, что объемы материала вступающего в пластическую деформацию являются неизменными при разрушении каждой последующей структуры I типа. Поэтому амплитуды формируемых импульсных сигналов при разрушении каждой вторичной структуры I типа являются одинаковыми. Однако за счёт перекрытия импульсов во времени происходит возрастание амплитуды результирующего сигнала. Данное возрастание тем больше, чем больше перекрытие сигналов (рис. 2.6). Однако возрастание амплитуды является медленным (незначительным), что обусловлено тем, что задний фронт сигнала изменяется по экспоненциальному закону с быстрым уменьшением амплитуды. Совершенно очевидно, чем больше перекрытие импульсных сигналов, тем большее значение будет иметь максимальная амплитуда результирующего сигнала.

Уменьшение разброса по амплитуде результирующего сигнала при уменьшении времени разрушения вторичных структур I типа также обусловлено перекрытием формируемых импульсных сигналов. Действительно, при

разрушении каждой вторичной структуры I типа формируются импульсные сигналы, задний фронт которых изменяется по экспоненциальному закону. Если перекрытие предыдущего и последующего сигналов не значительны, то нижний уровень результирующего сигнала мал (А, рис. 2.6 а). Это приводит к большой величине разброса амплитуды в результирующем сигнале. Если перекрытие по времени предыдущего и последующего сигналов возрастает (уменьшение времени начала разрушения вторичных структур I типа), то нижний уровень результирующего сигнала также возрастает (В, рис. 2.6 б). Как следствие, уменьшается разброс по амплитуде результирующего сигнала, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.4).

При разрушении вторичных структур II типа на первом этапе моделирования было принято, что $\sigma_{0e} = 17$, а значение $b = 10$. При этом время начала разрушения каждой последующей структуры II типа изменялось от 0,01 до 0,006 относительных единиц, т.е. моделирование осуществлялось при уменьшении времени начала разрушения вторичных структур II типа от 0,01 относительных единиц с шагом уменьшения равным 0,002 относительных единиц.

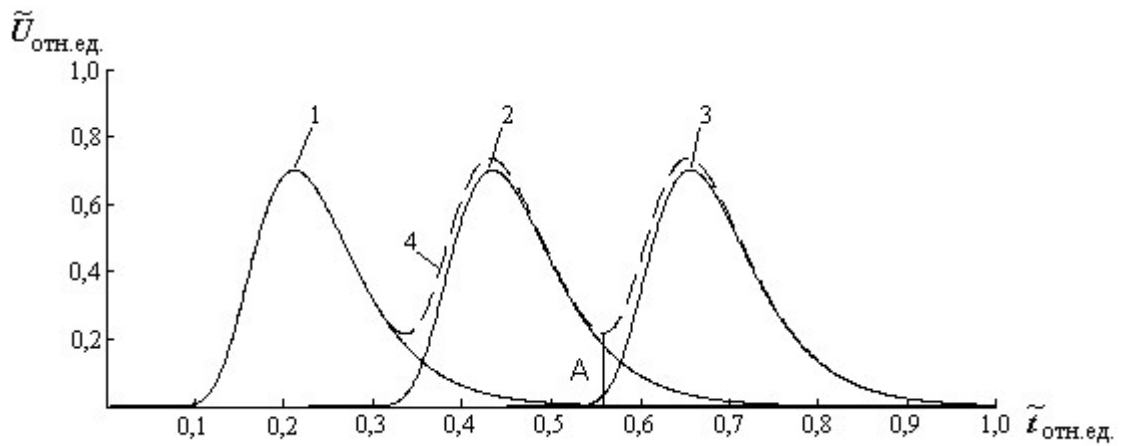
Из результатов проведенного моделирования (рис. 2.5) видно, что при последовательном разрушении вторичных структур II типа результирующий сигнал представляет собой непрерывный сигнал АЭ. При этом, как и в предыдущем случае, с уменьшением времени начала разрушения вторичных структур II типа, наблюдается сжатие сигнала АЭ во времени, а также трансформация его формы.

Из полученного результата (рис. 2.5) видно, что при разрушении вторичных структур II типа на этапе нормального изнашивания, с уменьшением времени начала их разрушения, максимальный уровень амплитуды результирующего сигнала возрастает не значительно. При этом так же, наблюдается уменьшение разброса по амплитуде. С уменьшением величины приращения времени начала разрушения вторичных структур II типа от 0,01 (рис.2.5, а) до 0,008 (рис.2.5, б) среднее значение амплитуды результирующего

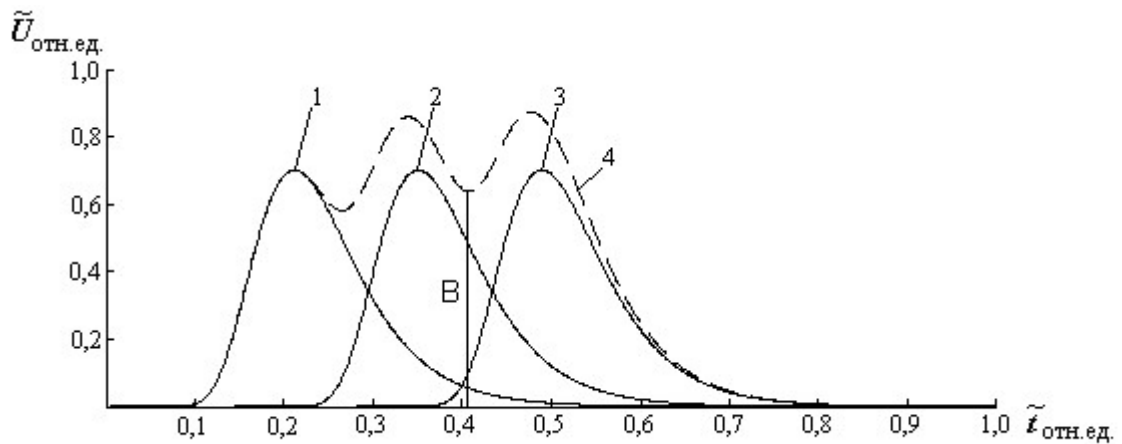
сигнала АЭ возрастает на 23,2%, а при величине времени приращения 0,006 (рис.2.5, в) – на 65,2% по отношению ко времени 0,01. Это обусловлено следующим.

Амплитуда сигнала АЭ при развитии хрупкого разрушения [7] зависит от приложенных напряжений. Чем больше напряжение, тем больше амплитуда результирующего сигнала. При моделировании предполагалось, что приложенные напряжения являются неизменными. Поэтому амплитуды формируемых импульсных сигналов при разрушении каждой последующей структуры II типа являются неизменными. Однако, в соответствии с [7], уровень данной амплитуды должен быть выше, чем при разрушении вторичных структур I типа, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.4, рис. 2.5). В тоже время, за счёт перекрытия импульсов во времени происходит возрастание амплитуды результирующего сигнала. Данное возрастание тем больше, чем больше перекрытие сигналов (рис. 2.6). Однако возрастание амплитуды является медленным (незначительным), что обусловлено тем, что задний фронт сигнала изменяется по экспоненциальному закону с быстрым уменьшением амплитуды. Совершенно очевидно, чем больше перекрытие импульсных сигналов, тем большее значение будет иметь максимальная амплитуда результирующего сигнала.

Уменьшение разброса по амплитуде результирующего сигнала при уменьшении времени разрушения вторичных структур II типа обусловлено перекрытием формируемых импульсных сигналов. При разрушении каждой вторичной структуры II типа формируются импульсные сигналы, задний фронт которых изменяется по экспоненциальному закону. Если перекрытие предыдущего и последующего сигналов не значительны, то нижний уровень результирующего сигнала мал, аналогично, как и в предыдущем случае (А, рис. 2.6 а). Это приводит к большой величине разброса амплитуды в результирующем сигнале. Если перекрытие по времени предыдущего и последующего сигналов возрастает (уменьшение времени начала разрушения вторичных структур II типа), то нижний уровень результирующего сигнала также возрастает,



а



б

Рис. 2.6 Формирование результирующего сигнала АЭ при разрушении вторичных структур I типа с уменьшением времени начала разрушения последующей структуры.

1, 2, 3 – импульсные сигналы формируемые при последовательном разрушении вторичных структур I типа, 4 – результирующий сигнал при последовательном разрушении вторичных структур I типа

аналогично, как и в предыдущем случае (B, рис. 2.6 б). Как следствие, уменьшается разброс по амплитуде результирующего сигнала, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.5).

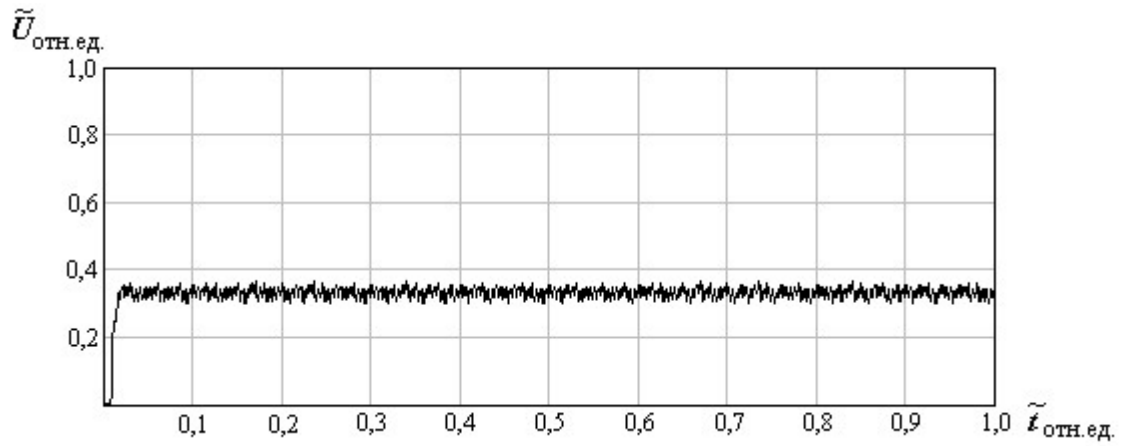
При разрушении вторичных структур I типа на втором этапе моделирования было принято, что время начала разрушения каждой последующей структуры I типа в относительных единицах было неизменным и составляло 0,004, а значение $B=10$. При этом значения пластических деформаций изменялись от $\varepsilon_{0d}=11$ до $\varepsilon_{0d}=15$ (в безразмерных величинах) с шагом приращения, равным 2, т.е. моделирование осуществлялось при

увеличении значения пластической деформации.

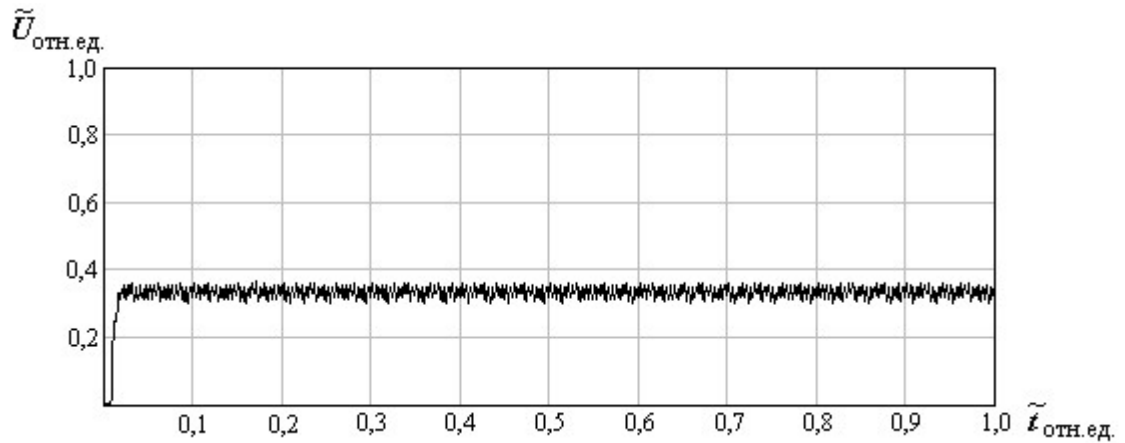
Результаты проведенного моделирования (рис. 2.7) показали, что при последовательном разрушении вторичных структур I типа результирующий сигнал представляет собой непрерывный сигнал АЭ.

Из полученных результатов также видно, что на этапе нормального изнашивания при разрушении вторичных структур I типа для заданных условий моделирования, по сравнению с первым этапом моделирования, амплитуда результирующего сигнала возросла, а её разброс уменьшился. Результат является закономерным, так как мы осуществляли моделирование при меньшем времени начала разрушения вторичных структур I типа. Согласно данным, полученными на первом этапе моделирования, с уменьшением времени разрушения вторичных структур I типа должно происходить увеличение амплитуды результирующего сигнала и уменьшение его разброса. В тоже время при увеличении значения пластической деформации значение амплитуды и её разброса не изменяется. Как показала обработка результатов моделирования при $\varepsilon_{0d}=13$ значение средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, по отношению к $\varepsilon_{0d}=11$, возросло на 0,6% (рис.2.7, б), а при $\varepsilon_{0d}=15$ – на 2% (рис.2.7, в). При этом разброс по амплитуде увеличился, соответственно, на 4,4% и 5,8%. Это обусловлено следующим.

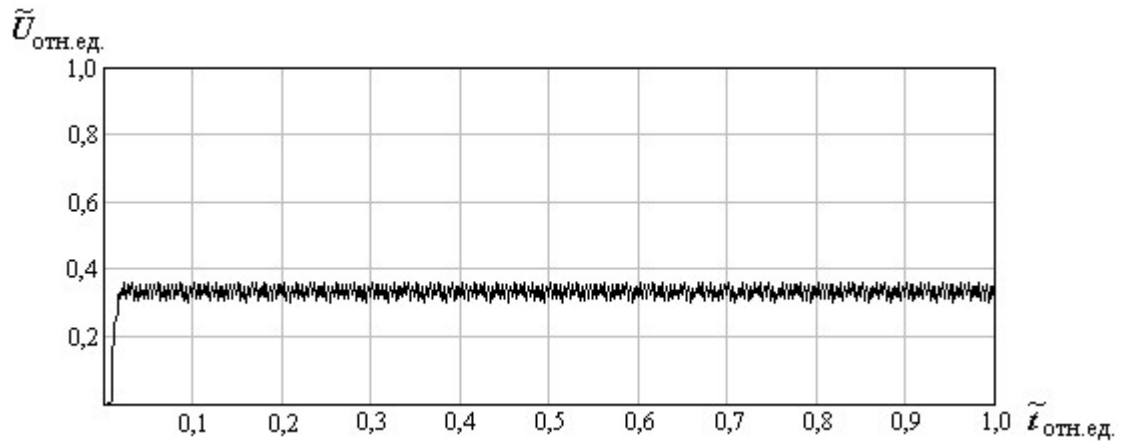
Как было отмечено ранее, амплитуда сигнала АЭ при развитии пластической деформации зависит от количества подвижных дислокаций. Чем больше подвижных дислокаций, тем больше амплитуда сигнала АЭ. При этом количество подвижных дислокаций не зависит от скорости деформирования, а определяется величиной объема материала, вступившего в пластическую деформацию. При моделировании на втором этапе предполагалось, что объемы материала вступающего в пластическую деформацию являются неизменными при разрушении каждой последующей структуры I типа, а изменяется только величина пластической деформации. Так как амплитуда сигналов при разрушении вторичных структур I типа не зависит от пластической деформации, то при изменении значения последней амплитуда результирующего сигнала АЭ



а

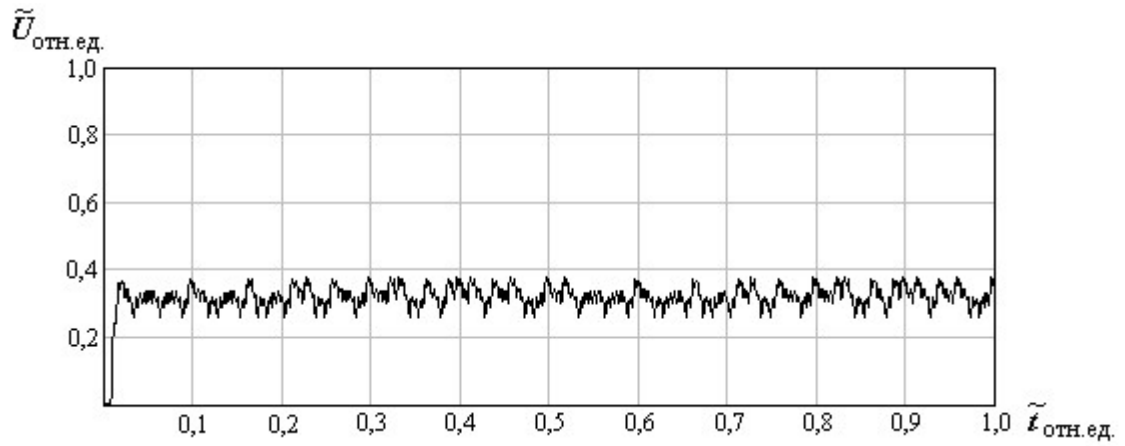


б

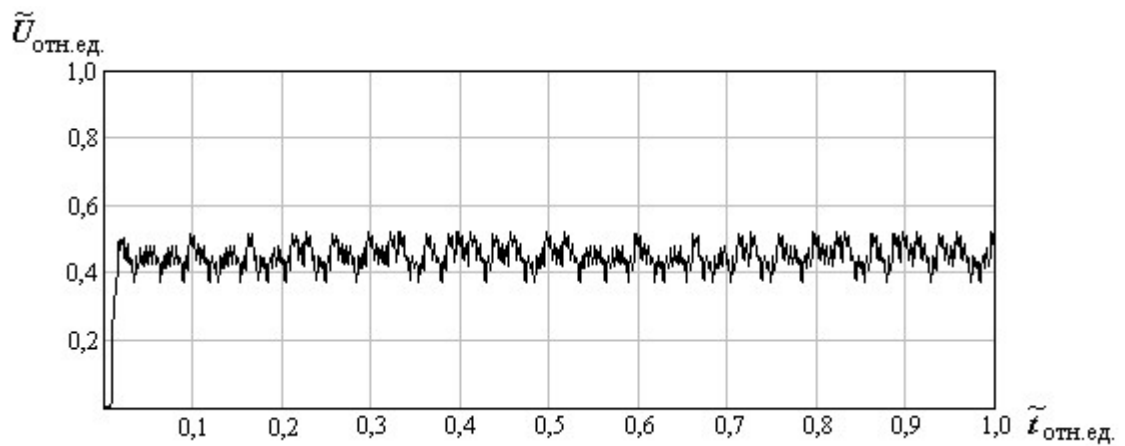


в

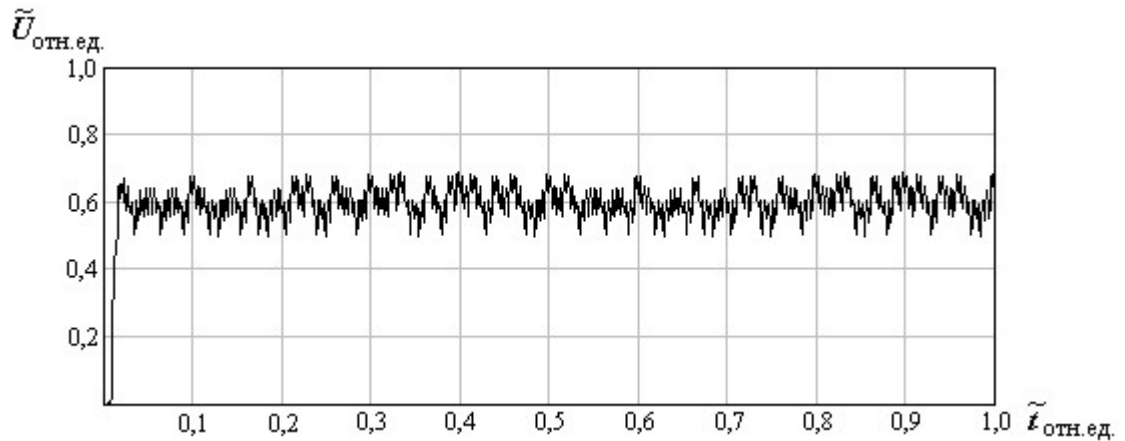
Рис. 2.7 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального изнашивания пары трения при разрушении вторичных структур I типа при условии, что времена начала разрушения каждой последующей структуры I типа в относительных единицах постоянно и равно 0,004, а значения пластической деформаций различны; $B = 10$. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} ; $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Значения пластической деформации: а - $\varepsilon_{0d} = 11$; б - $\varepsilon_{0d} = 13$; в - $\varepsilon_{0d} = 15$



а



б



в

Рис. 2.8 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального изнашивания пары трения при разрушении вторичных структур II типа при условии, что времена начала разрушения каждой последующей структуры II типа в относительных единицах постоянно и равно 0,004, а значения напряжений различны; $b = 10$. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $U_{max} \cdot \tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Значения напряжений:

$$a - \sigma_{0e} = 11; \quad б - \sigma_{0e} = 13; \quad в - \sigma_{0e} = 15$$

должна быть неизменной, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.7).

При разрушении вторичных структур II типа на втором этапе моделирования было принято, что время начала разрушения каждой последующей структуры II типа в относительных единицах было неизменным и составляло 0,004, а значение $b = 10$. При этом значения напряжений изменялись от $\sigma_{0e} = 11$ до $\sigma_{0e} = 15$ (в безразмерных величинах) с шагом приращения, равным 2, т.е. моделирование осуществлялось при увеличении значения напряжения.

Из результатов проведенного моделирования (рис. 2.8) видно, что на этапе нормального изнашивания при разрушении вторичных структур II типа для заданных условий моделирования, по сравнению с первым этапом моделирования, амплитуда результирующего сигнала возросла, а её разброс уменьшился. Полученные результаты объясняются данными, первого этапа моделирования, где показано, что с уменьшением времени начала разрушения вторичных структур II типа происходит увеличение амплитуды результирующего сигнала и уменьшение его разброса. В тоже время при увеличении напряжений значение амплитуды результирующего сигнала и её разброс увеличиваются. Так при $\sigma_{0e} = 13$ значение средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, по отношению к $\sigma_{0e} = 11$, возросло на 41% (рис.2.8, б), а при $\sigma_{0e} = 15$ – на 86% (рис.2.8, в). При этом разброс по амплитуде увеличился, соответственно, на 19% и 36,7%. Это обусловлено следующим.

Как было отмечено ранее, амплитуда сигнала АЭ при развитии хрупкого разрушения зависит от приложенных напряжений. Чем больше напряжение, тем больше амплитуда результирующего сигнала, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.8). В тоже время возрастание напряжений приводит не только к увеличению амплитуды импульсных сигналов АЭ, но и к их сжатию. При сжатии импульсных сигналов, с учетом постоянства времени начала разрушения вторичных структур II типа, уменьшается перекрытие сигналов во времени. Как было показано на первом этапе моделирования,

уменьшение перекрытия сигналов АЭ приводит к уменьшению величины нижнего уровня результирующего сигнала (рис. 2.6). В следствии этого происходит возрастание разброса по амплитуде, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования.

2.3 Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменениях объема материала, вступившего в пластическую деформацию и площади локальных разрушений

При моделировании результирующих сигналов АЭ, проведенных в разделах 2.1, 2.2, исследовалось влияние времени начала разрушения вторичных структур I и II типа, а так же напряжений и деформаций. В тоже время, возрастание напряжений и деформаций, при прочих равных условиях, может быть обусловлено увеличением объема материала, вступившего в пластическую деформацию [51], а так же увеличением площади локальных разрушений. Из данных двух процессов развивающихся в площади контактного взаимодействия опасным и критическим является процесс разрушения (образование и рост микро- и макротрещин, которые могут приводить к мгновенному выходу узла трения из эксплуатации). Развитие пластической деформации является менее критическим событием, так как она происходит с постепенным увеличением объема материала вступающего в пластическую деформацию. Поэтому представляет интерес рассмотрение влияния данных факторов на параметры результирующих сигналов АЭ.

Первым из них является объем материала, вступившего в пластическую деформацию, который, безусловно, будет влиять на параметры результирующего сигнала АЭ. Действительно, при построении моделей сигналов АЭ в условиях динамических видов нагружения [7], а именно трении поверхностных слоев материалов, использованы физические подходы, которые приняты в моделях сигналов АЭ в условиях статических видов нагружения [4, 8]. При этом в выражение для сигнала АЭ, формируемого при разрушении вторичных структур

I типа [7], амплитуда смещения зависящая от физико-механических характеристик материала описывается выражением вида

$$U_{0d} = a_0 M \frac{v_d}{l_0} \delta_d, \quad (2.7)$$

где a_0 - амплитуда импульса одиночного возмущения при движении дислокации (постоянна и не зависит от деформации); l_0 - расстояние между двумя актами излучения одиночной дислокации; v_d - средняя скорость движения дислокаций (считается постоянной); M - параметр распределения плотности подвижных дислокаций; $\delta_d = \int_{t-\delta_1/2}^{t+\delta_1/2} a_1(\tau) d\tau$ - средняя длительность импульса возмущения; $a_1(\tau)$ - функция, которая определяет форму импульса возмущения (является неизменной). Для материала с заданными физико-механическими характеристиками максимальная плотность подвижных дислокаций определяется объемом материала (V_D), вступившего в пластическую деформацию, т.е. $M \sim V_D$. Отсюда следует, что чем больше объем материала, вступившего в пластическую деформацию, тем больше амплитуда сигнала АЭ.

Вторым фактором, который будет иметь влияние на результирующие сигналы АЭ, является площадь разрушения. Действительно, площадь локально образующейся трещины определяется только количеством разрушившихся элементов $S_T = gN_0$, где g - коэффициент пропорциональности, и не зависит от скорости её образования. При этом для сигнала АЭ формируемого при разрушении вторичных структур II типа амплитуда смещения определяется выражением вида

$$U_0 = N_0 c k, \quad (2.8)$$

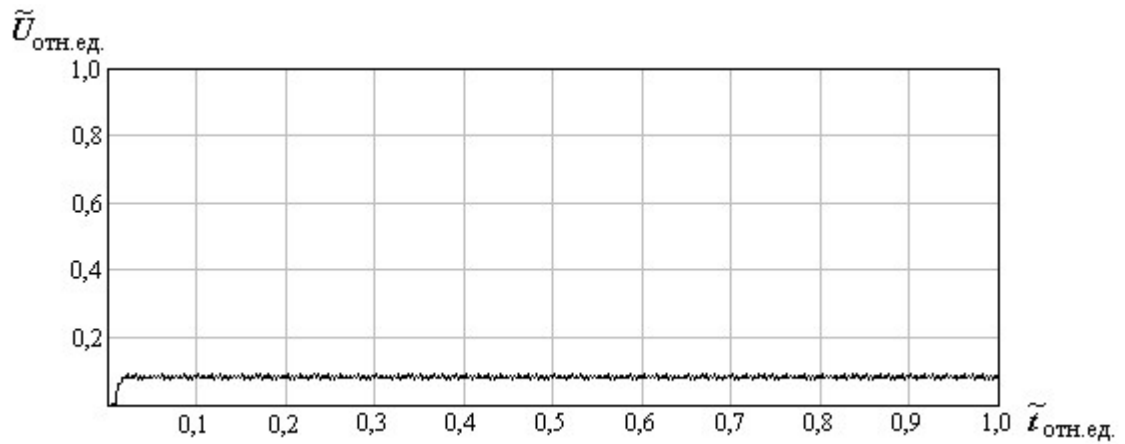
где c - коэффициент, который зависит от физико-механических характеристик материала; k - коэффициент пропорциональности. Отсюда следует, что амплитуда сигнала АЭ при образовании и росте трещин будет пропорциональна её площади $U_{T_{\max}} \sim S_T$. Другими словами, чем больше площадь локально образующейся трещины, тем больше амплитуда сигнала АЭ.

Проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, в соответствии с

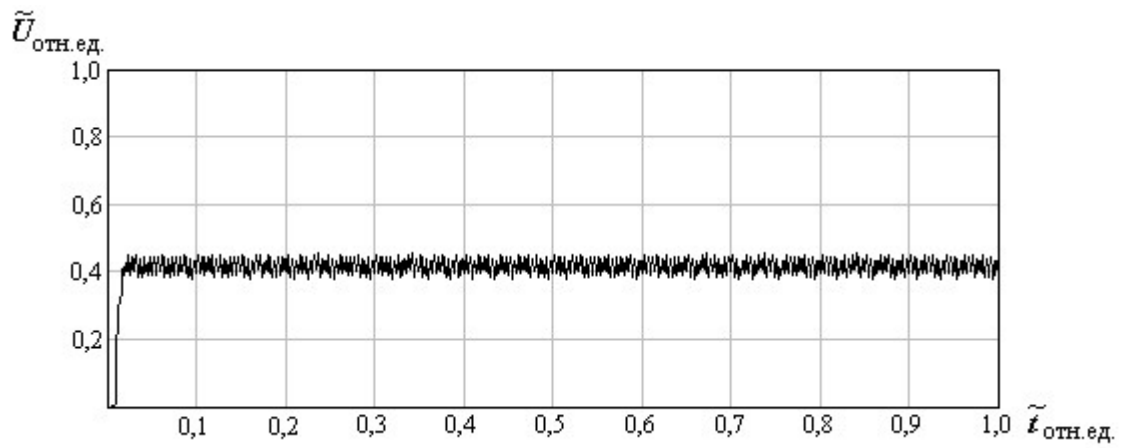
выражениями (2.5) и (2.6) на стадии нормального изнашивания. Анализ будем проводить при постоянстве напряжений и деформаций, постоянстве времени начала разрушения вторичных структур I и II типа, а изменяемыми параметрами будут: объем материала, вступившего в пластическую деформацию и площадь локальных разрушений. Моделирование с реализацией данных условий выполним, как при преобладающем механизме разрушения структур I типа, так и при преобладающем механизме разрушения структур II типа.

Результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, согласно (2.5), (2.6) с учетом изменения объема материала, вступившего в пластическую деформацию и площади локальных разрушений, на стадии нормального изнашивания поверхностных слоев материалов пары трения, показаны на рис.2.9 и рис.2.10 в виде графиков изменения $\tilde{U}(t) = U'(t)/U_{\max}$ в относительных единицах. При построении графиков время нормировано на время действия нагрузки на пару трения, которое составляет величину t_{\max} . На рис.2.9 приведены результирующие сигналы АЭ, которые получены при условии постоянства деформаций, времени начала последовательного разрушения вторичных структур I типа и изменении объема материала, вступающего в пластическую деформацию. На рис.2.10 приведены результирующие сигналы АЭ, которые получены при условии постоянства напряжений, времени начала последовательного разрушения вторичных структур II типа и изменении площади локальных разрушений. Моделирование, как и в предыдущих разделах, осуществлялось по сценарию последовательного разрушения вторичных структур I типа и последовательного разрушению вторичных структур II типа.

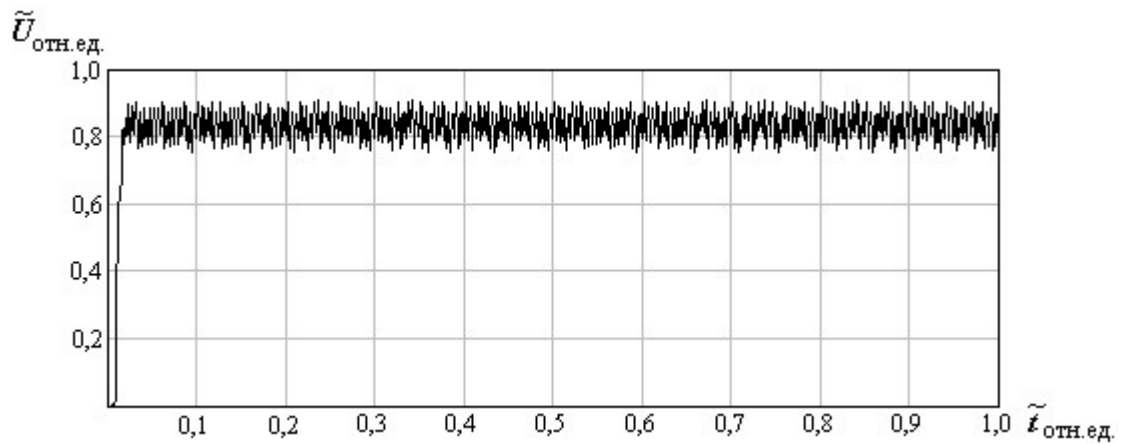
При разрушении вторичных структур I типа было принято, что $\varepsilon_{0d} = 15$, время начала разрушения каждой последующей структуры I типа было неизменным и составляло 0,004 относительных единиц, значение $B = 10$. При этом объем материала V_D , вступающий в пластическую деформацию меняли от 2 до 20 (безразмерных величин), т.е. моделирование осуществляли при возрастании величины объема материала, вступающего в пластическую деформацию.



а

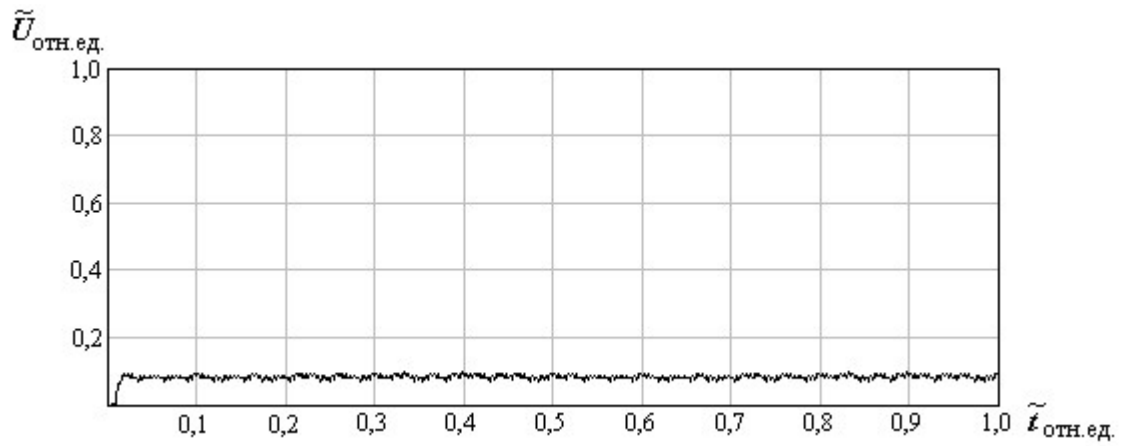


б

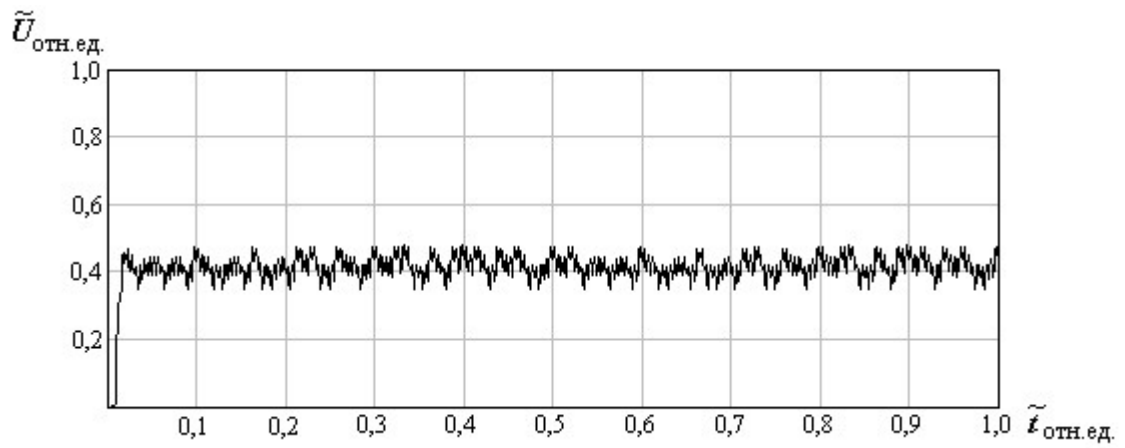


в

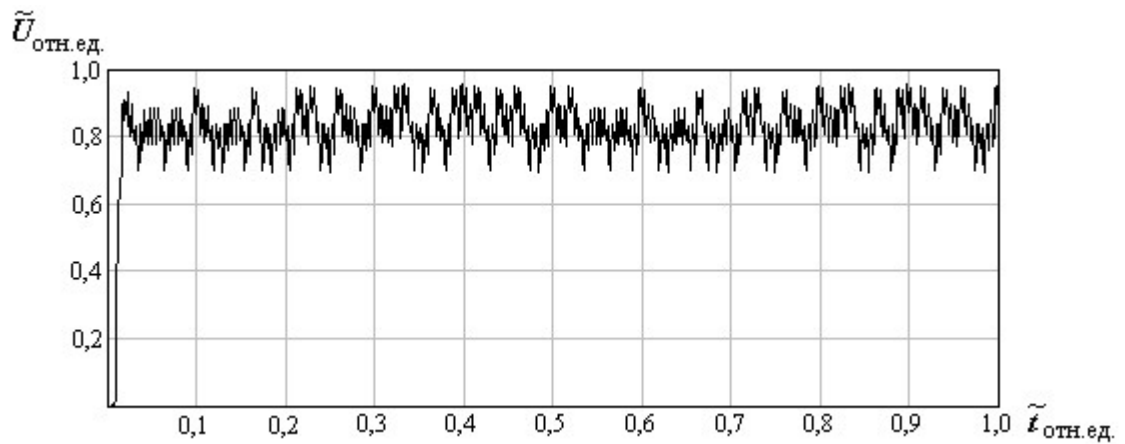
Рис. 2.9 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального изнашивания пары трения при разрушении вторичных структур I типа при условии, что $\varepsilon_{0d} = 15$, время начала разрушения каждой последующей структуры I типа в относительных единицах постоянно и равно 0,004, $B = 10$, а значения объема материала, вступившего в пластическую деформацию различны. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} . $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Значения объема материала, вступившего в пластическую деформацию: а - $V_D = 2$; б - $V_D = 10$; в - $V_D = 20$



а



б



в

Рис. 2.10 Результирующие сигналы АЭ на этапе нормального изнашивания пары трения при разрушении вторичных структур II типа при условии, что $\sigma_{0e} = 15$, время начала разрушения каждой последующей структуры II типа в относительных единицах постоянно и равно 0,004, $b = 10$, а значения площади локально образующейся трещины различны.

$\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} ; $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Значения площади локально образующейся трещины:

$$a - S_T = 2; \quad б - S_T = 10; \quad в - S_T = 20$$

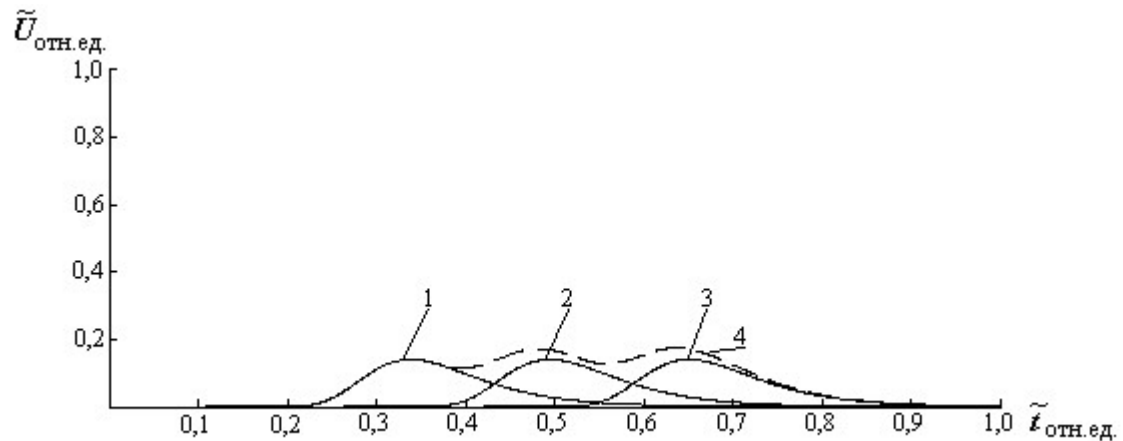
Полученные результаты показали, что при последовательном разрушении вторичных структур I типа результирующий сигнал представляет собой непрерывный сигнал АЭ (рис. 2.9). При этом разрушение вторичных структур I типа для заданных неизменных условий моделирования (времени начала разрушения каждой последующей вторичной структуры I типа и величины пластической деформации), с увеличением объема материала, вступившего в пластическую деформацию, приводит к возрастанию значения амплитуды результирующего сигнала и увеличению её разброса. Это обусловлено следующим.

Как было показано ранее, амплитуда сигнала АЭ зависит от количества подвижных дислокаций, значения которых для заданного объема материала, остается неизменным. При увеличении объема материала, вступающего в пластическую деформацию, происходит возрастание количества подвижных дислокаций, следствием чего является возрастание амплитуды импульсных сигналов АЭ. Естественно, что такое возрастание будет приводить к возрастанию амплитуды результирующего сигнала, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.9).

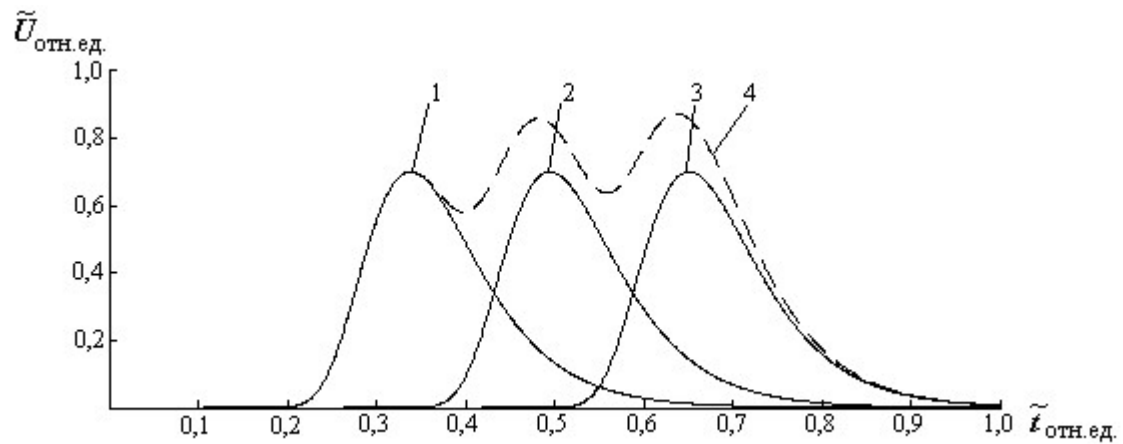
В тоже время с возрастанием амплитуды импульсного сигнала при заданном времени начала разрушения вторичных структур I типа будет увеличиваться их перекрытие во времени (рис. 2.11). Однако, при быстром возрастании верхнего максимального уровня результирующего сигнала АЭ, нижняя величина перекрытия сигналов будет возрастать значительно медленнее. Следствием этого является увеличение разброса по амплитуде результирующего сигнала при увеличении объема материала вступающего в пластическую деформацию, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.9).

При разрушении вторичных структур II типа было принято, что $\sigma_{0e} = 15$, время начала разрушения каждой последующей структуры II типа в относительных единицах было неизменным и составляло 0,004, а значение $B = 10$. При этом площадь локальных разрушений изменялась от $S_T = 2$ до

$S_T = 20$ (в безразмерных величинах), т.е. моделирование осуществлялось при возрастании величины площади локальных разрушений.



a



б

Рис. 2.11 Формирование результирующего сигнала АЭ при разрушении вторичных структур I типа с изменением объемов материала, вступающих в пластическую деформацию. 1, 2, 3 – импульсные сигналы формируемые при последовательном разрушении вторичных структур I типа, 4 – результирующий сигнал при последовательном разрушении вторичных структур I типа. Значения объема материала, вступившего в пластическую деформацию: *a* – $V_D = 2$; *б* – $V_D = 10$.

Полученные результаты показали, что при последовательном разрушении вторичных структур II типа результирующий сигнал представляет собой непрерывный сигнал АЭ (рис. 2.10). При этом разрушение вторичных структур II типа, для заданных неизменных условий моделирования (времени начала разрушения каждой последующей вторичной структуры II типа и напряжений), с увеличением площади локальных разрушений, происходит возрастание значения амплитуды результирующего сигнала и увеличению её разброса. Полученные результаты объясняются следующим образом.

Как было отмечено ранее, амплитуда сигнала АЭ при развитии хрупкого разрушения зависит от приложенного напряжения, значения которого не изменялись. При увеличении площади локальных разрушений, будет происходить возрастание амплитуды импульсных сигналов АЭ. Совершенно очевидно, что такое возрастание будет приводить к возрастанию амплитуды результирующего сигнала, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.10).

Как было отмечено ранее, с возрастанием амплитуды импульсного сигнала при заданном времени начала разрушения вторичных структур II типа будет увеличиваться их перекрытие во времени, подобно как рис. 2.11. Однако при быстром возрастании верхнего максимального уровня результирующего сигнала АЭ, нижняя величина перекрытия будет возрастать значительно медленнее. Следствием этого является увеличение разброса по амплитуде результирующего сигнала при увеличении площади локальных разрушений, что и наблюдается в результатах проведенного моделирования (рис. 2.10).

2.4 Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при переходе к стадии катастрофического разрушения

При разработке моделей и моделировании сигналов АЭ, проведенных в разделах 2.1 – 2.3, мы рассматривали стадию нормального изнашивания пары трения. Это обусловлено тем, что стадия приработки, как известно [51], является неравновесной стадией изнашивания и занимает малую долю в общем временном ресурсе работы пары трения. В тоже время, стадия нормального изнашивания является наиболее продолжительной стадией по времени. Ее характерной особенностью является постоянство значения интенсивности изнашивания $dH/dL_T = \text{const}$ ($dH/dt = \text{const}$), где H – износ; L_T - путь трения; t - время. С физической точки зрения, это означает, что на стадии нормального износа изнашивание происходит при практически неизменных механизмах и напряженно-деформированном состоянии. Так как АЭ является отражением

внутренних процессов, происходящих в структуре материала при их деформировании и разрушении, то, очевидно, что при отмеченных условиях на данной стадии должен наблюдаться стабильный процесс излучения сигналов АЭ с определенными параметрами – некоторое среднее значение амплитуды процесса излучения и определенная величина ее разброса. Подобный результат и был получен при моделировании сигналов АЭ с заданным начальным напряженно-деформированным состоянием, что рассмотрено ранее.

Вместе с тем, в процессе работы пары трения стадия нормального изнашивания переходит в стадию катастрофического изнашивания [51]. Данная стадия характеризуется тем, что происходит возрастание интенсивности изнашивания $dH/dL_T \neq const$. Причем интенсивность изнашивания во времени или от длины пути трения возрастает с ускорением до выхода пары трения из рабочего состояния. Естественно, что увеличение изнашивания при прочих равных условиях, сопровождается, прежде всего, возрастанием напряженно-деформированного состояния пары трения.

Исходя из сказанного, проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, согласно (2.4), при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания. При этом будем считать, что в процессе работы пары трения происходит возрастание напряженно-деформированного состояния без изменения механизмов изнашивания. Другими словами, при увеличении износа происходит разрушение вторичных структур I и II типа с постепенным возрастанием напряженно-деформированного состояния, увеличение которого может быть обусловлено, например, температурным фактором. Результаты такого моделирования показаны на рис.2.15 и рис.2.16 в виде графиков изменения $\tilde{U}(t) = U'(t)/U_{max}$ в относительных единицах. При построении графиков время нормировано на время действия нагрузки на пару трения, которое составляет t_{max} . Параметры σ_{0e} , ε_{0d} , b и B приведены к безразмерным величинам. Моделирование результирующих сигналов АЭ проводилось по выбранному сценарию последовательного разрушения структур I и II типа с заданными временными промежутками (0,004 относительных единиц).

При моделировании рассматривались две основные стадии процесса трения. К ним относятся: стадия нормального изнашивания (1, рис.2.15) и стадия катастрофического изнашивания (2, 3, 4, 5, 6, рис.2.15). На стадии катастрофического изнашивания мы моделировали увеличение величин напряжений и деформаций, которые в пределах некоторого времени оставались неизменными. Так, их значения (в безразмерных величинах) на этапе 2 стадии катастрофического изнашивания, составляли $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$. Значения оставались постоянными на некотором интервале времени (в относительных единицах), который составил $0,5 < t \leq 0,56$. Соответственно, $\sigma_{0e}=5$, $\varepsilon_{0d}=5$ были приняты на 3-м этапе стадии катастрофического изнашивания. Данные значения оставались постоянными в пределах интервала времени $0,6 < t \leq 0,66$ и т.д. (рис.2.15). Плавное возрастание напряжений и деформаций от предыдущих до последующих значений происходило на участках *A*, *B*, *C*, *D*, *E* (рис.2.15). Так плавное возрастание напряжений и деформаций от значений $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$ до значений $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$ происходило на участке *A*, от значений $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$ до значений $\sigma_{0e}=5$, $\varepsilon_{0d}=5$ - происходило на участке *B* и т.д.

Полученные результаты показали (рис.2.15), что как на стадии нормального изнашивания, так и на стадии катастрофического изнашивания результирующий сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал. Другими словами, импульсные сигналы АЭ, формирование которых происходит при условии отдельного разрушения структур I или II типа, трансформируются в непрерывный сигнал АЭ, т. е. процесс изнашивания сопровождается непрерывным излучением сигналов АЭ. При заданном минимальном напряженно-деформированном состоянии, на стадии нормального изнашивания, процесс излучения сигналов АЭ происходит с некоторой средней амплитудой и незначительным её разбросом (1, рис.2.15). Возрастание напряжений и деформаций, приводит к возрастанию средней амплитуды результирующего сигнала АЭ и увеличению ее разброса, что свидетельствует о переходе к стадии катастрофического изнашивания (этапы *A* и 2, рис.2.15). Совершенно очевидно,

что на этапах стадии катастрофического изнашивания $B, 3, C, 4, D, 5, E, 6$, (рис.2.15) наблюдается дальнейшее возрастание, как средней амплитуды результирующего сигнала, так и величины ее разброса.

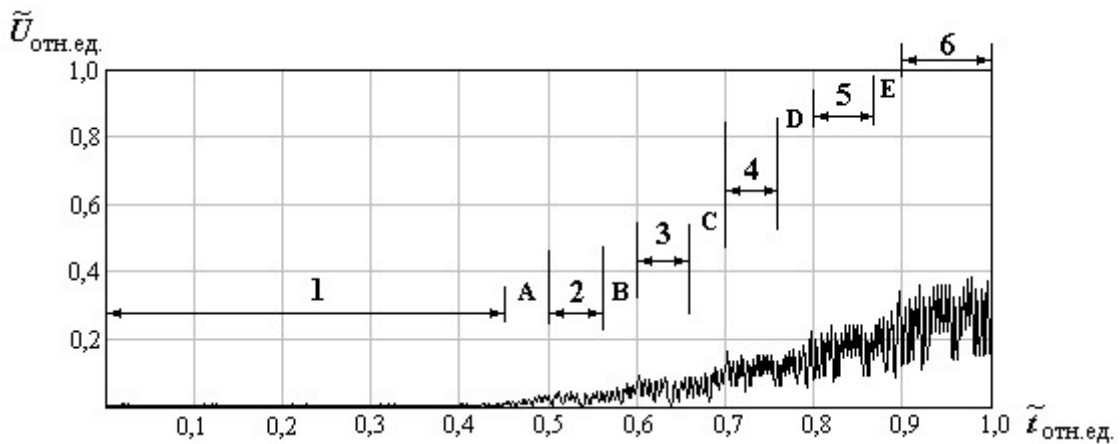


Рис. 2.15 Моделирование результирующего сигнала АЭ на стадии нормального и катастрофического изнашивания при разрушении вторичных структур I и II типа с изменением значений напряжений и деформаций. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $U_{max} \cdot \tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. $b=B=10$. Значения σ_{0e} и ε_{0d} : 1 - $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$; 2 - $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$; 3 - $\sigma_{0e}=5$, $\varepsilon_{0d}=5$; 4 - $\sigma_{0e}=6$, $\varepsilon_{0d}=6$; 5 - $\sigma_{0e}=7$, $\varepsilon_{0d}=7$; 6 - $\sigma_{0e}=8$, $\varepsilon_{0d}=8$. A, B, C, D, E - участки плавного нарастания напряжений и деформаций.

Моделирование результирующего сигнала АЭ при более резком возрастании напряженно-деформированного состояния показано на рис.2.16. Как и в предыдущем случае, моделирование проводилось по выбранному сценарию последовательного разрушения структур I и II типа с определенными временными промежутками. Большие значения напряжений и деформаций были приняты на этапах 3, 4, 5 и 6 (рис.2.16), по отношению к моделированию сигнала АЭ на рис.2.15. На этапе 3 - $\sigma_{0e}=6$, $\varepsilon_{0d}=6$; на этапе 4 - $\sigma_{0e}=8$, $\varepsilon_{0d}=8$; на этапе 5 - $\sigma_{0e}=10$, $\varepsilon_{0d}=10$; на этапе 6 - $\sigma_{0e}=11$, $\varepsilon_{0d}=11$. Как и в предыдущем случае, плавное возрастание напряжений и деформаций происходило от значений $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$ до значений $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$ на участке A , от значений $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$ до значений $\sigma_{0e}=6$, $\varepsilon_{0d}=6$ на участке B - и т.д.

З полученного результата (рис.2.16) явно, что при более резком возрастании напряженно-деформированного состояния наблюдается более резкое увеличение средней амплитуды результирующего сигнала АЭ и увеличение ее разброса.

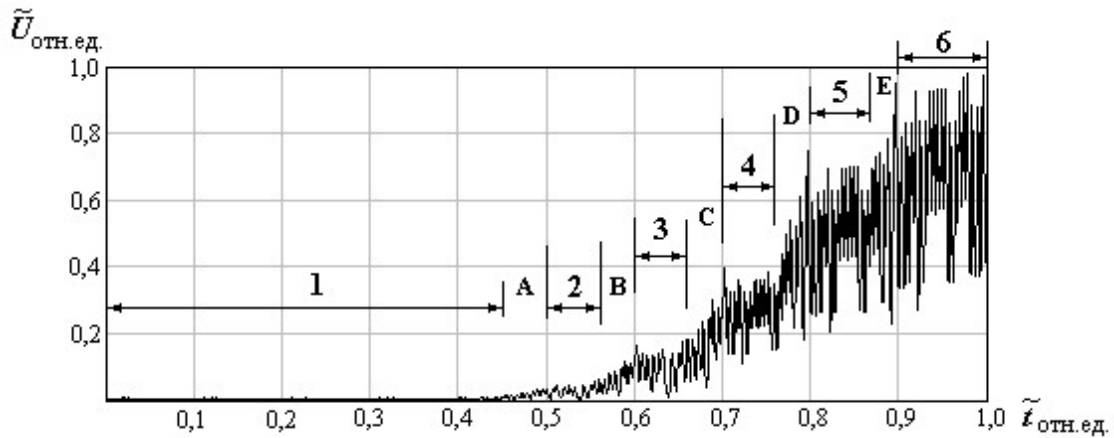


Рис. 2.16 Моделирование результирующего сигнала АЭ на стадии нормального и катастрофического изнашивания при разрушении вторичных структур I и II типа при изменении значений напряжений и деформаций: 1 – стадия нормального изнашивания; 2, 3, 4, 5, 6 – стадия катастрофического изнашивания. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $U_{max} \cdot \tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. $b=B=10$. Значения σ_{0e} и ε_{0d} : 1 - $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$; 2 - $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$; 3 - $\sigma_{0e}=6$, $\varepsilon_{0d}=6$; 4 - $\sigma_{0e}=8$, $\varepsilon_{0d}=8$; 5 - $\sigma_{0e}=10$, $\varepsilon_{0d}=10$; 6 - $\sigma_{0e}=11$, $\varepsilon_{0d}=11$. A, B, C, D, E – участки плавного нарастания напряжений и деформаций.

С использованием математических приложений была проведена обработка и анализ результатов полученных выше (рис.2.15). Результаты показали, что общая зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ в относительных единицах (1, рис.2.17) описывается выражением вида

$$\tilde{U}_{отн.ед.} = Gt^W, \quad (2.9)$$

где $G = 0,3$ и $W = 3,1$.

По стадиям изнашивания, при анализе средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, определено, что на стадии нормального изнашивания (1, рис.2.15), которая находится в диапазоне времен $0 < t \leq 0,44$, среднее значение амплитуды результирующего сигнала АЭ описывается

$$\tilde{U}_{отн.ед.} = A + Bt, \quad (2.10)$$

где $A = 0,004$ и $B = 0,00011$. Соответственно, на стадии катастрофического изнашивания (B, 3, C, 4, D, 5, E, 6 рис.2.15), которая находится в диапазоне времен $0,44 < t \leq 1,0$, среднее значение амплитуды результирующего сигнала АЭ описывается выражением вида

$$\tilde{U}_{отн.ед.} = G_1 t^{W_1}, \quad (2.11)$$

где $G_1 = 0,43$ и $W_1 = 3,22$. При выполнении вычислений для построения

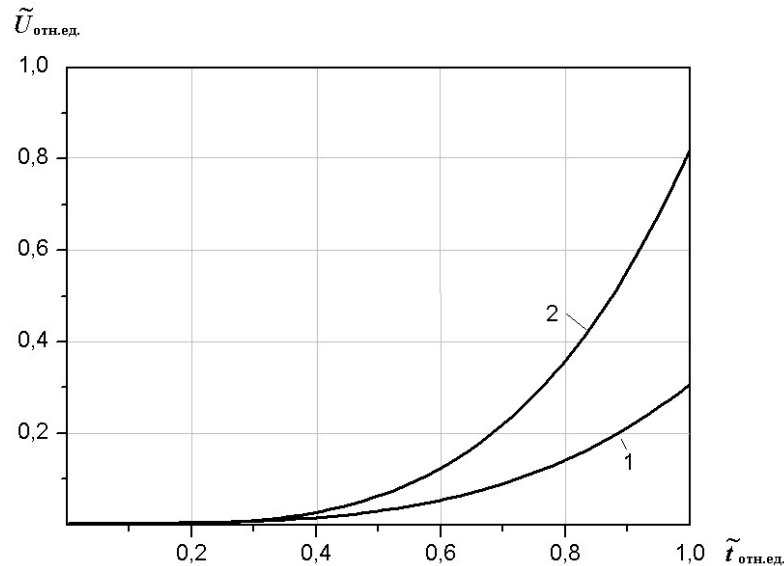


Рис. 2.17 . Зависимости изменения усредненной амплитуды модельных результирующих сигналов АЭ на стадиях нормального и катастрофического изнашивания: 1 - для сигнала, приведенного на рис.2.15; 2 – для сигнала, приведенного на рис.2.16

усредненных аппроксимирующих зависимостей был учтен и разброс по амплитуде результирующего сигнала АЭ.

Полученные результаты показали, что средняя амплитуда результирующего сигнала АЭ на стадии нормального изнашивания описывается линейной зависимостью. В то же время, зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ при переходе к стадии катастрофического изнашивания описывается уже степенной функцией. Совершенно очевидно, что от скорости развития процесса или интенсивности изнашивания будет зависеть показатель степени (W , W_1) аппроксимирующего выражения. Чем выше интенсивность изнашивания, тем большим будет значение показателя степени W , W_1 .

С использованием математических приложений также была проведена обработка и анализ результатов полученных на рис.2.16. Результаты показали, что общая зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ в относительных единицах (2, рис.2.17) описывается выражением вида

$$\tilde{U}_{отн.ед.} = G_2 t^{W_2}, \quad (2.12)$$

где $G_2 = 0,82$ и $W_2 = 4,2$. Так, показатель степени аппроксимирующего выражения возрастает при возрастании напряженно-деформированного состояния.

По стадиям изнашивания, при анализе средней амплитуды результирующего

сигнала АЭ, было определено, что на стадии нормального изнашивания (этап 1, рис.2.16), которая находится в диапазоне времен $0 < t \leq 0,44$, среднее значение амплитуды результирующего сигнала АЭ описывается выражением

$$\tilde{U}_{\text{отн.ед.}} = A_1 + B_1 t, \quad (2.13)$$

где $A_1 = 0,004$ и $B_1 = 0,00011$. Что совпадает с ранее полученным результатом.

Среднее значение амплитуды результирующего сигнала АЭ на стадии катастрофического изнашивания ($B, 3, C, 4, D, 5, E, 6$, рис.2.16), которая находится в диапазоне времен $0,44 < t \leq 1,0$, описывается выражением вида

$$\tilde{U}_{\text{отн.ед.}} = G_3 t^{W_3},$$

где $G_3 = 0,82$ и $W_3 = 4,4$.

Проведенные исследования показали, что для стадии нормального изнашивания, значение средней амплитуды и ее разброс определяются величиной напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев материалов пары трения. При переходе к стадии катастрофического изнашивания, происходит возрастание, как средней амплитуды сигналов, так и величины их разброса. Подобная закономерность изменения процесса излучения и параметров сигналов АЭ определяется изменением напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев материалов. Чем выше уровень напряжений и деформаций, тем более резкое возрастание средней амплитуды сигналов АЭ и величины ее разброса. Полученный результат является важным, с точки зрения определения начальной стадии катастрофического износа для предотвращения разрушения пары трения.

2.5 Моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменениях объема материала, вступившего в пластическую деформацию при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания

Моделирование сигналов АЭ с учетом кинетики протекания процессов разрушения на стадии нормального и катастрофического изнашивания, проведенные в разделе 2.4, проводилось при условии возрастания напряжений и

деформаций в поверхностных слоях материала. При этом основывались на том, что переход к стадии катастрофического изнашивания характеризуется возрастанием интенсивности изнашивания. Причем интенсивность изнашивания во времени или от длины пути трения возрастает с ускорением до выхода пары трения из рабочего состояния. В тоже время, на стадии катастрофического изнашивания возрастание напряжений и деформаций, при прочих равных условиях, может быть обусловлено увеличением объема материала, вступившего в пластическую деформацию, что было описано ранее в разделе 2.3. С точки зрения технической диагностики, нас интересует, прежде всего, пластическая деформация, так как рост и образование макротрещин, может приводить к мгновенному выходу узла трения из эксплуатации (его разрушению). Однако, даже при хрупком разрушении процессу образования трещины предшествуют необратимые изменения, связанные с пластической деформацией. В тоже время, постепенное развитие пластической деформации или постепенное увеличение объема материала, вступившего в пластическую деформацию, является опасным, но менее критическим фактором. Поэтому важное значение имеет определение момента перехода пары трения от стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания для предотвращения разрушения пары трения.

Проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, в соответствии с выражениями (2.5) и (2.6), а также с учетом механизмов описанных в разделах 2.3, 2.4, на стадии нормального и катастрофического изнашивания при условии изменения, как напряженно-деформированного состояния (σ_{0e} , ε_{0d}), так и объема материала (V_D) вступившего в пластическую деформацию. Анализ будем проводить при возрастании, как напряжений и деформаций, так и объема материала, вступившего в пластическую деформацию, при разрушении вторичных структур I и II типа. Моделирование результирующих сигналов АЭ будем проводить по некоторому выбранному сценарию последовательного разрушения вторичных структур I и II типа при постоянстве времени начала разрушения вторичных структур I и II типа (0,004 относительных единиц).

Результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, согласно (2.4), при заданных условиях, при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания поверхностных слоев материалов, показаны на рис.2.18 и рис.2.19 в виде графиков изменения $\tilde{U}(t) = U'(t)/U_{\max}$ в относительных единицах. При построении графиков время нормировано на время действия нагрузки на пару трения, которое составляет величину t_{\max} . Параметры σ_{0e} , ε_{0d} , b и B приведены к безразмерным величинам. При этом считалось, что объем V_D материала, вступившего в пластическую деформацию равен $V_D=1$ в безразмерных величинах.

При моделировании были рассмотрены две стадии процесса трения – стадия нормального изнашивания (1, рис.2.18) при некоторых начальных напряжениях σ_{0e} и деформациях ε_{0d} и стадия катастрофического изнашивания (2, 3, 4, 5, 6, рис.2.18). На стадии катастрофического изнашивания происходило возрастание напряжений и деформаций, которые в пределах некоторого времени оставались неизменными. Их значения (в безразмерных величинах) на этапе 2 стадии катастрофического изнашивания составляли $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$, и оставались постоянными на интервале времени $0,5 < t \leq 0,57$ (в относительных единицах). На этапе 3, были приняты $\sigma_{0e}=3$, $\varepsilon_{0d}=3$ в пределах интервала времени $0,6 < t \leq 0,67$ и т.д. (рис.2.18). Плавное возрастание напряжений и деформаций от предыдущих до последующих значений происходило на участках A, B, C, D, E (рис.2.18). Так, плавное возрастание напряжений и деформаций от значений $\sigma_{0e}=1$, $\varepsilon_{0d}=1$ до значений $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$ происходило на участке A , от значений $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$ до значений $\sigma_{0e}=3$, $\varepsilon_{0d}=3$ - происходило на участке B и т.д.

Из полученных результатов видно, что при последовательном разрушении вторичных структур I или II типа результирующий сигнал представляет собой непрерывный сигнал АЭ (рис. 2.18). При заданном минимальном напряженно-деформированном состоянии, на стадии нормального изнашивания, процесс излучения сигналов АЭ происходит с некоторой средней амплитудой и незначительным её разбросом (1, рис.2.18). Возрастание напряжений и

деформаций, приводит к возрастанию средней амплитуды результирующего сигнала АЭ и увеличению ее разброса, что свидетельствует о переходе к стадии катастрофического изнашивания (этапы *A* и 2, рис.2.18). В дальнейшем, на этапах стадии катастрофического изнашивания *B*, 3, *C*, 4, *D*, 5, *E*, 6, (рис.2.18) наблюдается возрастание, как средней амплитуды результирующего сигнала, так и величины ее разброса.

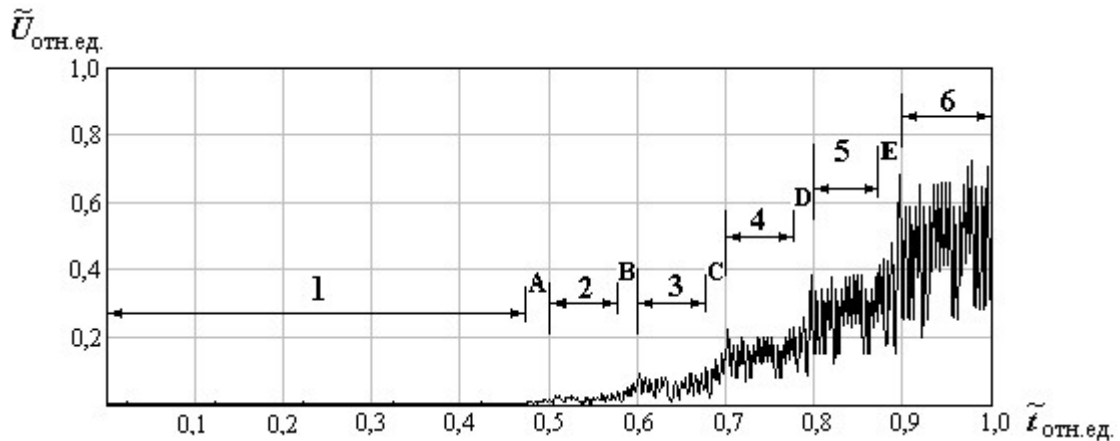


Рис. 2.18 Результирующий сигнал АЭ на стадии нормального и катастрофического изнашивания при разрушении вторичных структур I и II типа в зависимости от величины значений напряжений и деформаций. $b = B = 10$, а значения площади локально образующейся трещины различны. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} . $\tilde{t}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Значения σ_{0e} и ε_{0d} : 1 - $\sigma_{0e}=1$, $\varepsilon_{0d}=1$; 2 - $\sigma_{0e}=2$, $\varepsilon_{0d}=2$; 3 - $\sigma_{0e}=3$, $\varepsilon_{0d}=3$; 4 - $\sigma_{0e}=4$, $\varepsilon_{0d}=4$; 5 - $\sigma_{0e}=5$, $\varepsilon_{0d}=5$; 6 - $\sigma_{0e}=6$, $\varepsilon_{0d}=6$. Объем V_D материала, вступившего в пластическую деформацию, имеет единичную безразмерную величину, $V_D=1$. *A*, *B*, *C*, *D*, *E* – участки плавного нарастания напряжений и деформаций.

При моделировании результирующего сигнала АЭ на рис.2.18 считалось, что процесс трения на стадии катастрофического изнашивания происходит без изменения объема материала, вступившего в пластическую деформацию, т.е. $V_D=1$ (в безразмерных величинах). Однако, как отмечено выше, в реальных условиях на стадии катастрофического изнашивания поверхностных слоев материалов пары трения может происходить постепенное увеличение объема материала, вступившего в пластическую деформацию. Это означает, что с увеличением объема материала, вступившего в пластическую деформацию, согласно (2.5), должна возрасти и амплитуда сигнала АЭ, при разрушении вторичных структур I типа. С другой стороны, возрастание амплитуды импульсных сигналов АЭ, должно приводить к уменьшению разброса амплитуд

результатирующего сигнала АЭ.

Проведем моделирование результирующего сигнала АЭ при увеличении объема материала V_D , вступившего в пластическую деформацию, при тех же самых условиях, что и для сигнала, показанного на рис.2.18. Считалось, что значения объема материала, вступившего в пластическую деформацию, на этапах 1, 2 и 3 было принято $V_D=1$, а на этапах 4, 5 и 6, соответственно, $V_D=3$, $V_D=10$, $V_D=20$. Результат такого моделирования показан на рис.2.19.

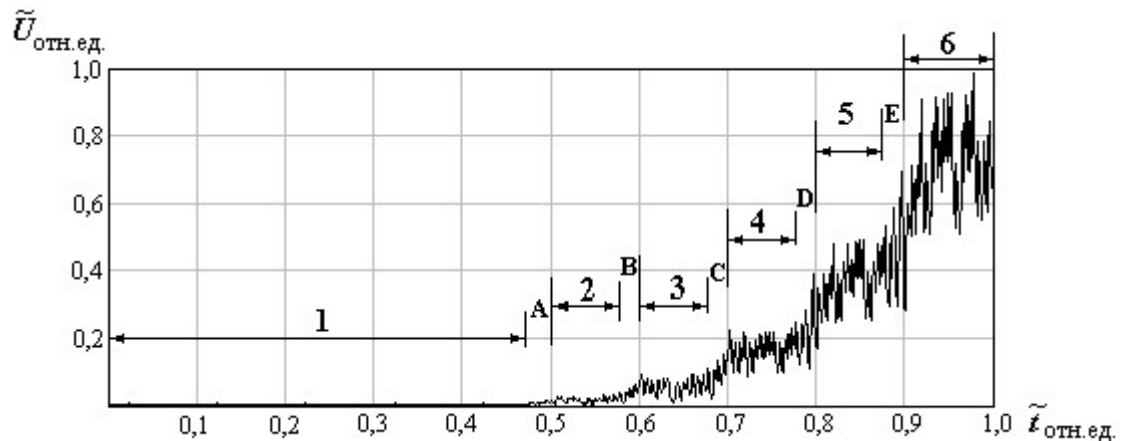


Рис. 2.19 Результирующий сигнал АЭ на стадии нормального и катастрофического изнашивания при разрушении вторичных структур I и II типа в зависимости от величины значений напряжений и деформаций: 1 – стадия нормального изнашивания; 2, 3, 4, 5, 6 – стадия катастрофического изнашивания. $b = B = 10$, а значения площади локально образующейся трещины различны. $\tilde{U}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на U_{max} ; $\tilde{\epsilon}_{отн.ед.}$ - нормированное значение на $t_{max} = const$. Значения σ_{0e} и ϵ_{0d} : 1 - $\sigma_{0e}=1$, $\epsilon_{0d}=1$; 2 - $\sigma_{0e}=2$, $\epsilon_{0d}=2$; 3 - $\sigma_{0e}=3$, $\epsilon_{0d}=3$; 4 - $\sigma_{0e}=4$, $\epsilon_{0d}=4$; 5 - $\sigma_{0e}=5$, $\epsilon_{0d}=5$; 6 - $\sigma_{0e}=6$, $\epsilon_{0d}=6$. Объем V_D материала, вступившего в пластическую деформацию, в безразмерных величинах: этапы 1, 2 и 3 - $V_D=1$; этап 4 - $V_D=3$; этап 5 - $V_D=10$; этап 6 - $V_D=20$. A, B, C, D, E – участки плавного нарастания напряжений и деформаций.

Полученные результаты показали, что при последовательном разрушении вторичных структур I или II типа результирующий сигнал также представляет собой непрерывный сигнал АЭ (рис. 2.19). При заданном минимальном напряженно-деформированном состоянии, на стадии нормального изнашивания, процесс излучения сигналов АЭ происходит с некоторой средней амплитудой и незначительным её разбросом (1, рис.2.19). Возрастание напряжений и деформаций, приводит к возрастанию средней амплитуды результирующего сигнала АЭ и увеличению её разброса, что свидетельствует о переходе к стадии катастрофического изнашивания (этапы A и 2, рис.2.19). На этапах B, 3, C, 4, D, 5,

E , 6 стадии катастрофического изнашивания, (рис.2.19) наблюдается дальнейшее возрастание средней амплитуды результирующего сигнала. Однако, величина ее разброса, по сравнению с предыдущим результатом (рис.2.18) увеличивается значительно медленнее.

При одинаковых условиях напряженно-деформированного состояния амплитуда сигналов АЭ от разрушения вторичных структур II типа имеет большую величину, чем от разрушения вторичных структур I типа [7]. Поэтому верхний уровень амплитуды результирующего сигнала в первую очередь, будет определяться амплитудой сигнала вторичной структуры II типа, а нижний уровень – в основном амплитудой сигнала вторичной структуры I типа. Если начальные напряжения и деформации имеют минимальную величину, то амплитуды сигналов АЭ при разрушении обеих структур имеют не значительные различия. В результате наложения сигналов их вклад в амплитуду результирующего сигнала будет соизмерим. Поэтому разброс амплитуды результирующего сигнала будет иметь минимальное значение, что и наблюдается в результатах моделирования (этап 1, рис.2.18 рис.2.19). С увеличением напряжений и деформаций разница в амплитуде сигналов АЭ при разрушении вторичных структур I и II типа возрастает, т.е. амплитуда для сигнала от структуры II типа возрастает, а от структуры I типа, согласно [7], не изменяется. Поэтому вклад амплитуды сигнала от разрушения вторичной структуры I типа в результирующий сигнал АЭ уменьшается. Это приводит к возрастанию величины разброса амплитуды результирующего сигнала АЭ (рис.2.18, рис.2.19).

В тоже время, с увеличением объема материала V_D , вступившего в пластическую деформацию, происходит возрастание амплитуды импульсных сигналов АЭ от разрушения вторичных структур I типа, что было показано в разделе 2.3. Совершенно очевидно, что такое увеличение амплитуды будет приводить к возрастанию ее вклада в результирующий сигнал АЭ, т.е. в увеличение средней амплитуды и нижнего уровня амплитуды результирующего сигнала. При таких условиях, должно происходить уменьшение разброса амплитуды результирующего сигнала, что и наблюдается в результатах

проведенного моделирования, как это видно на этапах 4, 5 и 6 (рис.2.19).

С использованием математических приложений была проведена обработка и анализ результатов полученных выше (рис.2.18, рис.2.19). Результаты показали, что общая зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ в относительных единицах, соответственно (1, рис.2.20, 2, рис.2.20) описывается выражением вида (2.9), где для сигнала рис.2.18 (1, рис.2.20) $G=0,58$ и $W=4,3$, а для сигнала рис.2.19 (2, рис.2.20) $G=0,88$ и $W=5,3$.

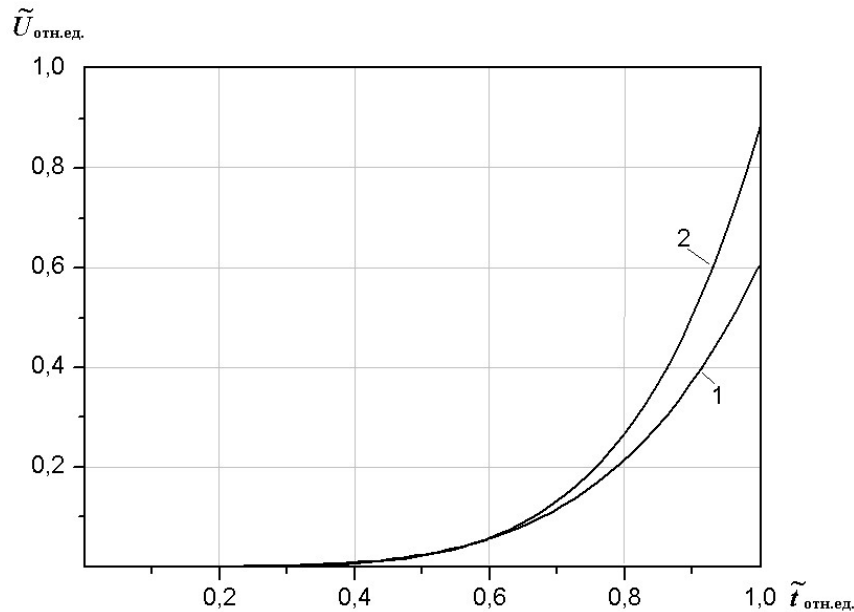


Рис. 2.20 . Зависимости изменения усредненной амплитуды модельных результирующих сигналов АЭ на стадиях нормального и катастрофического изнашивания: 1 - для сигнала, приведенного на рис.2.18; 2 – для сигнала, приведенного на рис.2.19

При анализе средней амплитуды результирующих сигналов АЭ по стадиям изнашивания, также определено, что в диапазоне времен $0 < t \leq 0,47$ на стадии нормального изнашивания (этапы 1, рис.2.18, рис.2.19), среднее значение амплитуды результирующих сигналов АЭ описывается выражением (2.10), где $A=0,004$ и $B=0,00003$ для двух сигналов. В диапазоне времен $0,47 < t \leq 1,0$ на стадиях катастрофического изнашивания (этапы 2, 3, 4, 5, 6, рис.2.18 и рис.2.19), средние значения амплитуд результирующих сигналов АЭ описываются выражением вида (2.9), где значения коэффициентов G и W практически одинаковы.

Выводы по второй главе

1. Разработана модель результирующего сигнала АЭ, которая базируется на современных представлениях трибологии о возникновении и протекании в локальных областях материала процессов разрушений и пластических деформаций. Показано, что форма и параметры сигналов АЭ определяются напряженно-деформированным состоянием поверхностей контактного взаимодействия, их физико-механических характеристик, а так же интенсивности процессов изнашивания.
2. При моделировании сигналов АЭ на этапе нормального изнашивания пар трения определено, что увеличение напряжений контактного взаимодействия пары трения при разрушении вторичных структур II типа приводит к увеличению амплитуды результирующего сигнала АЭ и её разброса. Однако, с уменьшением времени начала разрушения вторичных структур II типа, наблюдается уменьшение разброса по амплитуде, с незначительным возрастанием амплитуды. Возрастание величины деформаций при разрушении вторичных структур I типа практически не влияет на изменение параметров результирующего сигнала АЭ. При этом, с уменьшением времени начала разрушения вторичных структур I типа, наблюдается уменьшение разброса по амплитуде, а максимальный уровень амплитуды результирующего сигнала возрастает не значительно.
3. Показано, что увеличение объема материала, вступившего в пластическую деформацию, приводит к возрастанию значения амплитуды результирующего сигнала и увеличению её разброса. Так же, установлено, что с увеличением площади локальных разрушений происходит возрастание значения амплитуды результирующего сигнала и увеличение её разброса.
4. При моделировании определено, что при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания, который сопровождается возрастанием напряженно-деформированного состояния, происходит увеличение уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и её разброса. При этом, происходит изменение зависимости описывающей усредненную амплитуду результирующего сигнала АЭ, т.е. переход от линейной аппроксимирующей функции к степенной.

Показатель степени аппроксимирующей функции зависит от интенсивности разрушения поверхностных слоёв пары трения.

5. Установлено, что величина объема материала, вступившего в пластическую деформацию, является фактором, влияющим на изменение параметров результирующего сигнала АЭ. При этом на стадии катастрофического изнашивания увеличение объема материала, вступившего в пластическую деформацию, приводит к возрастанию усредненной амплитуды результирующего сигнала АЭ и уменьшению её разброса, а также увеличению показателя степени аппроксимирующего выражения.

6. Полученные теоретические результаты изменения параметров и формы сигналов АЭ имеют хорошее согласование с экспериментальными данными.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

3.1 Экспериментальный стенд при механических нагрузениях

В современной механике под трением и изнашиванием понимают широкий круг физико-химических процессов, вызываемых взаимодействием соприкасающихся поверхностей фрикционного контакта твердых тел при относительном их перемещении. В технике трение является инициатором деформационных, динамических, тепловых, акустических, электрических, адгезионных и других процессов, определяющих ресурс работоспособности узлов трения, их энергетику и эффективность [17].

При решении комплекса задач, связанных с исследованием процессов в структурах контактных слоёв фрикционных узлов различных изделий возникает необходимость получения объективной количественной информации о состоянии поверхностей трения в реальном масштабе времени. В число таких задач входят: определение степени износа трущихся поверхностей; оптимизация параметров микро- и макрогеометрии рабочих поверхностей деталей, контроль и прогнозирование их технического состояния [73]. Очевидно, что эффективность решения таких задач определяется количеством и качеством информации, полученной при диагностике технического состояния узлов трения. Для эффективной диагностики технического состояния узлов трения в процессе эксплуатации необходимо использовать показатели, которые позволяют определять скорость изнашивания и переход к различным механизмам изнашивания, в том числе и к разрушению.

Для получение новой информации о процессах, происходящих на границе контактного взаимодействия, аппаратура должна обеспечивать измерение определенных количественных характеристик для получения связи с параметрами времени с целью оценки условий проведения испытаний, проведение статистической обработки зарегистрированных сигналов для

проведения более подробной диагностики механизмов излучения и оценки значимости сигналов и т. д.

На это время существует большое количество разнообразных информационно-измерительных систем трибодиагностики, которые обычно используют в качестве исследуемого параметра какую-нибудь отдельную физическую величину.

В то же время, каждый отдельный из регистрируемых информационно-измерительной системой параметров только частично характеризует различные стороны сложных процессов и явлений, которые имеют место в зоне фрикционного контакта, и не один из них не может давать исчерпывающую информацию о состоянии объекта. В связи с этим, одним из перспективных направлений на данное время есть создание компьютеризированных многоканальных диагностических комплексов, то есть информационно-измерительных систем, которые направлены на сбор информации о процессах происходящих на границе контактного взаимодействия при работе узлов трения и дальнейшую ее цифровую обработку [73].

Преимущества этого подхода очевидны. Одновременное измерение ряда параметров, которые характеризуют исследуемую систему с различных сторон и компьютерная обработка информации позволяют наиболее полно и достоверно оценивать состояние объекта [91]. При этом преимущества разных методов при их общем использовании позволяют обеспечить формирование качественно новой информации, которая не может быть получена при отдельном использовании каждого из них.

Однако как показал опыт создания многоканальных информационно-измерительных систем, актуальными задачами являются определение диагностических параметров на основе математического моделирования процессов изнашивания узлов трения и широкого круга экспериментальных исследований; разработка методологии оптимизации архитектуры информационно-измерительных систем; обеспечение возможности увеличения числа каналов измерения, с использованием стандартных специализированных

микропроцессорных модулей. Диагностические параметры, которые используются при проведении исследований, диагностировании, контроле и прогнозировании состояния узлов трения, разделяются на три группы: электрические, неэлектрические, акустические. Совершенно очевидно, что одновременное измерение ряда диагностических параметров, характеризующих исследуемый объект, и соответствующая математическая обработка получаемой информации позволяют разрабатывать критерии и проводить достоверную оценку его состояния. Поэтому, создание комплексных информационно-измерительных систем представляет значительный интерес с точки зрения, получения новой информации о процессах ведущих к потере несущей способности материалов изделий.

Рассмотрим автоматизированный стенд для исследований и испытаний узлов трения, который позволяет проводить фундаментальные и прикладные исследования процессов происходящих на поверхностях контактного взаимодействия в процессе их износа, разработку методов контроля и прогнозирования технического состояния машин и механизмов на всех этапах их жизненного цикла, структурная схема стенда представлена на рис. 3.1. Стенд реализует кинематические схемы контакта, которые принадлежат к максимально возможному количеству разных групп.

Представленный стенд предназначен для проведения испытаний на трение и износ сложных триботехнических систем, проведения диагностирования, контроля и прогнозирования технического состояния узлов трения.

Согласно требуемым функциональным возможностям информационно-измерительная система включает в себя несколько модулей и функциональных блоков. В свою очередь модули и блоки формируют следующие измерительные каналы (рис. 3.1):

- канал измерения и регистрации АЭ;
- канал измерения и регистрации момента трения;

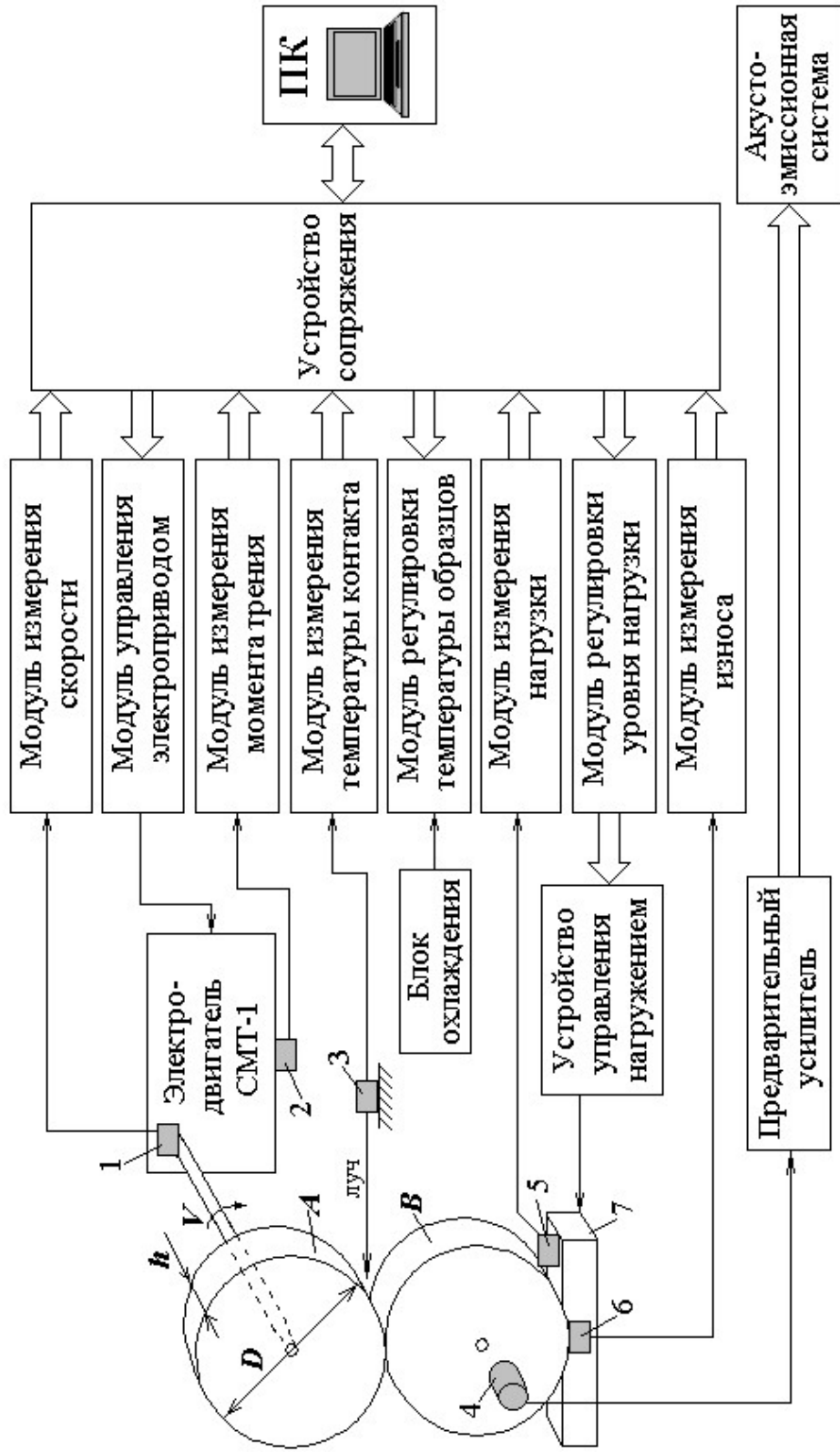


Рис. 3.1 Структурная схема установки для пары трения в виде кинематической схемы "ролик-ролик" ("диск-диск"): *A* – неподвижный образец; *B* – подвижный образец; *D*, *h* – соответственно, диаметр и толщина образцов; 1 – датчик скорости; 2 – датчик момента; 3 – энкодер М600 (инфракрасный датчик измерения температуры); 4 – датчик акустической эмиссии; 5 – тензодатчик *Z6*; 6 – датчик износа; 7 – прижимное устройство.

- канал измерения и регистрации износа пар трения;
- канал измерения и регистрации температуры зоны трения;
- канал измерения, регистрации и контроля частоты вращения;
- канал измерения, регистрации и контроля эксплуатационной нагрузки.

Разработанный стенд для испытаний на трение и износ использует универсальную машину трения типа СМТ-1. Объектом исследования являются образцы пар трения (фрикционный узел) с реализацией кинематической схемы “ролик-ролик” (“диск-диск”) (рис.3.2). Исследуемый фрикционный узел не имеет непосредственного контакта с измерительными цепями. В соответствии с выбранной кинематической схемой “ролик-ролик”, один из образцов пары трения являлся неподвижным, а другой вращался на шпинделе машины СМТ-1 (соответственно *B, A*, рис.3.1).



Рис. 3.2 Устройство приема сигналов для кинематической схемы испытаний “ролик – ролик”

Рассмотрим принцип действия стенда при проведении экспериментальных исследований фрикционных узлов в процессе трения.

С помощью специальных датчиков установленных на стенде и специальных модулей возможно получение информации о таких параметрах как, момент трения, скорость вращения, температура контакта, величина износа, величина контактных напряжений, а также проводить регистрацию сигналов АЭ. При этом, посредством устройства сопряжения все функциональные модули связаны с ПК, что дает возможность контролировать текущие значения и поддерживать необходимый уровень величин задаваемых в ПК.

Канал измерения и регистрации температуры зоны контакта образцов

построен на основе бесконтактного способа измерения температуры с использованием энкодера – инфракрасного датчика измерения температуры 3. Датчик по общему информационному каналу связан с ПК, который осуществляет периодический съём и обработку информации. Модуль регулировки температуры имеет двустороннюю связь с ПК для поддержания требуемой температуры в зоне контакта и контроля текущего её значения. При необходимости из ПК поступает команда на блок охлаждения зоны котакта.

Канал измерения, регистрации и контроля частоты вращения предназначен для получения информации о текущем значении скорости вращения и поддержания заданной компьютером частоты вращения. Датчик скорости 1 установленный на главном электроприводе машины СМТ-1 передает полученную информацию о текущей частоте вращения на модуль измерения скорости, после чего текущее значение частоты вращения попадает в ПК через устройство сопряжения. В свою очередь модуль управления электроприводом поддерживает заданную в ПК частоту вращения.

Канал измерения и регистрации момента трения состоит из датчика момента 2 установленного на электродвигателе машины СМТ-1 и модуля измерения момента трения. По запросу ПК модуль измерения момента трения выдает значение момента трения от чувствительного элемента в цифровой форме.

Канал измерения, регистрации и контроля эксплуатационной нагрузки служит для поддержания заданного в ПК уровня нагрузки и контроля её текущего значения. Регистрация контактных напряжений осуществлялась с использованием тензодатчика 5, который устанавливался на прижимном устройстве неподвижного образца. Сигналы с выхода тензодатчика 5 поступают в модуль измерения нагрузки, для преобразования в форму необходимую для дальнейшей передачи в ПК. В свою очередь ПК используя модуль регулировки уровня нагрузки, который служит для поддержания заданного компьютером уровня нагрузки и контроля ее текущего значения, контролирует и поддерживает устройством управления нагружением необходимый уровень нагрузки. Для

увеличения рабочих напряжений устройство управления нагружением управляет прижимным устройством 7, что обеспечивает регулирование положения неподвижного образца.

Канал измерения и регистрации износа пар трения с помощью датчика износа 6, установленного на неподвижном образце, по запросу от компьютера, передает информацию о величине износа в ПК, через модуль измерения износа. Период опроса составляет 0,5 сек.

ПК в соответствии с заданной программой управления через устройство сопряжения последовательно реализует этапы испытаний. На каждом этапе контролируется его длительность, устанавливаются соответствующие значения частоты вращения, температуры контакта, уровня нагрузки, а также проводятся необходимые измерения.

Результаты измерений могут быть отображены на экране монитора и сохранены на жестком диске в виде последовательности файловых структур для последующего отображения, анализа и обработки. Формат хранения данных выбран таким образом, что позволяет проводить использование данных в дальнейшем для доступной обработки в различных приложениях под *Windows*. Результаты измерений и данные анализа и обработки могут быть выведены на принтер.

Отдельным информационным каналом является канал регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии, которые поступают от датчика 4. Датчик изготовлен из пьезокерамики ЦТС-19. Датчик 4 устанавливается на волноводе, имеет жёсткий контакт с неподвижным образцом фрикционного узла через слой акусто-прозрачной смазки. Уровень сигнала АЭ на выходе датчика недостаточный для обработки электронной аппаратурой, поэтому проводится его усиление на фоне помех с использованием предварительного усилителя. Частотный диапазон регистрируемых сигналов находится в диапазоне 500кГц – 1МГц. С выхода предусилителя сигнал АЭ поступает в акусто-эмиссионную систему.

Регистрация и обработка сигналов АЭ осуществляется

компьютеризированной мобильной акусто-эмиссионной системой для исследования и диагностики узлов трения. Методология обработки сигналов АЭ, заложенная в программном пакете “FRIC”, основана на широком комплексе исследований по физике процессов, происходящих в структуре поверхностных слоёв материалов при их контактном взаимодействии, и позволяет обрабатывать:

- процессы излучения акустической эмиссии в виде импульсной последовательности сигналов с большой интенсивностью;
- процесса излучения акустической эмиссии в виде непрерывного сигнала.

Автоматизированный стенд для испытаний на трение и износ (рис. 3.1) построен по магистрально-модульному принципу, с использованием стандартных последовательных интерфейсов, протоколов обмена компьютерной техники и специализированного программно-математического обеспечения. Такой подход позволяет упростить эксплуатацию стенда и осуществлять изменение его структуры за счет включения/исключения стандартных и специализированных модулей.

Работа с программным пакетом, который входит в состав стенда, основана на принципе ввода команд с клавиатуры или загрузке необходимых панелей инструментов. Пакет рассчитан на широкий круг пользователей, при этом не требует особых знаний в области программирования. При этом используется полноэкранный графический интерфейс с наглядностью представления результатов, и ввода подсказок по выполняемым операциям.

На основе анализа литературных источников и патентных исследований решалась задача выбора и обоснования рационального перечня реализуемых системой функций, а также перечня диагностических признаков и параметров, диапазонов их измерений. Установлено, что при решении различных задач диагностики сложных триботехнических систем проводятся измерения более тридцати физических величин, многие из которых изменяются в широких пределах. Очевидно, что разработка устройства, измеряющего такое количество величин и реализующего все известные методы диагностики, не представляется возможной. В связи с этим потребовалось определить наиболее универсальные

направления диагностики триботехнических систем.

Анализ изученных источников показал, что одним из наиболее перспективных методов используемых при проведении трибологических исследований, диагностировании, контроле и прогнозировании состояния объектов диагностики является метод акустической эмиссии. Он обладает рядом неоспоримых преимуществ – универсальность, простота реализации, безинерционность.

Основные пары схемы фрикционного контакта, реализуемые стендом:

- диск-диск;
- диск-колодка;
- кольцо-кольцо;
- четырёхшариковая схема.

Основные виды трения, реализуемые стендом:

- скольжение;
- качение;
- качение с проскальзыванием.

Основные регистрируемые и обрабатываемые параметры:

- усреднённая амплитуда АЭ (U);
- усреднённая энергия АЭ (E_{cp});
- суммарная энергия АЭ ($E_{сум}$);
- величина износа d ;
- температуры зоны трения t_3 ;
- момент трения M ;

Условия проведения испытаний:

- частота вращения V ;
- нагрузка F ;
- температуры окружающей среды t_1, t_2 для каждого элемента пары сопряжения;
- спектральный анализ функций диагностических параметров во времени;
- визуализация функций изменения признаков и параметров во времени;

- вывод на печать требуемой текстовой или графической информации;
- возможность трансляции экспериментальных данных для обработки в приложениях под *Windows*.

Параметры управления:

- общая продолжительность испытаний (T), число (n) и продолжительность этапов испытаний ($T_1, T_2, \dots, (T_i, \dots, T_n)$);
- условия проведения испытаний на каждом этапе $\langle T_i, V_i, F_i, t_{1i}, t_{2i} \rangle$.

В таблице 3.1 представлен диапазон регистрируемых параметров.

Таблица 3.1.

– диапазон измерения момента трения, Н	0 ... 20;
– диапазон измерения температуры зоны трения, °С	0 ... 600;
– диапазон измерения температуры внешней среды, °С	-50...125;
– диапазон измерения частоты вращения, мин ⁻¹	20 .. 1500;
– диапазон измерения эксплуатационной нагрузки, кг	0 ...200;
– диапазон измерения частоты микроконтактирования, МГц	0 ...1;
– диапазон регулирования частоты вращения, мин ⁻¹	50 ... 1500± 5;
– диапазон регулирования температуры внешней среды, °С	-10 ... 125± 1;
– диапазон регулирования эксплуатационной нагрузки, кг	0 ... 200± 1;
– разрядность АЦП канала акустической эмиссии	13;
– период регистрации уровня акустической эмиссии, мс	50;
– разрядность энкодера канала измерения износа	16;
– диапазон измерения износа, мкм	2 ... 5000± 2

Так, основные области применения автоматизированного стенда:

- фундаментальные и прикладные научные исследования в области трибологии, машиноведения, механики, деталей машин и механизмов;
- диагностирование, контроль и прогнозирование технического состояния машин и механизмов при их изготовлении, испытании, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте;
- использование в качестве универсального контрольно-измерительного лабораторного оборудования при создании учебных лабораторных стендов и установок по дисциплинам, связанным с изучением процессов трения, изнашивания и смазки и дисциплинам приборостроительного профиля.

Внешний вид автоматизированной системы трибодиагностики показан на рис.3.2.



Рис. 3.2. Внешний вид автоматизированной системы трибодиагностики

Автоматизированный стенд для испытаний на трение и износ внедрен в лаборатории трибодиагностики сложных технических систем на кафедре информационных технологий Национального авиационного университета.

3.2 Влияние условий нагружения на параметры акустического излучения

В главе 2 была рассмотрена модель результирующего сигнала АЭ (2.4), который формируется на этапе нормального износа поверхностей трения при фрикционном контактом взаимодействии. Проверку адекватности модели результирующего сигнала АЭ на стадии нормального изнашивания пары трения, согласно (2.4), и результатов проведенного моделирования (рис.2.2, рис.2.3) осуществляли при выполнении экспериментальных исследований сигналов АЭ для пар трения, с реализацией кинематической схемы “ролик-ролик” (“диск-диск”). С этой целью была разработана методика для проведения испытаний, общая схема установки показана на рис.3.1. В соответствии с разработанной методикой проводилась регистрация, обработка и анализ информации о сигналах АЭ, а так же моменте трения.

Экспериментальные исследования сигналов АЭ проводили с использованием универсальной машины трения типа СМТ-1. В качестве

образцов пар трения были выбраны образцы из стали 12Х2Н4А. В качестве смазочной среды применялось редукторное масло типа Б-3В. Выбор указанных материалов образцов исследуемых пар трения и смазочной среды обусловлен тем, что они имеют широкое применение в трансмиссиях авиационных ГТД.

При проведении экспериментальных исследований сигналов АЭ реализовывался режим трения качения с 20% проскальзыванием. Образцы в паре трения имели следующие размеры: диаметр $D=25$ мм, толщина $h=15$ мм. Скорость вращения V приводного вала машины трения СМТ-1 (рис.3.1) изменялась от 200 об/мин до 800 об/мин. Шаг приращения скорости вращения составлял 300 об/мин. Её величина выбиралась исходя из максимального приближения к условиям эксплуатации моделируемых узлов трения. При проведении экспериментов осуществлялось так же изменение рабочих напряжений контактного взаимодействия образцов пары трения σ_p величина которых находилась в диапазоне значений от 400 МПа до 1000 Мпа. Шаг приращения напряжений составлял 200 МПа. При этом увеличение рабочих напряжений контактного взаимодействия образцов пары трения осуществлялось на этапе нормального изнашивания.

Исследования сигналов АЭ осуществляли после приработки пары трения. Время первичной приработки пары трения составляло 20-25 минут. Время вторичной приработки, которая проводилась после непосредственного увеличения рабочих напряжений составляло 4-5 минут. Время работы пары трения на каждой эксплуатационной нагрузке составляло 5 часов.

На неподвижный образец пары трения жестко крепился пьезокерамический датчик (4, рис.3.1), который был предназначен для регистрации сигналов АЭ. Датчик устанавливался на образец после смазки его поверхности акустопрозрачной смазкой типа “Рамзай”. Это было необходимо для обеспечения хорошего акустического контакта с поверхностью образца (устранение влияния его шероховатости). Сигнал АЭ, регистрируемый датчиком, поступал на усилитель сигналов (рис.3.1), и после его усиления записывался в АЭДК. АЭДК представлял собой мобильный компьютер типа АСМІІ с ПО. ПО предназначено

для управления процессом измерений сигналов АЭ, проведения обработки их параметров, а так же представления результатов анализа в табличном или графическом виде на экране мобильного компьютера. АЭДК позволяет обрабатывать следующие параметры сигналов АЭ: усредненные амплитуду, энергию, мощность; суммарную энергию; накопленные значения данных параметров и другие. Кроме того, АЭДК реализует режимы графического представления исходного регистрируемого сигнала АЭ с возможностью проведения анализа его параметров. К дополнительным исследуемым параметрам относится такой параметр, как момент трения, который регистрируется в процессе проведения экспериментов. Его измерение осуществлялось с использованием датчика момента (2, рис.3.1) и модуля измерения момента трения.

Отметим, что, как и в случае моделирования результирующего сигнала АЭ, при проведении экспериментов исследовали влияние двух составляющих на регистрируемые сигналы АЭ: временная составляющая, которая задавалась скоростью вращения образца пары трения и внешняя нагрузка, которая определяла напряженно-деформированное состояние поверхностей контактного взаимодействия. В первом случае контактные напряжения оставались неизменными, а во втором случае – неизменной была скорость вращения.

Типичные сигналы АЭ, регистрируемые при изменении скорости вращения пары трения и постоянном значении рабочего контактного напряжения σ_p на этапе нормального износа пары трения показаны на рис.3.3 – рис.3.5. При проведении данных экспериментов значение рабочего контактного напряжения σ_p было неизменным и составляло 1000 МПа. На рис.3.6 – рис.3.8 показаны типичные сигналы АЭ, регистрируемые на этапе нормального износа при условии постоянства скорости вращения пары трения и изменении значений рабочих контактных напряжений σ_p . При проведении данных экспериментов значение скорости вращения было равно 500 об/мин.

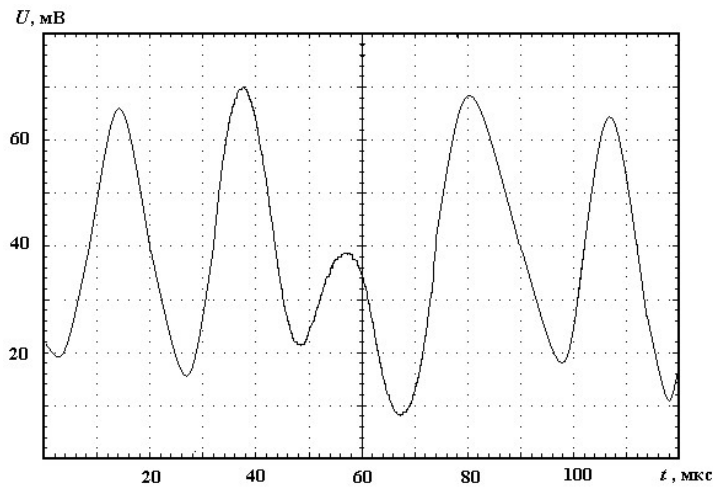


Рис. 3.3 Сигнал АЭ, регистрируемый на этапе нормального износа при неизменном значении рабочего контактного напряжении σ_p и скорости вращения пары трения $V=200$ об/мин. Рабочее контактное напряжение $\sigma_p=1000$ МПа

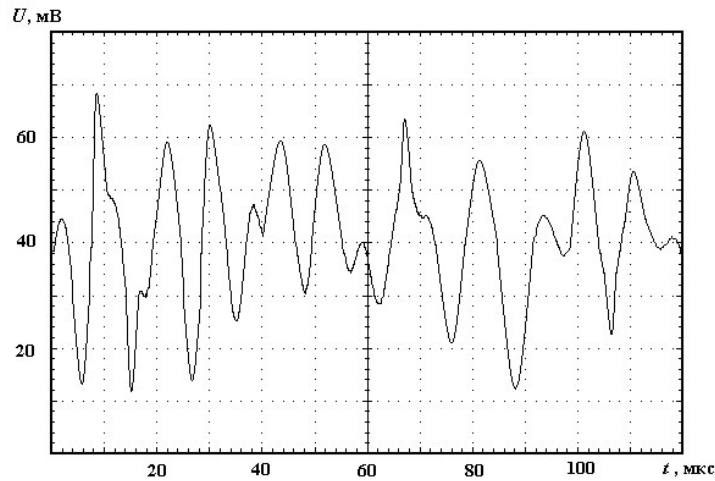


Рис. 3.4 Сигнал АЭ, регистрируемый на этапе нормального износа при неизменном значении рабочего контактного напряжении σ_p и скорости вращения пары трения $V=500$ об/мин. Рабочее контактное напряжение $\sigma_p=1000$ МПа

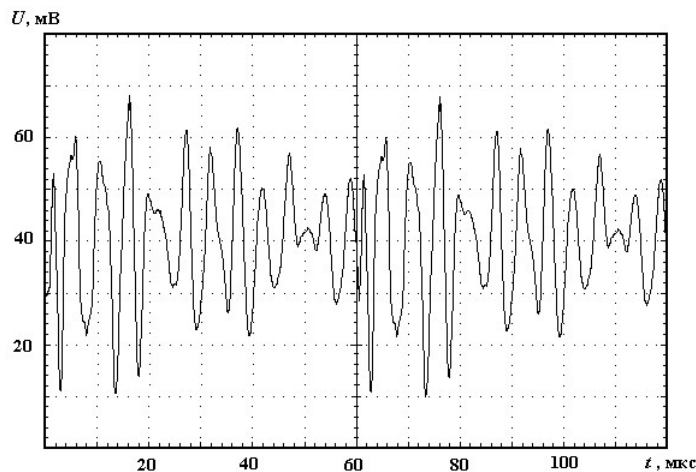


Рис. 3.5 Сигнал АЭ, регистрируемый на этапе нормального износа при неизменном значении рабочего контактного напряжении σ_p и скорости вращения пары трения $V=800$ об/мин. Рабочее контактное напряжение $\sigma_p=1000$ МПа

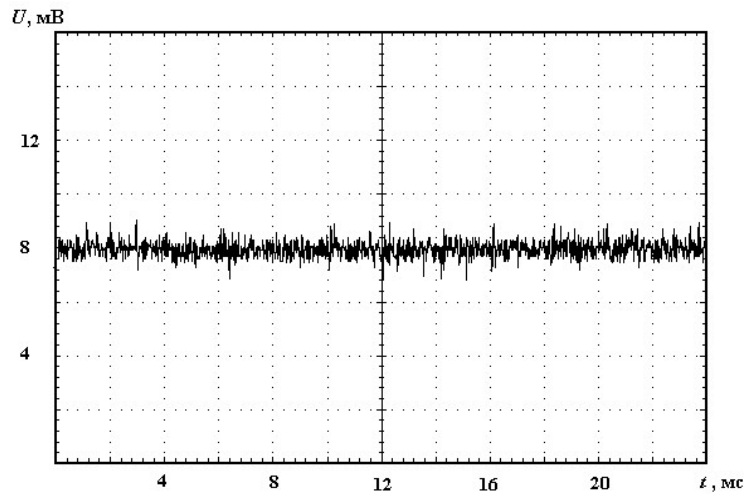


Рис. 3.6 Сигнал АЭ, регистрируемый при неизменной скорости вращения образца пары трения и увеличении рабочих контактных напряжений σ_p на этапе нормального износа пары трения: $\sigma_p=400$ МПа. Скорость вращения пары трения $V=500$ об/мин

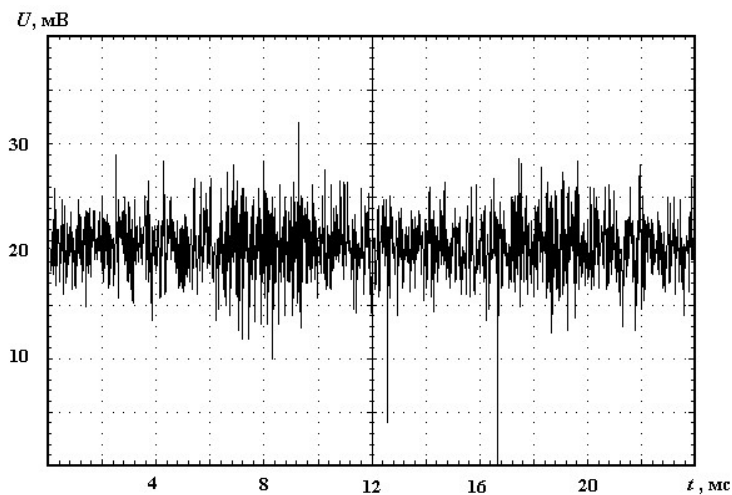


Рис. 3.7 Сигнал АЭ, регистрируемый при неизменной скорости вращения образца пары трения и увеличении рабочих контактных напряжений σ_p на этапе нормального износа пары трения: $\sigma_p=800$ МПа. Скорость вращения пары трения $V=500$ об/мин

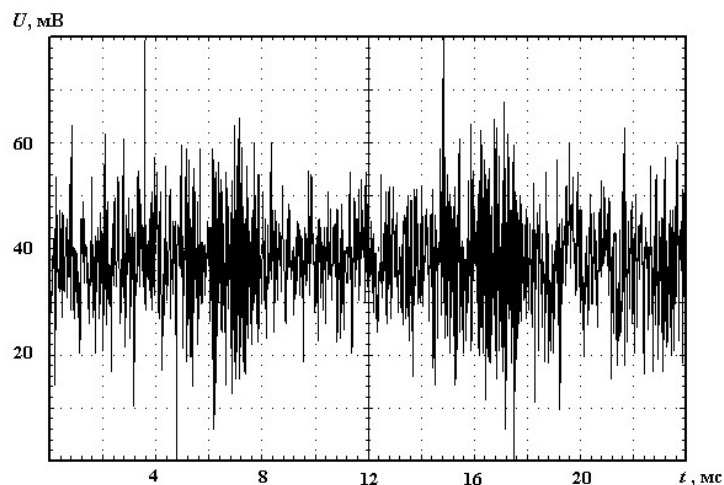


Рис. 3.8 Сигнал АЭ, регистрируемый при неизменной скорости вращения образца пары трения и увеличении рабочих контактных напряжений σ_p на этапе нормального износа пары трения: $\sigma_p=1000$ МПа. Скорость вращения пары трения $V=500$ об/мин

Из полученных результатов (рис.3.3 – рис.3.5, рис.3.6 - рис.3.8) видно, что регистрируемые сигналы АЭ во всех случаях представляют собой непрерывные сигналы и имеют сложную изрезанную форму.

В тоже время, при неизменном значении рабочего контактного напряжения σ_p с увеличением скорости вращения подвижного образца пары трения от 200 об/мин до 800 об/мин средняя величина амплитуды сигнала АЭ и ее разброс практически не изменяются (рис.3.3 – рис.3.5). Однако увеличение скорости вращения образца приводит к трансформации формы результирующего сигнала АЭ и его сжатию во времени. Такое изменение характера результирующих сигналов АЭ можно объяснить с позиций проведенного моделирования. Действительно, увеличение скорости вращения пары трения соответствует уменьшению времени между сменой площадок контактного взаимодействия, а, следовательно, приводит к уменьшению времени между последовательными актами разрушения поверхностных слоев материалов. Тогда, в соответствии с проведенным моделированием (рис.2.2), это должно приводить к сжатию сигнала АЭ во времени.

В тоже время, при постоянной скорости вращения подвижного образца пары трения и изменении значений рабочих контактных напряжений σ_p , как видно из рис.3.6 – рис.3.8, регистрируемые сигналы АЭ так же имеют сложную гребенчатую форму. При этом с увеличением контактных напряжений σ_p от 400 МПа до 800 МПа и 1000 МПа наблюдается увеличение не только среднего значения амплитуды результирующего сигнала АЭ, но и увеличение ее разброса. Такое изменение параметров сигналов АЭ так же хорошо согласуется с результатами проведенного моделирования (рис.2.3).

Таким образом, экспериментальные данные, полученные при трении образцов, показали хорошее согласование с результатами теоретических исследований.

3.3 Взаимосвязь параметров акустической эмиссии с напряженно-деформированным состоянием изделия

Исследования, которые были проведены в главе 2, позволили разработать модель результирующего сигнала АЭ, который формируется при изнашивании поверхностных слоев материалов. Модель результирующего сигнала АЭ, согласно (2.4), базируется на моделях одиночных сигналов АЭ [7], которые возникают в процессе трения при развитии пластической деформации, т.е. при разрушении вторичных структур I типа, и в процессе разрушения, т. е. при разрушении вторичных структур II типа, некоторой области материала, расположенной в площадке контактного взаимодействия пары трения.

Моделирование результирующих сигналов АЭ, согласно (2.4), на стадии нормального изнашивания при постоянной скорости вращения пары трения, проведенное в параграфе 2.1, показало, что с увеличением напряженно-деформированного состояния происходит возрастание, как средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, так и разброса амплитуды результирующего сигнала АЭ (рис.2.2, рис.2.3).

Моделирование результирующих сигналов АЭ при преобладающем механизме изнашивания, проведенное в параграфе 2.2, позволило установить, что основной вклад в амплитуду результирующего сигнала АЭ вносят сигналы, формируемые при разрушении вторичных структур II типа (рис.2.5, рис.2.8). При этом обработка полученных результатов моделирования для структур I типа (рис.2.7) показала, что при $\varepsilon_{0d}=13$ значение средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, по отношению к значению $\varepsilon_{0d}=11$, возросло на 0,6%, а уже при значении $\varepsilon_{0d}=15$ – на 2%. При этом разброс по амплитуде, в данном случае, увеличился, соответственно, на 4,4% и 5,8%. В тоже время для вторичных структур II типа (рис.2.8) при $\sigma_{0e}=13$ значение средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, по отношению к значению $\sigma_{0e}=11$, возросло на 41%, а при значении $\sigma_{0e}=15$ – на 86%. При этом разброс по амплитуде результирующего сигнала АЭ увеличился, соответственно, на 19% и 36,7%.

Изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ и ее разброса, в первом случае (при разрушении вторичных структур I типа), обусловлено следующим. Известно что, при возрастании деформаций [7], происходит сжатие импульсных сигналов во времени без изменения их амплитуды. Во втором случае (при разрушении вторичных структур II типа), наблюдается увеличение амплитуды импульсных сигналов при возрастании напряжений, а также наблюдается одновременное их сжатие во времени [7]. В двух случаях сжатие сигналов приводит к изменению временных условий их перекрытия и разному вкладу мгновенных амплитуд в амплитуду результирующего сигнала АЭ.

Более резкое изменение параметров результирующего сигнала АЭ проявляется с изменением условий перекрытия импульсных сигналов при действии двух механизмов изнашивания. В первую очередь, это относится к возрастанию величины разброса его амплитуды. Нижний уровень разброса по амплитуде определяется величиной амплитуды импульсных сигналов АЭ, формируемых при разрушении вторичных структур I типа, т.к. разрушение вторичных структур I типа приводит к сжатию сигнала АЭ во времени без изменения его амплитуды, а верхний уровень определяется величиной амплитуды импульсных сигналов, формируемых при разрушении вторичных структур II типа, что приводит к увеличению амплитуды сигнала АЭ и его сжатию во времени, что показано в параграфе 2.2.

Результаты моделирования результирующих сигналов АЭ, проведенные в параграфе 2.1, показали, что возрастание напряженно-деформированного состояния поверхностей пар трения приводит не только к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, но и к увеличению разброса по амплитуде (разница между максимальным и минимальным значением выбросов амплитуды в результирующем сигнале АЭ). В то же время, величина среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ в больше зависит от контактных напряжений или контактной нагрузки [72], что показано в параграфе 3.2.

Обработка данных результатов моделирования в виде зависимости изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ от

величины контактных напряжений (контактной нагрузки), показана на рис.3.9. Зависимость представлена в относительных единицах в виде графиков изменения $\tilde{U} = \bar{U}_T / \bar{U}_m$, $\tilde{\sigma} = \sigma_T / \sigma_m$, где \bar{U}_T, \bar{U}_m - соответственно, текущий средний уровень амплитуды результирующего сигнала АЭ и его максимальное значение; σ_T, σ_m - соответственно, текущее значение контактных напряжений и его максимальное значение. С учетом постоянства площадки контакта контактного взаимодействия узла трения можно перейти от контактных напряжений к контактным нагрузкам (\tilde{P}), т.е.

$$\tilde{P} = S \cdot \tilde{\sigma},$$

где S - площадь контактного взаимодействия образцов.

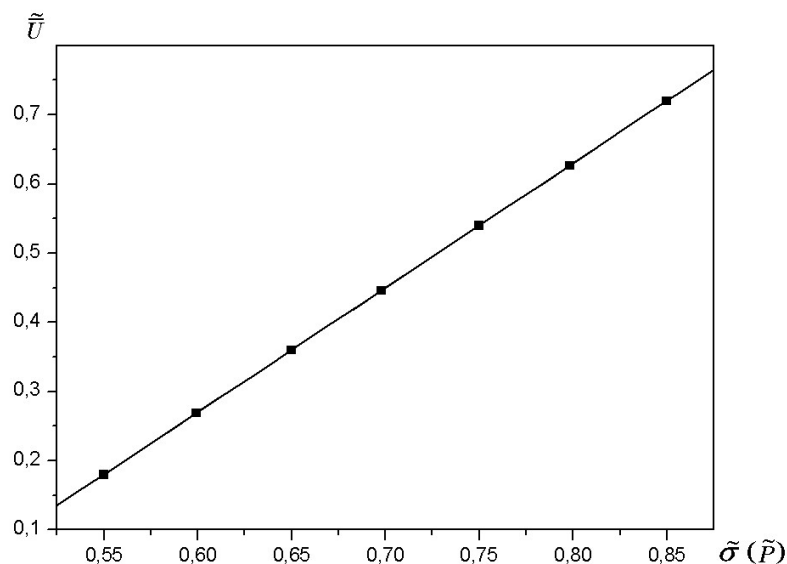


Рис. 3.9 Зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала акустической эмиссии от величины контактных напряжений (контактной нагрузки) в относительных единицах

Из полученных результатов (рис.3.9) видно, что зависимость изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ от контактных напряжений носит линейный характер [72]. Проведенная обработка зависимости изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ от величины контактных напряжений с использованием пакета прикладных программ *Origin*, предназначенного для анализа экспериментальных данных, показала, что зависимость хорошо описывается выражением вида

$$\tilde{U} = C + D \tilde{\sigma}, \quad (3.1)$$

где C и D – коэффициенты аппроксимирующего выражения (для данных

приведенных на рис.3.9 значения коэффициентов C и D , соответственно, равны – $C = -0,81$, $D = 1,8$; $\bar{\sigma}$ - контактные напряжения в относительных единицах.

Проверка полученного теоретического результата в виде зависимости (3.1) осуществлялась при обработке результирующих сигналов АЭ, регистрируемых в процессе экспериментальных исследований пар трения. Методика и схема экспериментальной установки рассмотрены в разделах 3.1 – 3.2. Исследования сигналов АЭ проводили на этапе нормального изнашивания, т.е. после завершения приработки пары трения. Время первичной приработки пары трения составляло 20-25 минут.

При проведении экспериментальных исследований фрикционного узла, в процессе испытаний проводилась регистрация контактных напряжений с использованием тензодатчика (5, рис.3.1). Сигналы с выхода тензодатчика поступали в специальный блок измерения нагрузки, где сигналы усиливались до нужного уровня для дальнейшей передачи в персональный компьютер (рис.3.1). Персональный компьютер осуществлял обработку амплитуды электрического сигнала с определением величины контактного напряжения. Результаты обработки представлялись в цифровом виде и в виде графической зависимости изменения контактных напряжений во времени.

В процессе испытаний, одновременно с определением контактных напряжений, осуществлялась обработка результирующего сигнала АЭ. Его регистрация проводилась с использованием пьезокерамического датчика АЭ (4, рис.3.1), который был установлен на неподвижном образце через слой акусто-прозрачной смазки. Сигнал с выхода датчика усиливался предварительным усилителем до уровня необходимого для дальнейшей обработки. После усиления сигнал АЭ поступал в мобильный компьютер для последующей его обработки, которая осуществлялась с использованием программного математического обеспечения. Программное математическое обеспечение позволяет управлять процессом измерений, а так же проводить обработку параметров сигналов АЭ и представлять результаты анализа в табличном или графическом виде. Результаты обработки были представлены в цифровом виде и в виде графических

зависимостей изменения амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени. Типичные результаты регистрации сигналов АЭ показаны на рисунках 3.3 - 3.4.

Проведенная обработка полученных данных, с использованием пакета прикладных программ *Origin*, показала, что экспериментальная зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ от контактных напряжений носит линейный характер (1, рис.3.10) [72] и хорошо описывается выражением

$$\bar{U}_A = C_1 + D_1 \sigma_k \quad (3.2)$$

где C_1 и D_1 – коэффициенты аппроксимирующего выражения (для данных приведенных на рис.3.10, кривая 1, значения коэффициентов C_1 и D_1 , соответственно, 10,71 и 0,046); σ_k - контактное напряжение. При этом среднеквадратическое отклонение для вероятности 0,9997 составляет $s_1^2=0,1554$.

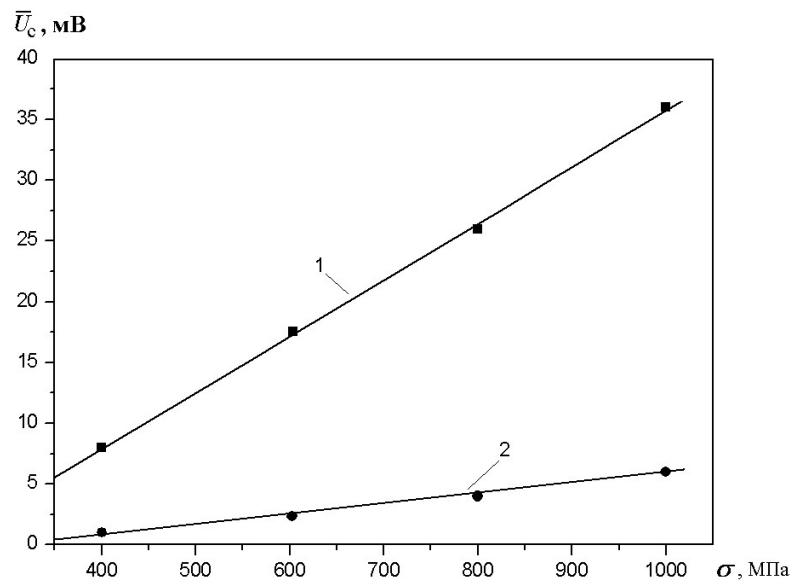


Рис. 3.10 Зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала акустической эмиссии 1 и сигнала на выходе тензодатчика (5) 2 от величины контактных напряжений (контактной нагрузки)

Результаты обработки напряжений на выходе тензодатчика 5 в виде зависимости их изменения от контактных напряжений приведены на рис.3.10, кривая 2. Полученная зависимость (кривая 2, рис.3.10) также носит линейный характер и подобна зависимости, полученной для средней амплитуды результирующего сигнала АЭ (кривая 1, рис.3.10). Она так же описывается линейной функцией вида

$$\bar{U}_A = C_2 + D_1 \sigma_k$$

где C_2 и D_2 – коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения коэффициентов C_2 и D_2 , соответственно, равны: $C_2 = -2,453$, $D_2 = 0,00819$; σ_k – контактное напряжение. При этом среднее квадратическое отклонение для вероятности $p=0,9815$ равно $s_2^2=0,5153$.

Однако, как показала обработка и анализ полученных зависимостей с использованием математических приложений, чувствительность изменения электрического сигнала на выходе тензодатчика к контактным напряжениям и его разрешающая способность, в 6 раз меньше, чем чувствительность изменения по сигналам АЭ.

Существование зависимости (3.2) позволяет получить обратную зависимость, которая описывает контактные напряжения от величины средней амплитуды результирующего сигнала АЭ, т.е. по средней амплитуде результирующего сигнала АЭ возможно определять контактные напряжения. Результаты обработки полученных данных (кривая 1, рис.3.10) показали, что из выражения (3.2) получаем обратную зависимость, которая описывается линейной функцией вида

$$\sigma_k = C + D\bar{U}_A, \quad (3.3)$$

где C и D – коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения коэффициентов C и D , соответственно, равны: $C = 236,35$, $D = 21,61$; а среднее квадратическое отклонение для вероятности $p=0,9987$ составляет $s_3^2=24,94$.

Обратная зависимость описывающая контактные напряжения, которая полученная по результатам измерения напряжений с использованием тензодатчика 5, аналогичная функции (3.3), и описывается линейным выражением вида

$$\sigma_k = C_3 + D_3\bar{U}_A, \quad (3.4)$$

где C_3 и D_3 – коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения коэффициентов C_3 и D_3 , соответственно, равны: 314,19 и 117,62. При этом среднее квадратическое отклонение для вероятности 0,9815 составляет $s_4^2=62,55$.

Таким образом, согласно (3.3), по значениям средней амплитуды результирующего сигнала АЭ возможно определять контактные напряжения в

любой момент времени работы пары трения [72]. Полученный результат является важным с точки зрения выбора материалов узлов трения, оптимизации режимов их работы, выбора смазочных материалов, а так же при проведении их диагностики. Следует отметить, что одной из важных задач является задача определения контактных напряжений в момент перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания, т.е. в момент возникновения заедания.

Для определения контактного напряжения в момент перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания были проведены экспериментальные исследования, в соответствии с методикой, которая была рассмотрена выше. При этом осуществлялась реализация режима с непрерывным увеличением нагрузки на пару трения на этапе нормального изнашивания, т. е. после завершения приработки пары трения. В процессе исследования повышали значение нагрузки, при этом проводилась регистрация и обработка сигналов АЭ и электрических сигналов с выхода тензодатчика. Результаты проведенных исследований, в виде зависимостей изменения контактных напряжений во времени, показаны на рис.3.11 *а, б*, соответственно, при обработке средней амплитуды сигналов АЭ и сигналов с выхода тензодатчика. Точки *A* и *B* на рис.3.11, *а, б* являются точками определения контактных напряжений в момент времени возникновения заедания определяемые, соответственно, по сигналу с тензодатчика и результирующему сигналу АЭ.

Из результатов проведенных исследований видно, что зависимость изменения контактных напряжений во времени, полученная при обработке сигналов регистрируемых с использованием тензодатчика, носит изрезанный характер (рис.3.11, *а*). В то время как, зависимость изменения контактных напряжений определенная по результирующему сигналу АЭ имеет гладкий характер изменения (рис.3.11, *б*). Начальные участки зависимостей в пределах времени порядка 2 минуты испытаний пары трения, характеризуются постоянством величины напряжений, т.е. постоянством величин обрабатываемых

сигналов АЭ и сигналов с выхода тензодатчика. Данный начальный участок зависимостей соответствует стадии нормального износа пары трения. При линейном увеличении внешней нагрузки наблюдается линейное возрастание зависимостей изменения контактных напряжений (линейное возрастание контактных напряжений), полученных при обработке сигналов на выходе тензодатчика и средней амплитуды результирующего сигнала АЭ. В момент времени перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания на зависимостях фиксируется отклонение от линейности характера их изменения. Однако, на зависимости, полученной по данным обработки результирующего сигнала АЭ, наблюдается скачкообразное возрастание контактных напряжений (рис.3.11, б), в то время как, по сигналам с выхода тензодатчика изменение контактных напряжений является плавным (рис.3.11, а). При этом начало перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания, согласно полученным данным, по сигналам с выхода тензодатчика и по результирующему сигналу АЭ фиксируется в разные моменты времени. По результирующему сигналу АЭ (точка А, рис.3.11, б) начало перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания фиксируется через 6,4 мин., а по сигналам с тензодатчика (точка В, рис.3.11, а) - через 7,5 мин. после начала регистрации, обработки и анализа сигналов. Фактически, по результирующему сигналу АЭ момент времени начала перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания фиксируется на 1,1 мин. раньше, чем по сигналам с выхода тензодатчика. При этом контактное напряжение, определяемое с использованием сигналов АЭ, составляет 1410 МПа (точка А, рис.3.11, б), а его значение, определенное по сигналам с выхода тензодатчика, равно 1560 МПа (точка В рис.3.11, а).

Из полученных результатов видно (рис.3.11 а, б), что по времени перехода узла трения со стадии нормального изнашивания к стадии катастрофического изнашивания, при обработке результирующего сигнала АЭ, контактное напряжение определяется на 15% раньше, чем при обработке сигналов с выхода

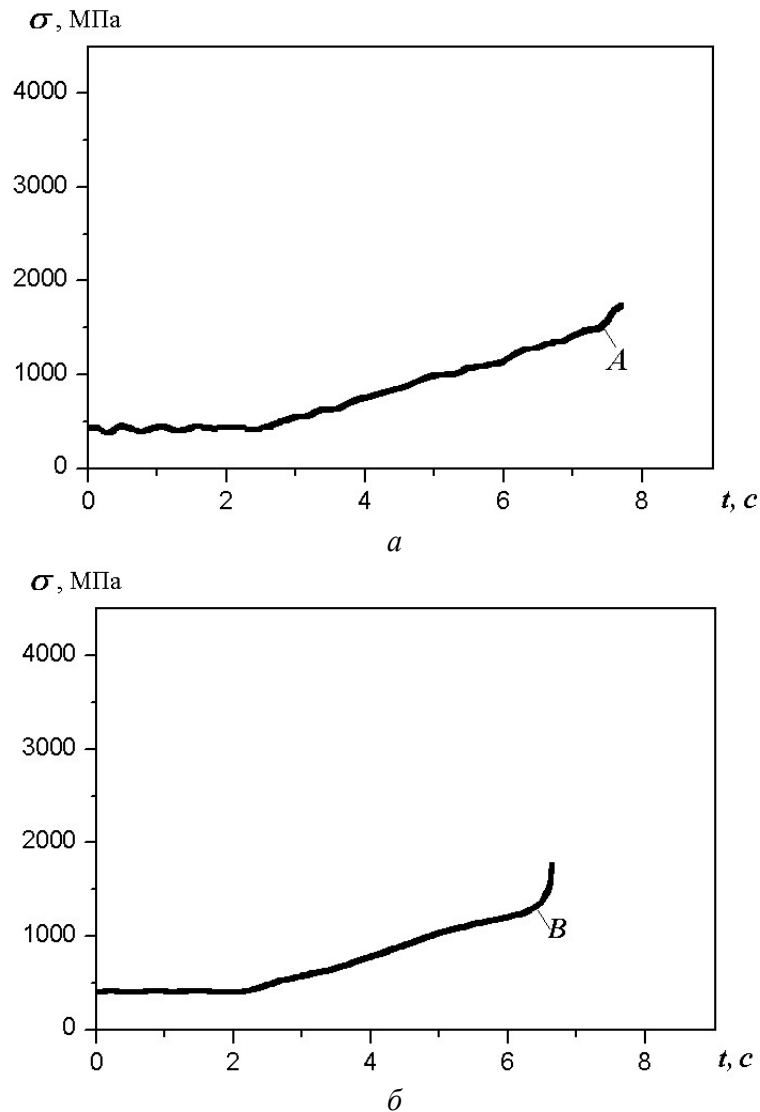


Рис. 3.11 Зависимости изменения контактных напряжений во времени, полученные при обработке сигналов на выходе тензодатчика (*a*) и при обработке средней амплитуды результирующего сигнала АЭ (*б*): *A, B* – моменты времени возникновения заедания пары трения, определяемые, соответственно, по сигналу с тензодатчика и результирующему сигналу АЭ

тензодатчика, т.е. на начальной стадии его возникновения. В тоже время, как видно из рис.3.11 *a, б*, значение контактного напряжения по сигналам АЭ определяется на 10% более точно, чем по сигналам, полученным с тензодатчика.

Таким образом, полученные результаты проведенных исследований узла трения показали, что обработка среднего уровня результирующего сигнала АЭ позволяет определять контактные напряжения в любой момент времени, включая и момент времени начала возникновения заедания, с более высокой точностью, чем метод тензометрии.

Следует отметить, что полученные результаты представляют несомненный

интерес, как с точки зрения выбора материалов пары трения и оптимизации режимов ее работы, так и с точки зрения диагностики и мониторинга состояния узлов трения без вывода фрикционных узлов из эксплуатации. При этом метод АЭ возможно использовать не только в лабораторных, но и в производственных условиях, где практически невозможно применять метод тензометрии [72, 116]. Кроме того, фиксация начального этапа возникновения заедания позволяет своевременно вывести узел трения из работы и, тем самым, предотвратить его разрушение при эксплуатации.

Выводы по третьей главе

1. Рассмотрены структура и принцип действия автоматизированного стенда с информационно-измерительной системой для исследований и испытаний узлов трения. Также рассмотрены основные пары схем фрикционного контакта, виды трения, реализуемые стендом и основные регистрируемые и обрабатываемые параметры. Стенд позволяет проводить исследования процессов происходящих на поверхностях контактного взаимодействия в процессе трения и износа, разработку методов контроля и прогнозирования технического состояния машин и механизмов на всех этапах их жизненного цикла.
2. Разработана методика для проведения испытаний, в соответствии с которой проводилась регистрация, обработка и анализ информации о сигналах АЭ, а также моменте трения. Результаты исследований показали, что на этапе нормального износа увеличение скорости вращения пары трения при постоянном значении начальных напряжений и деформаций, приводит к сжатию сигнала АЭ во времени. В тоже время при постоянной скорости вращения пары трения увеличение начальных напряжений и деформаций приводит не только к увеличению среднего уровня результирующего сигнала АЭ, а так же и к увеличению разброса его амплитуды.
3. В соответствии с результатами проведенного моделирования, полученных в главе 2 и с результатами экспериментальных исследований, осуществили обработку данных в виде зависимостей изменения среднего уровня амплитуды

результатирующего сигнала АЭ от величины контактных напряжений. Показано, что теоретическая и экспериментальная зависимости изменения носят линейный характер.

4. Показано, что чувствительность метода акустической эмиссии и точность определения контактных напряжений значительно выше, чем метода тензометрии. В тоже время, обработка среднего уровня результирующего сигнала АЭ позволяет определять контактные напряжения в любой момент времени, с более высокой точностью. При этом значительно раньше производится фиксация момента времени начала возникновения заедания узла трения.

ГЛАВА 4. АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПРИБОРНОЙ АКУСТО-ЭМИССИОННОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Структура построения приборной акусто-эмиссионной системы диагностики состояния объекта

При построении систем для обработки сигналов акустической эмиссии, как отмечено в работе [87, 88, 89, 90, 92], используются три основных подхода: аналоговый; аналого-цифровой и цифровой. С точки зрения концепции построения систем, последний подход является наиболее сложным. Однако он позволяет использовать максимальные возможности средств вычислительной техники и современных инструментальных средств, направленных на создание измерительных лабораторий. К таким средствам относятся средства технологий LabCard и LabView, которые предполагают широкое использование программных средств для управления элементами системы, процессами измерения, обработки информации и представления ее результатов. Первая технология базируется на использовании среды Borland C (C++), а вторая – на использовании собственной оболочки. При этом в обоих случаях применяются одни и те же инструментальные средства – ПВВ аналоговой и цифровой информации.

ПВВ являются инструментальными средствами, в состав которых входят: АЦП; ЦАП; счетчики таймера и ряд других элементов. ПВВ располагаются на шине персонального (мобильного) компьютера (ПК, МК), что обеспечивает программное управление его элементами и обмен данных с элементами ПК. Так как управление режимами работы всех устройств ПВВ и ПК осуществляется только с использованием программных средств, то это позволяет перераспределять функции между взаимосвязанными элементами системы – минимизация внешних электронных средств и максимальное использование гибких программных средств. При этом последние приобретают приоритетное значение.

Исходя из сказанного, если не рассматривать электронную (внешнюю) часть системы, то ее базовыми элементами являются ПВВ и ПК. Однако выбор

одной из отмеченных технологий для реализации системы основывается на представлении ее концептуальной части.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в главе 2, а так же результаты, полученные различными исследователями [7, 155], показали следующее. В отличие от импульсных сигналов АЭ, фиксируемых при статических видах нагружения (непрерывная или ступенчатая нагрузка) материалов и изделий [4, 8, 9], сигналы АЭ, регистрируемые в процессе работы пар трения (динамическая нагрузка), представляют собой непрерывные сигналы. При этом, если статические испытания являются кратковременными (минуты и десятки минут), то испытания на трение (динамические испытания) могут быть, как кратковременными (минуты и десятки минут), так и длительными (часы, сутки, единицы суток). При общем подходе в регистрации входных сигналов (преобразование входного процесса в цифровые коды) различия в длительности проводимых испытаний и процессах излучения сигналов требует использования различных принципов хранения сигналов АЭ и методов их обработки.

Сигналы АЭ, регистрируемые при исследовании процессов трения, как отмечено выше, представляют собой непрерывные сигналы (рис. 2.2). Совершенно очевидно, что обработка их параметров должна проводиться с усреднением на задаваемом интервале, выбор которого должен определяться с учетом условий проведения испытаний (скорость вращения пары трения, время записи информации, а так же максимально возможный объем формируемого массива данных). Так же очевидно, что будут существовать ограничения и на набор (количество) обрабатываемых и анализируемых параметров сигналов АЭ.

В зависимости от времени проведения испытаний (кратковременные или длительные) возможно использование физического или логического уровней хранения информации. В первом случае, возможно сохранение исходного процесса на физическом уровне построения устройств запоминания информации. Так, например, если объем устройства запоминания составляет 2 Гбайт, интервал дискретизации аналого-цифрового преобразователя – 10 мкс, то максимальное

время записи входного процесса (временной интервал проведения испытаний) составит 5,5 часа. При постоянном хранении исходного процесса возможно проведение его неоднократной вторичной обработки с выбираемым интервалом усреднения. Во втором случае, обработка с усреднением параметров сигналов АЭ должна осуществляться непосредственно в процессе регистрации информации. При этом условия формирования интервалов усреднения в первом и втором случае различаются между собой. В первом случае, выбор интервала усреднения является более гибким и определяется условиями отмеченными выше. Во втором случае, выбор интервала усреднения является жестким, и будет определяться не только условиями испытаний, но и условиями вывода зависимостей изменения параметров регистрируемых сигналов АЭ (параметрами графических окон вывода информации).

Таким образом, общая концепция построения АЭ системы для исследования процессов трения базируется на сочетании двух направлений регистрации и обработки сигналов АЭ (рис.4.1). Первое направление основано на использовании физического уровня построения устройств запоминания информации (магнитных дисков), а второе - на обработке входной информации в реальном масштабе времени. При этом общим элементом обоих направлений является единый принцип преобразования аналоговых сигналов АЭ в цифровые коды.

Принятая концепция построения АЭ системы определяет выбор технологии ее реализации, а именно технологии LabCard. Это обусловлено следующим.

Технология LabView предполагает использование оперативной памяти ПК для записи информации, ее обработки и формирования логических массивов данных. С ее использованием возможна реализация направления регистрации и обработки сигналов АЭ при проведении длительных испытаний. При этом практически не возможно использовать физический уровень построения устройств запоминания информации. В тоже время, данный недостаток отсутствует в технологии LabCard и обеспечивается специальными функциями,

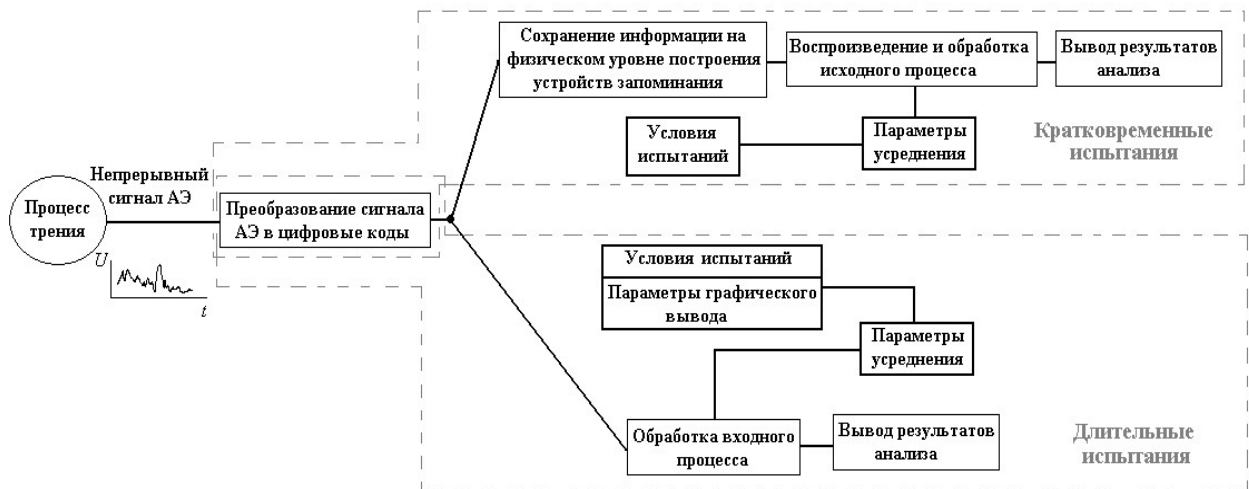


Рис. 4.1. Концепция построения акусто-эмиссионной системы диагностики узлов трения

разрешающими доступ к физическому уровню построения устройств запоминания. При этом в полной мере реализуется и направление регистрации и обработки сигналов АЭ при проведении длительных испытаний. Поскольку общим элементом обоих направлений является порт ввода-вывода, обеспечивающий преобразование аналогового сигнала в цифровой код, а дальнейшая обработка информации и управление прохождением информационных потоков осуществляется с использованием программных средств, то кратковременные и длительные испытания пар трения могут быть реализованы в единой системе. Это обеспечивает возможность создания единого интерфейса управления с отдельной реализацией процедур кратковременных и длительных испытаний. Естественно, что каждое направление должно поддерживаться собственными параметрами управления и информационными потоками.

Таким образом, общая структура АЭ системы для кратковременных и длительных испытаний пар трения состоит из двух основных частей (рис.4.2): электронной части и МК (ПК) с инструментальными средствами технологии LabCard.

Электронная часть АЭ систем диагностики пар трения используется для преобразования механических смещений, возникающих при развитии пластической деформации или разрушении поверхностных слоев материалов, в электрический сигнал (датчик АЭ) и их дальнейшего усиления (усилитель сигналов АЭ) до уровня, достаточного для дальнейших преобразований.

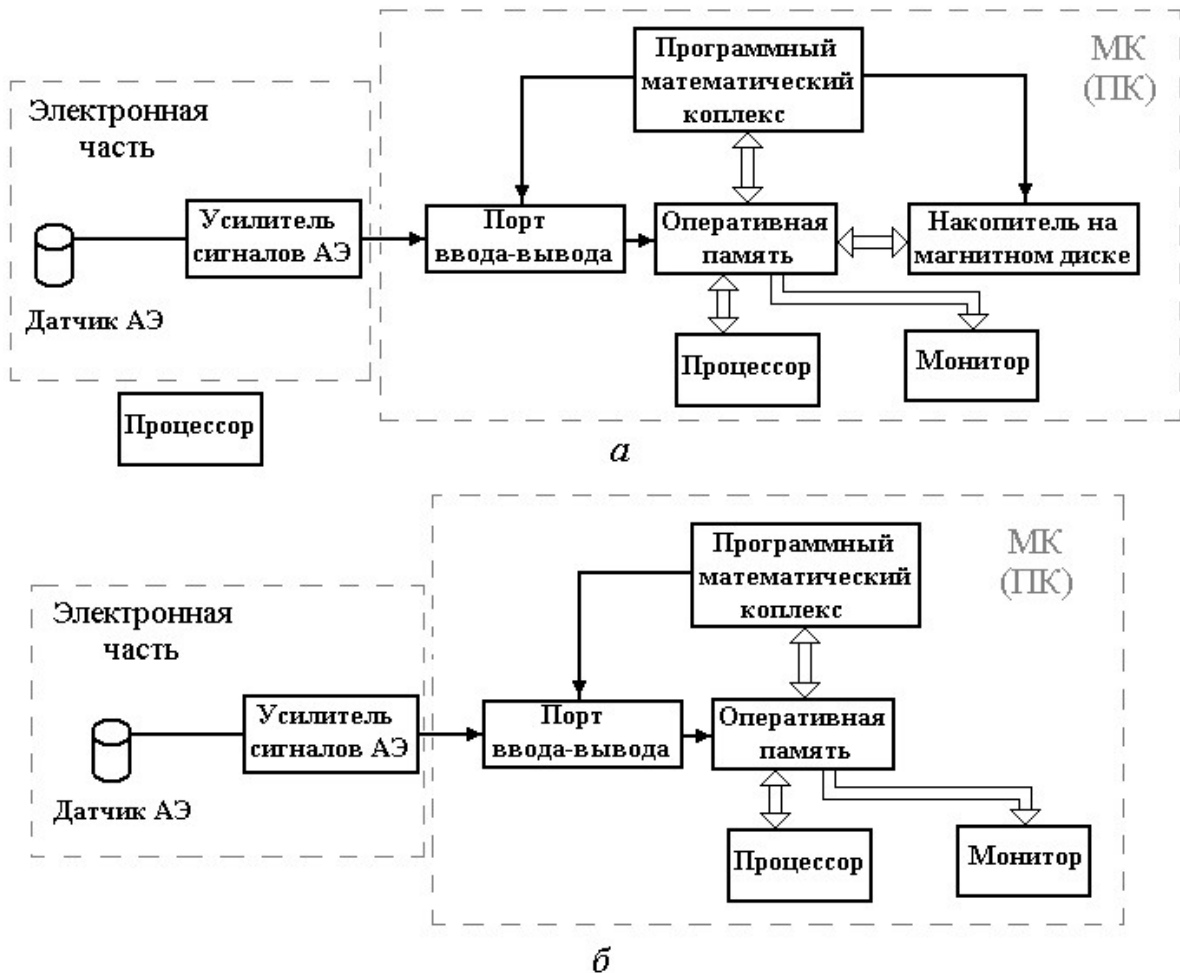


Рис. 4.2 Структуры АЭ систем диагностики пар трения: а – при проведении кратковременных испытаний; б – при проведении длительных испытаний

Электронная часть систем работает по жесткому и неизменному алгоритму. Вторая часть систем предназначена для преобразования сигналов АЭ в цифровые коды, проведения их обработки и представления результатов анализа. Так как основные операции в системах (алгоритмы работы систем) задаются и выполняются с использованием МК (ПК), которые могут легко модифицироваться, то электронную часть систем с неизменным алгоритмом будем считать внешней. При этом вторую часть систем будем считать внутренней.

Внутренняя часть систем (рис.4.2) состоит из порта ввода-вывода и устройств МК (ПК) – оперативной памяти, магнитного диска, процессора, монитора. Все элементы внутренней части систем являются программно доступными. Управление режимами их работы осуществляется с использованием программного математического комплекса. Он является гибким, т.е. его

модификация не требует изменения структуры внутренней части систем. С данной точки зрения программный математический комплекс является базовым элементом АЭ систем диагностики узлов трения.

Различие в системах для проведения кратковременных и длительных испытаний (рис.4.2) заключается в реализации концепции их построения. В системе для кратковременных испытаний (рис. 4.2, а) используется накопитель на магнит-ном диске, который, как отмечено выше, предназначен для хранения исходной информации на физическом уровне его построения. В системе для проведения длительных испытаний (рис. 4.2, б) осуществляется непосредственная обработка входной информации с выводом результатов на экран монитора.

Из структур, приведенных на рис. 4.2, видно, что внутренние части систем содержат устройства, которые являются общими для обеих систем. Однако режимы работы устройств различаются между собой, что определяется общей концепцией проведения кратковременных и длительных испытаний. При этом основные различия в системах заключаются в программных математических комплексах, обеспечивающих данные режимы. Наличие единых программно доступных устройств в системах позволяет формировать единое программное обеспечение, формирующее необходимые операции управления, измерения, обработки данных и представления результатов, в зависимости от вида проводимых испытаний. Другими словами, возможно создание единого ПИУ, панели инструментов которого позволят осуществлять вызов необходимых операций с учетом вида проводимых испытаний пар трения.

Естественно, что при наличии общих параметров управления, задающих режимы работы устройств системы, выполнение операций (выполняемых алгоритмов), в зависимости от вида проводимых испытаний, будет поддерживаться специфическими параметрами управления, структурами записи информации и структурами ИП.

4.2 Структуры записи информации и обработка сигналов акустической эмиссии

В соответствии с концепцией построения систем при наличии общих принципов преобразования аналоговых сигналов АЭ в цифровые коды, в зависимости от вида проводимых испытаний, используются различные принципы записи и хранения информации. При проведении кратковременных испытаний осуществляется запись информации на магнитный носитель на физическом уровне его построения. При проведении длительных испытаний осуществляется непосредственная обработка цифровых кодов. При этом в обоих случаях необходимо формировать определенные структуры преобразованной информации, в соответствии с которыми будет осуществляться их обработка.

Как было отмечено ранее, сигналы АЭ, регистрируемые при работе пар трения, представляют собой непрерывные сигналы. Совершенно очевидно, что их преобразование в цифровые коды должно осуществляться в условиях непрерывной работы АЦП. Такой режим работы АЦП необходим для обеспечения записи исходной информации с минимальными потерями. При этом структура записи и объем записываемой информации будут зависеть от вида проводимых испытаний.

Согласно общей концепции построения АЭ систем диагностики пар трения при проведении кратковременных испытаний цифровые коды преобразованного непрерывного сигнала АЭ записываются на магнитный носитель информации для их постоянного хранения и последующей обработки. При этом принципы записи и объем информации записываемой на магнитный носитель определяются физической структурой носителя. Запись может осуществляться только блоками, размер каждого из которых составляет 256 шестнадцатиразрядных слов. При этом количество одновременно записываемых блоков может выбираться по умолчанию. Например, по 5 или по 10 блоков, т.е. объем записываемой информации будет составлять, соответственно, 5120 байт и 10240 байт. Как показали исследования, в случае проведения предварительной установки записывающих головок в требуемую позицию на магнитном носителе

(предварительном позиционировании головок) при данных объемах записи практически не происходит потери исходной информации, поступающей с выхода АЦП.

Информация, записываемая на физическом уровне построения устройств запоминания, предназначена для долговременного хранения исходного регистрируемого процесса. Так как последующая обработка информации осуществляется не в реальном масштабе времени, то это позволяет использовать несколько каналов ввода информации о сигналах АЭ. Для возможности ввода и последующей обработки информации необходимо осуществлять ее структурирование, т.е. использовать определенные структуры записи информации, которые принимаются по умолчанию. На рис. 4.3, *а*, *б* показаны некоторые варианты структур записи информации о сигналах АЭ при проведении кратковременных испытаний пар трения.

При одном канале преобразования аналоговых сигналов в цифровые коды используется структура записи, которая представляет собой последовательность кодов, формируемых на выходе АЦП с заданным интервалом дискретизации (рис. 4.3, *а*). После блочной записи зарегистрированной информации на магнитный носитель производится ее чтение. Причем количество блоков при чтении информации должно соответствовать количеству блоков при ее записи. Обработка прочитанной информации производится в соответствии с принятой структурой ее записи (рис. 4.3, *а*), т.е. производится последовательная обработка каждого слова, соответствующего текущему значению амплитуды входного регистрируемого процесса.

При двух каналах преобразования аналоговых сигналов в цифровые коды возможно использовать структуру записи, которая представляет собой чередующуюся последовательность кодов, формируемых на выходе двух АЦП с заданным интервалом дискретизации (рис. 4.3, *б*). После блочной записи зарегистрированной информации на магнитный носитель производится ее чтение. Причем количество блоков при чтении информации, как и в первом случае (рис. 4.3, *а*) должно соответствовать количеству блоков при ее записи.

Обработка прочитанной информации производится в соответствии с принятой структурой ее записи (рис. 4.3, б), т.е. производится последовательная обработка каждого нечетного слова, соответствующего текущему значению амплитуды входного регистрируемого процесса по первому каналу преобразования, а затем последовательная обработка каждого четного слова, соответствующего текущему значению амплитуды входного регистрируемого процесса по второму каналу преобразования. При этом обработка регистрируемого процесса осуществляется с усреднением его параметров. Возможно формирование и других структур записи информации, в соответствии с которыми необходимо проводить ее обработку.



Рис. 4.3 Структуры записи информации о сигналах акустической эмиссии на физическом уровне построения устройств запоминания информации: Н, К – соответственно, начало и конец блока информации

В отличие от кратковременных испытаний при проведении длительных испытаний, согласно концепции построения АЭ систем диагностики узлов трения, обработка регистрируемой информации осуществляется в реальном масштабе времени с усреднением параметров регистрируемого процесса. Подобная обработка требует временных затрат. Поэтому для уменьшения потерь информации при проведении длительных испытаний пар трения используется только один канал преобразования входного АЭ процесса. В данном случае запись цифровых кодов осуществляется в оперативную память ПК, а ее структура

соответствует структуре приведенной на рис. 4.3, а, т.е. представляет собой последовательность кодов, формируемых на выходе АЦП с заданным интервалом дискретизации.

Как в случае кратковременных, так и в случае длительных испытаний обработка регистрируемого непрерывного сигнала осуществляется с усреднением его параметров. По результатам обработки формируются массивы данных о параметрах результирующего сигнала АЭ, которые сохраняются в виде файловых структур.

Аналоговый сигнал на выходе усилительного тракта представляет собой функцию изменения амплитуды во времени и является одномерным. Данному сигналу однозначно соответствует его дискретный образ с использованием аналого-цифрового преобразования. При проведении такого преобразования точное значение цифрового кода мгновенной величины сигнала в двоичной форме записывается [8] в виде

$$B = \sum_{k=0}^{\infty} b_k 2^{-k} \quad (4.1)$$

где коэффициенты b_k могут принимать значения: $b_k = 0$ или $b_k = 1$.

В тоже время, АЦП имеют ограниченное число разрядов. Например, разрядность АЦП, располагаемых на современных инструментальных средствах технологии LabCard, может изменяться в пределах 8 – 32 разряда. При ограниченном числе разрядов (k) машинное представление кода цифрового отсчета мгновенного значения сигнала записывается в виде

$$B = \sum_{k=0}^{k-1} b_k 2^{-k} + \beta_k 2^{-k} . \quad (4.2)$$

При такой записи значение коэффициента β_k может быть равно b_k , или b_{k+1} . Это будет определяться тем, что ноль или единица содержится в $(k+1)$ разряде.

При работе АЦП на интервале времени $[0, T]$ непрерывный сигнала $U(t)$ описывается своими отсчетными значениями $B_0, B_1, B_2, \dots, B_{M-1}$, взятыми соответственно в моменты времени $(0, \Delta t, \dots, (M-1) \Delta t)$, где Δt - интервал дискретизации; $M = T/\Delta t$ - число отсчетов на интервале времени $[0, T]$.

На базе технологии “*LabCard*” в акусто-эмиссионной системе производится преобразование аналогового сигнала в цифровой код с последующей его передачей в ПК и формированием массива чисел $\{B_n\}$, которые хранятся на физическом уровне построения магнитного носителя информации. Графическое представление этих чисел дает изображение непрерывного сигнала АЭ, по одной координате которого откладываются моменты времени, а по другой - соответствующие числа из записанного массива $\{B_n\}$. Например, для непрерывного сигнала, результат такого представления на экране монитора показан на рис. 4.4.

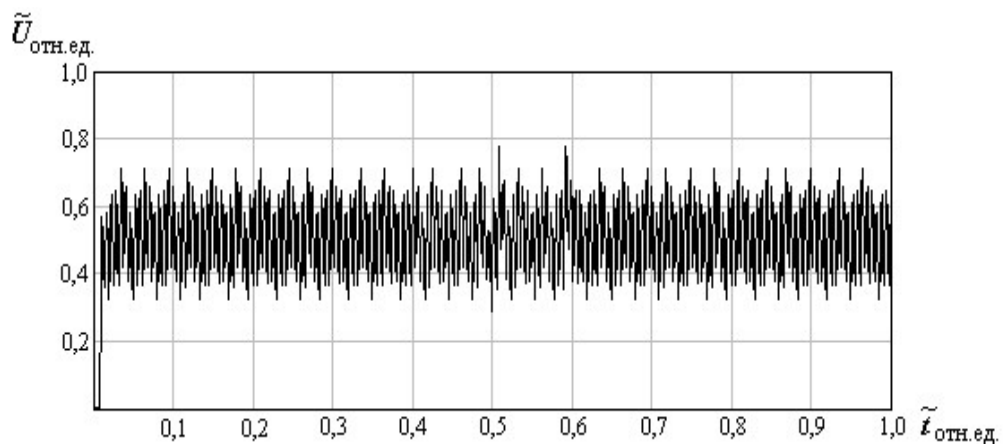


Рис. 4.4. Представление непрерывного сигнала АЭ из массива чисел $\{B_n\}$, хранящегося в ПК

Наличие цифровых массивов чисел $\{B_n\}$, описывающих непрерывный сигнал $U(t)$, хранящихся на магнитном носителе информации, позволяет проводить их неоднократную обработку, анализ и представление его результатов в графическом или табличном видах. Рассмотрим обработку параметров сигналов АЭ.

Для непрерывного сигнала АЭ, зарегистрированного на интервале времени наблюдения $[0, T]$, возможно проводить обработка его усредненных и суммарных параметров с выбираемым интервалом усреднения (рис.4.5). Усредненные значения параметров непрерывного АЭ определяются в соответствии с выражением

$$\bar{\psi}(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \psi(t_n, i), t_n \in [i\tau_y, (i+1)\tau_y], i = 1, 2, \dots, m, \quad (4.3)$$

$$0 < t_n \leq T, 0 < t_i \leq T$$

где $\psi(t_n, i)$ - текущие значения параметра на обрабатываемом интервале усреднения; τ_y - длительность интервала усреднения, m - количество интервалов усреднения; i - номер интервала усреднения, N - количество цифровых отсчетов сигнала АЭ на i -ом интервале усреднения.

Поскольку хранение исходного непрерывного сигнала на магнитном носителе информации производится в цифровом виде, то возможна обработка его суммарных параметров на длине реализации $[0, T]$

$$\psi_{\text{сум}}(t_i) = \sum_{n=1}^N \psi(t_n, i), t_n \in [i\tau_a, (i+1)\tau_a], i = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (4.4)$$

$$0 < t_n \leq T, 0 < t_i \leq T$$

где ψ - обрабатываемый параметр сигналов АЭ; τ_a - длительность интервала анализа; m - количество интервалов анализа на длине реализации регистрируемого сигнала $[0, T]$, $m = T / \tau_a$; N - количество цифровых отсчетов непрерывного сигнала на i -ом интервале анализа.

При обработке параметров непрерывного сигнала АЭ возможно проводить анализ накопления усредненных и суммарных параметров во времени. Так, накопление усредненных параметров непрерывного сигнала АЭ с выбираемым интервалом усреднения, осуществляется в соответствии с выражением

$$\bar{\psi}_{\text{сум}}(t_i) = \sum_{i=1}^m [\bar{\psi}_{\text{сум}}(t_{i-1}) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \psi(t_n, i)], t_n \in [(i)\tau_y, (i+1)\tau_y], i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (4.5)$$

$$0 < t_n \leq T, 0 < t_i \leq T, \bar{\psi}_{\text{сум}}(0) = 0;$$

где ψ - обрабатываемый параметр АЭ с усреднением его значений; τ_y - длительность интервала усреднения; m - количество интервалов усреднения на длине реализации сигнала $[0, T]$, $m = T / \tau_y$; N - количество цифровых отсчетов непрерывного сигнала АЭ на i -ом интервале усреднения.

Накопление суммарных параметров непрерывного сигнала АЭ с выбираемым интервалом анализа

$$\psi_{\text{сум}}(t_i) = \sum_{i=1}^m [\psi_{\text{сум}}(t_{i-1}) + \sum_{n=1}^N \psi(t_n, i)], t_n \in [(i)\tau_a, (i+1)\tau_a], \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (4.6)$$

$$0 < t_n \leq T, 0 < t_i \leq T, \quad \psi_{\text{сум}}(0) = 0;$$

где ψ - обрабатываемый параметр АЭ; τ_a - длительность интервала анализа; m - количество интервалов анализа на длине реализации $[0, T]$, $m = T / \tau_a$; N - количество цифровых отсчетов непрерывного сигнала АЭ на i -ом интервале анализа.

Общий перечень обрабатываемых и анализируемых параметров непрерывных сигналов АЭ приведен на рис. 4.5. В качестве усредненных параметров непрерывного сигнала АЭ с выбираемым интервалом усреднения могут быть: усредненная амплитуда, усредненная мощность, усредненная энергия. При обработке суммарных параметров непрерывного сигнала АЭ проводится анализ суммарной мощности и суммарной энергии на выбираемом интервале анализа. Как для усредненных, так и суммарных параметров непрерывного сигнала АЭ возможно обрабатывать их значения в заданном (выбираемом) диапазоне величин, т.е. проводить анализ параметров в заданных границах их числовых значений.

Поскольку трение представляет собой процесс, развивающийся во времени, то интерес представляет обработка зависимостей накопления параметров излучаемого результирующего сигнала АЭ во времени, т.е. исследование кинетики развития процесса трения. К данным параметрам относятся накопление усредненной энергии и усредненной мощности во времени с выбираемым интервалом усреднения, а так же накопление суммарной мощности и суммарной энергии во времени с выбираемым интервалом анализа (рис. 4.5). Для возможности сравнения результатов, полученных при испытании N образцов, производится обработка накопления, как усредненных, так и суммарных параметров для N проведенных испытаний в едином масштабе.

Как отмечено выше, при исследовании процессов трения, важным является анализ кинетики протекания разрушения поверхностных слоев материалов. Параметрами, характеризующими кинетику данных процессов, являются

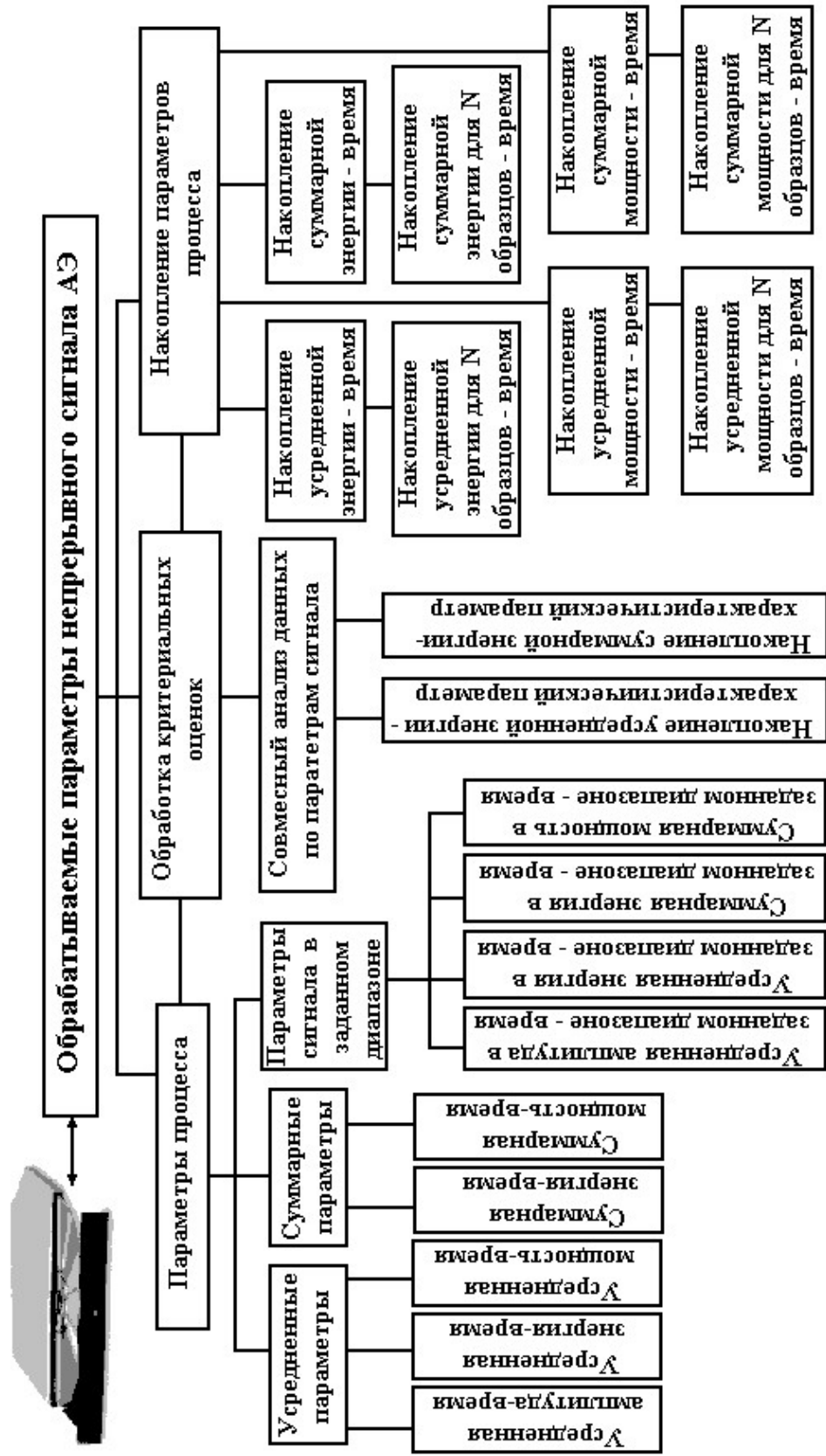


Рис. 4.5 Обрабатываемые и анализируемые параметры для непрерывного сигнала акустической эмиссии

параметры, накапливаемые во времени. Однако возможно проводить анализ процессов накопления параметров АЭ во временном сечении в зависимости от характеристического параметра [92], в качестве которого могут использоваться, например, нагрузка, прикладываемая к паре трения, поверхностные напряжения, контактные температуры и другие. Использование такого анализа, как показывают исследования [92], позволяет получать кинетические закономерности изменения параметров регистрируемого результирующего сигнала АЭ. На их основании возможно разрабатывать оценки состояния узлов трения и оценки опасности процессов, развивающихся в поверхностных слоях материалов.

4.3 Структура параметров контроля состояния и управления приборной системой

Управление устройствами, входящими во внутреннюю часть системы, обработка результатов измерений, а так же вывод данных, как было отмечено выше, осуществляется только программными средствами. Для этих целей используются параметры, значения которых являются постоянными или формируются для выполнения определенных операций (рис. 4.6). В первую очередь, это относится к параметрам управления устройствами (рис. 4.2), которые обеспечивают преобразование и ввод информации в ПК (ПВВ), ее хранение (НМГ), а так же вывода графических зависимостей изменения параметров (монитор) регистрируемых сигналов АЭ.

Параметры управления ПВВ формируется на физическом и логическом уровнях (рис. 4.6). Физический уровень обеспечивается установками определенных переключателей на ПВВ, формирующих требуемую конфигурацию взаимосвязей его элементов для выбора заданных режимов работы. Фактически, физический уровень определяет предельные значения входных и выходных параметров ПВВ с заданной конфигурацией его элементов. К таким параметрам относятся параметры, задающие диапазон входных измеряемых напряжений, формат выходного кода АЦП, одноканальный или дифференциальный режимы работы, а так же базовый адрес, необходимый для распознавания ПВВ в

адресном пространстве ПК и некоторые другие. Логический уровень обеспечивает установку параметров, предназначенных для формирования слов управления, задающих необходимые режимы работы ПВВ. К данным параметрам относятся следующие: номер канала (номера каналов) для ввода информации в ПК, коэффициент усиления, уровень прерывания и другие.



Рис. 4.6 Массивы параметров для контроля состояния и управления системой

Параметры, устанавливаемые на физическом уровне, являются неизменными, а на логическом уровне – могут изменяться. Данные параметры необходимы не только для формирования управляющих команд, но и для контроля состояния системы в процессе выполнения различных операций. Они хранятся в качестве постоянных параметров в логическом массиве (базе) параметров состояния системы, который предназначен, как для чтения, так и записи.

При проведении кратковременных испытаний результаты преобразования входного непрерывного сигнала АЭ, как было отмечено выше (рис.4.1), записываются на физическом уровне построения магнитного носителя. Для управления записью информации с возможностью ее последующего чтения

используются параметры, формируемые на логическом уровне. К таким параметрам относятся номер логического диска для записи информации и его объем, начальный номер сектора на логическом диске и объем блока информации (количество секторов) для одновременной записи информации. Данные параметры так же хранятся в качестве постоянных параметров в логическом массиве (базе) параметров состояния системы, который предназначен, как для чтения, так и записи.

В качестве постоянно хранимых параметров используются чувствительность на единицу младшего разряда АЦП и интервал дискретизации. Они имеют размерность, соответственно, милливольты и микросекунды. Данные параметры характеризуют работу АЦП и предназначены для привязки регистрируемого АЭ процесса к амплитудно-временным характеристикам. Чувствительность на единицу младшего разряда и интервал дискретизации используются во всех операциях обработки результатов измерений, выводе зависимостей изменения параметров АЭ во времени с формированием необходимых шкал вывода. Параметры формируются на логическом уровне и могут изменяться, т.е. предназначены для чтения и записи.

При чтении параметров состояния системы, предназначенных для управления ее внутренними устройствами, формируются массивы, которые содержат команды (слова) управления. Данные массивы формируются при загрузке программного комплекса до выполнения любых операций в системе и могут изменяться при изменении параметров состояния системы. Их предварительное формирование обусловлено необходимостью сокращения времени на обработку операций управления. Массивы команд управления являются временными. По завершении работы программного комплекса и выходе в операционную среду данные массивы не сохраняются.

Параметрами состояния системы, которые используются при управлении операциями обработки данных и вывода их результатов на экран монитора, являются параметры условий испытаний (рис. 4.6). Они различны для условий кратковременных и длительных испытаний.

При проведении кратковременных испытаний время испытаний T_{II} является основой для определения граничных значений времени усреднения и параметров шкал вывода для построения зависимостей изменения характеристик акустического излучения во времени. В первую очередь это относится к граничным значениям времени усреднения, которое определяется в автоматическом режиме с учетом ограничения, как на объем логического диска для записи информации, так и на объем формируемого логического массива данных по результатам обработки. При известном (заданном) значении времени испытаний T_{II} и интервале дискретизации Δt определяется максимальный объем вводимой информации V_{\max} , который не должен превышать максимальный объем логического диска V_D для записи информации (рис. 4.7, а). Если выполняется соотношение $V_{\max} \leq V_D$, то при заданном значении количества интервалов для обработки или объеме логического массива V_D , формируемого по результатам обработки данных, определяется объем порции информации для проведения усреднения V_τ . При этом максимальный объем логического массива данных не может превышать 32768 слов (65536 байт). Тогда, с учетом интервала дискретизации определяется время усреднения, которое рассчитывается в соответствии с выражением $\tau_{y\min} = V_\tau \cdot \Delta t$. Данное время усреднения является граничным минимальным значением, которое можно использовать при обработке результатов испытаний и может изменяться только в сторону увеличения. Время усреднения и объем массива данных используются при расчетах шкал вывода зависимостей изменения параметров АЭ во времени. При заданном размере графического экрана вывода по оси X и по оси Y , который принимается по умолчанию, с учетом времени усреднения $\tau_{y\min}$ определяется время усреднения для графического окна вывода $\tau_{y\text{гр}}$. Данное время усреднения является переменным и может изменяться при обработке графических зависимостей изменения параметров АЭ излучения, т.е. при использовании “лупы”, позволяющей расширять (растягивать) требуемый фрагмент зависимостей в пределах окна вывода.

Таким образом, при проведении кратковременных испытаний параметры T_n и V_d являются параметрами условий испытаний, которые характеризуют состояние системы и используются при обработке данных. Они хранятся в массиве параметров состояния и предназначены для записи и чтения.

В процессе проведения длительных испытаний, как было отмечено выше, производится обработка и вывод результатов на экран монитора в реальном масштабе времени. При этом вывод осуществляется с использованием двух графических окон: промежуточный, для представления текущих результатов на заданном отрезке времени, и основной, для представления результатов за весь период испытаний. В данном случае, время испытаний T_d и скорость вращения пары трения ν_0 является основой для определения граничных значений времен усреднения, объемов массивов данных (вводимых в ПК, усредненных для промежуточного окна вывода и усредненных для основного окна вывода) и параметров шкал вывода при построении зависимостей изменения характеристик акустического излучения во времени (рис. 4.7, б). В первую очередь это относится к граничным значениям времен усреднения с учетом ограничения объемов формируемого логического массива данных по результатам обработки.

При известной (заданной) скорости вращения пары трения ν_0 производится расчет времени усреднения τ_{y1} за один оборот, которое используется при выводе результатов в промежуточное окно вывода. Исходя из этого, с учетом интервала дискретизации Δt , определяется максимальный объем вводимой информации V_1 за один оборот вращения пары трения, который не должен превышать максимально допустимый объем V_{\max} (рис. 4.7, б). Значение V_{\max} принимается по умолчанию, а его максимальная величина составляет 32768 слов (65536 байт). При невыполнении соотношения $V_1 \leq V_{\max}$ необходимо производить изменение условий испытаний пары трения – изменять либо интервал дискретизации входного акустического процесса, либо изменять скорость вращения пары трения.

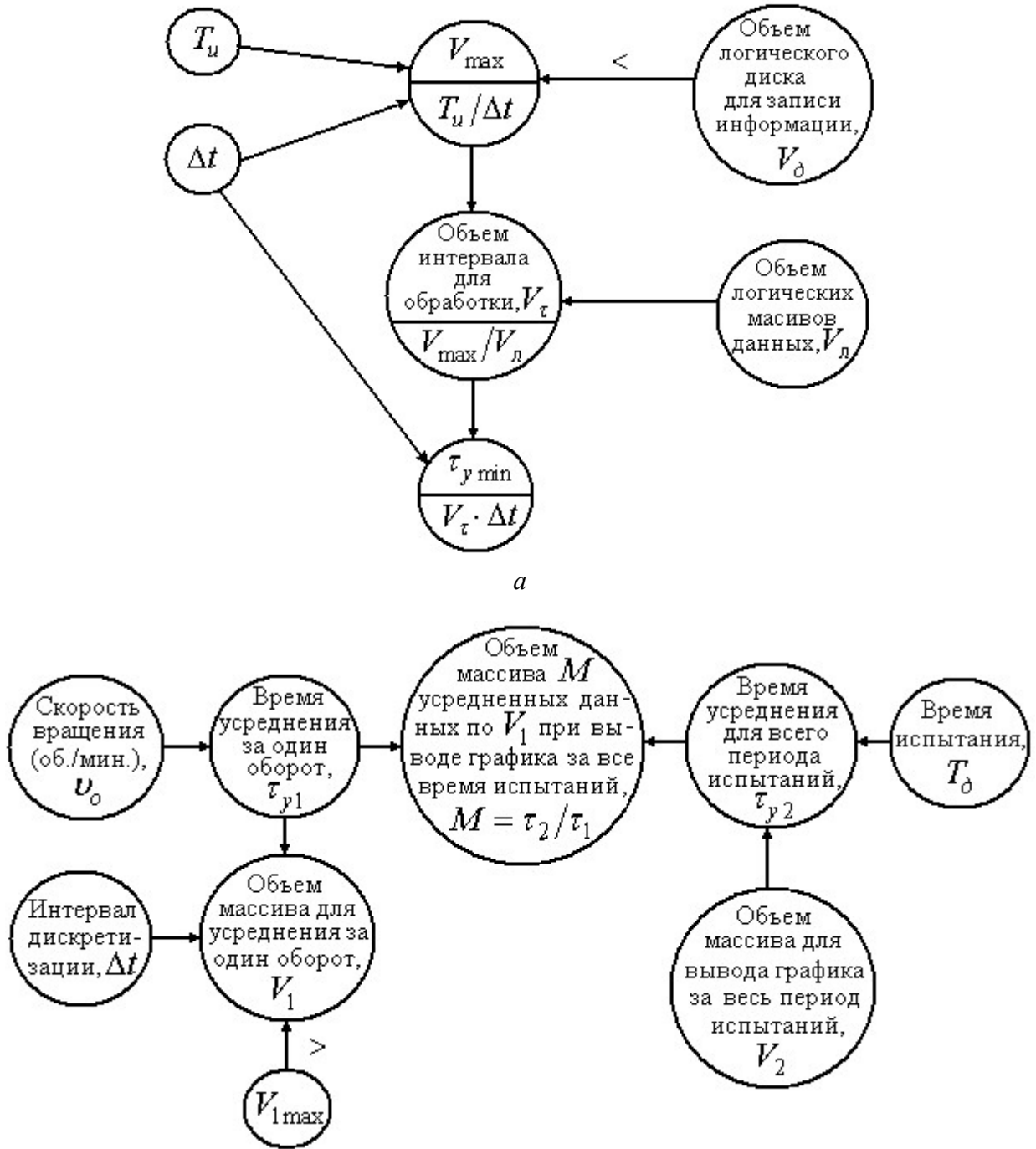


Рис. 4.7 Определение границ интервала усреднения при проведении кратковременных (а) и длительных испытаний (б)

Вторым важным условием длительных испытаний является время проведения испытаний $T_{\text{д}}$. При известном его значении и заданном объеме массива данных V_2 , который используется для построения зависимости изменения параметров АЭ за все время испытаний в основном окне вывода, производится расчет времени усреднения τ_{y2} для обработки результатов за весь период испытаний. Объем массива V_2 принимается по умолчанию, а его

максимальная величина не может превышать 32768 слов (65536 байт). Времена усреднений τ_{v_2} и τ_{v_1} используются для расчета объема массива M , который предназначен для усреднения данных из промежуточного окна вывода (усредненных по объему V_1) для формирования массива объемом V_2 и вывода результата на экран монитора.

Таким образом, при проведении длительных испытаний параметры v_0 , T_d и V_2 являются параметрами условий испытаний, которые характеризуют состояние системы и используются при обработке данных. Они хранятся в массиве параметров состояния и предназначены для записи и чтения.

Как при кратковременных, так и при длительных испытаниях по параметрам условий испытаний, хранящихся в массиве параметров состояния системы, формируются массивы промежуточных (временных) параметров, которые используются при регистрации непрерывного сигнала АЭ и его обработке. По завершении испытаний массивы временных параметров не сохраняются.

Параметры состояния системы, как было отмечено выше, используются для управления электронными элементами системы и при обработке данных. По их значениям формируются команды управления, которые имеют различный формат или тип описания данных. При этом используется числовое представление команд управления в виде десятичных чисел со знаком (integer), восьмеричных (octal) и шестнадцатеричных (hexadecimal) чисел без знака, а так же чисел с плавающей точкой (float) (рис. 4.8). Для предотвращения возникновения ошибок при чтении или записи параметров состояния системы, а так же формировании слов управления целесообразно использовать единый массив данных, который формируется в едином формате представления чисел. Данным форматом является формат типа float, т.е. с плавающей точкой. При записи параметров состояния, в соответствии с порядком их расположения в массиве данных, используются процедуры преобразования соответствующего типа переменных (integer, octal, hexadecimal) в переменные типа float (рис. 4.8).

При чтении параметров состояния, в соответствии с порядком их расположения в массиве данных, применяются процедуры преобразования переменных типа float в соответствующий тип переменных (integer, octal, hexadecimal). Значения результата преобразования используются в требуемых операциях формирования и передачи команд для управления, как электронными элементами системы, так и при выполнении обработке данных.

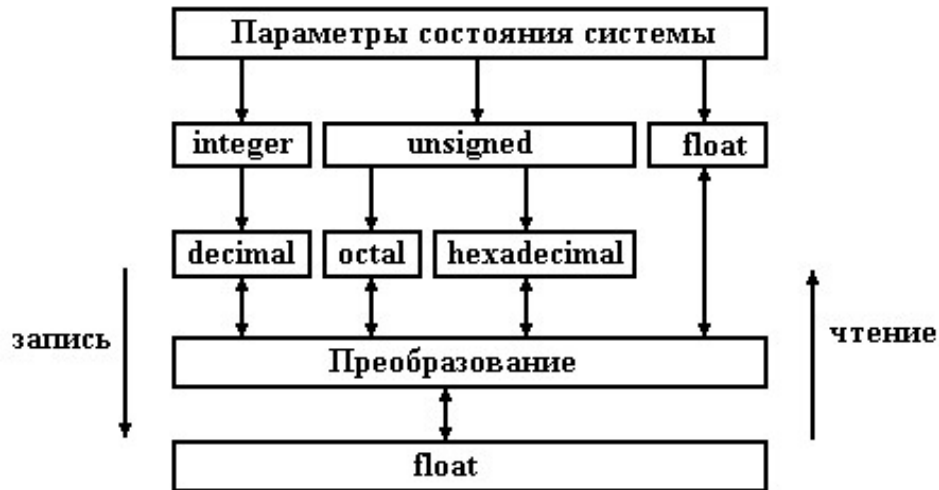


Рис. 4.8 Формат параметров состояния системы

К дополнительным параметрам, которые не используются при управлении системой, относятся сервисные параметры. Они хранятся в массиве, который предназначен для формирования протокола испытаний. К данным параметрам могут относиться: дата проведения испытаний; материал поверхностей узла трения; режимы испытаний и другие. Параметры привязываются к массивам данных по результатам испытаний конкретного узла трения и представляют собой протокол испытаний, который выводится на экран монитора при построении зависимостей изменения характеристик зарегистрированного акустического излучения. Массив дополнительных параметров или массив протокола испытаний, является массивом строковых констант, т.е. имеет формат типа "char". Он предназначен, как для чтения, так и записи.

Параметры состояния, хранящиеся в постоянном массиве данных, используются при управлении и контроле устройств системы на физическом и логическом уровнях в процессе выполнения операций измерения сигналов АЭ, обработки данных и представления результатов анализа.

4.4 Структура логики управления приборной системой

Логика контроля и управления диагностической системой, а так же управление обработкой данных базируются на формировании и передаче информационных потоков (ИП). Направление и приоритетность прохождения ИП определяются их назначением (рис. 4.8). Условно в системе можно выделить три основные группы ИП: управляющие ИП; ИП измерительной информации; ИП контроля состояния. Данные ИП в различных комбинациях формируются в программной среде системы, как при проведении кратковременных, так и длительных испытаний узлов трения.

Обмен ИП в системе (передача ИП) осуществляется последовательным образом. При этом приоритетной группой ИП являются потоки управления. Они используются для управления режимами работы ПВВ при проведении измерений (рис. 4.8), управления накопителем на магнитном диске на физическом уровне его построения при записи и чтении данных, управления экраном монитора при выводе информации или результатов, а так же управления операциями обработки данных. При выполнении всех операций в системе, включая и операции формирования графических интерфейсов и мини интерфейсов, ИП управления предшествуют всем остальным ИП, т.е. они являются первичными. После прохождения ИП управления формируются и передаются все остальные ИП.

Второй группой ИП являются потоки измерительной информации (рис. 4.8), которые формируются по результатам измерений входных сигналов АЭ, при чтении данных, записанных на физическом уровне построения накопителя на магнитном диске, при выводе результатов обработки на экран монитора или печатающее устройство. Потоки, формируемые при чтении накопителя на магнитном диске, используются только при проведении кратковременных испытаний, так как при длительных испытаниях используется непосредственная обработка результатов измерений с их выводом на экран монитора.

Потоки контроля состояния (рис. 4.8) являются третьей группой ИП в системе. К ним можно отнести: ИП параметров состояния системы, ИП

протокола испытаний; ИП выполнения операций обработки данных. Потoki параметров состояния системы формируются, как при выполнении операций записи, так и чтения. В первом случае, они используются при создании и изменении значений массива параметров состояния системы. Во втором случае, при выводе значений параметров состояния на экран монитора. Аналогичным образом производится формирование и использование ИП протокола испытаний. Запись значений - при создании и изменении массива параметров протокола испытаний, а чтение – при выводе значений параметров на экран монитора.

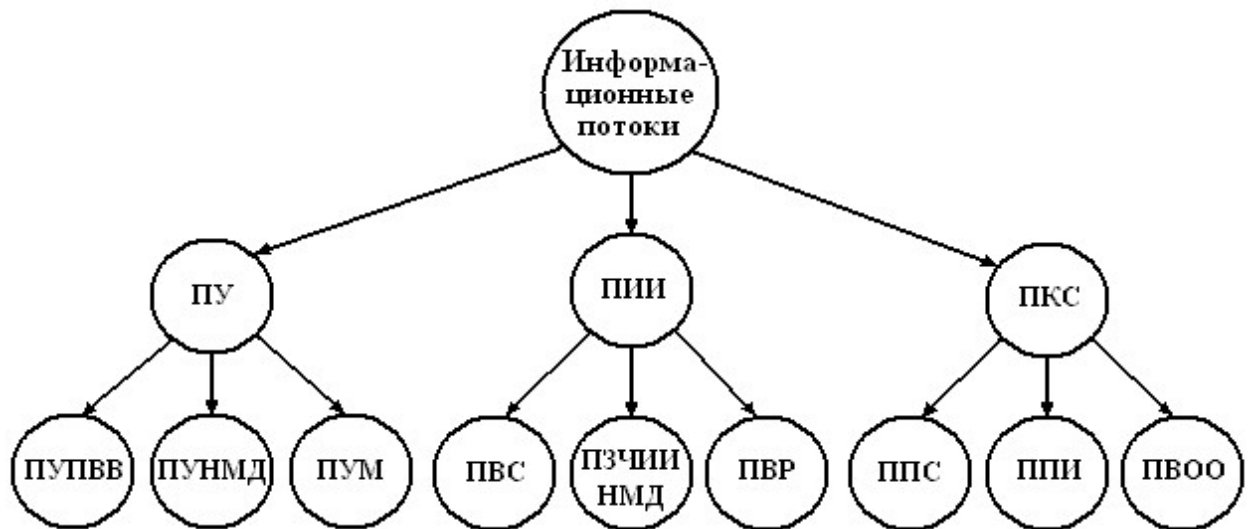


Рис. 4.8 Информационные потоки, формируемые в диагностическом комплексе, при выполнении операций измерения, обработки и анализа данных, а так же представления их результатов: ПУ – потоки управления; ПУПВВ – поток управления портом ввода-вывода; ПУНМД – поток управления накопителем на магнитном диске; ПУМ – поток управления монитором; ПИИ – потоки измерительной информации; ПВС – поток входных сигналов; ПЗЧИИ НМД - поток записи и чтения измерительной информации, хранящейся на накопителе на магнитном диске; ПВР – поток вывода результатов; ПКС – потоки контроля состояния; ППС – поток параметров состояния; ППИ – поток протокола испытаний; ПВОО – поток контроля выполнения операций обработки

Следует отметить, что массивы параметров состояния системы и протокола испытаний используются и при обработке результатов измерений и формировании массивов данных. Они имеют специальную привязку к массивам результатов обработки измерений и сохраняются совместно с ними после проведения испытаний. Наличие такой привязки позволяет осуществлять контроль за параметрами условий, при которых были проведены испытания. Они используются при вторичной обработке данных и, фактически, это обеспечивает формирование паспорта проведенных испытаний.

Выделенные группы ИП, в различных комбинациях, формируются при выполнении практически всех операций в системе. При этом существует строгая последовательность их прохождения. Приоритетными потоками являются потоки управления. Они предшествуют всем остальным потокам, т.е. являются первичными. После загрузки и выполнения команд управления создаются вторичные потоки, которые формируются и передаются в последовательности, которая определяется назначением выполняемых операций. При этом наличие единых базовых элементов (ПВВ, устройства ПК – оперативное запоминающее устройство, накопитель на магнитном диске, монитор и другие) позволяет формировать и единые принципы (логику) управления диагностическим комплексом. В основе логики управления лежит формирование и передача ИП. При проведении кратковременных и длительных испытаний большинство ИП практически сохраняются неизменными, за исключением тех потоков, которые определены различиями в операциях, реализующих принципы построения диагностических комплексов для заданных условий испытаний пар трения. Логика управления комплексом при проведении кратковременных и длительных испытаний пар трения показана, соответственно, на рис.4.9 *а, б*. При этом выполнение всех операций в системе осуществляется с использованием программного математического комплекса. Рассмотрим общие принципы построения логики управления, которая реализуется через интерфейс управления загрузкой отдельных операций на исполнение.

В первую очередь рассмотрим логику управления диагностическим комплексом при проведении кратковременных испытаний. Всю логику управления условно можно разбить на три уровня. Отметим, что ИП рассматриваются относительно программной оболочки. Поэтому, по умолчанию принято, что при вводе информации формируются выходящие ИП, а при выводе информации из оболочки формируются входящие ИП.

Логика управления первого уровня реализуется на начальном этапе управления комплексом. Это обусловлено тем, что исходными условиями управления устройствами системы и операциями обработки являются параметры

состояния, хранимые в постоянных массивах данных. На данном уровне производится формирование выходного ИП параметров состояния (ПС) с использованием клавиатуры (рис. 4.9, *a*), в соответствии с принятым форматом (рис. 4.8). После проведения преобразования введенных данных на выходе ОЗУ формируется входной ИП с единым форматом параметров управления (ПУ), которые сохраняются в логическом массиве данных и в памяти ПК. Аналогичным образом на первом уровне производится и формирование протокола испытаний (ПИ, рис. 4.9, *a*). Потоки первого уровня не являются управляющими, а представляют собой потоками данных.

При проведении измерений и обработке результатов реализуется логика управления второго уровня (рис.4.9, *a*), которая обеспечивает формирование и передачу, как управляющих ИП, так и ИП данных. На втором уровне производится управление элементами системы на физическом и логическом уровнях их построения, а так же управление операциями обработки данных. Потоки управления являются приоритетными и предшествуют потокам данных. Работа комплекса при проведении испытаний начинается с чтения логического массива ПС и формирования выходного ИП данных (рис.4.9, *a*), который передается в ОЗУ. После преобразования данных в формат, в соответствии с форматами управляющих команд, осуществляется формирование входного потока ПУ (1, рис.4.9, *a*), предназначенного для загрузки и запуска АЦП ПВВ. При этом в процессе работы ПВВ формируется внутренний выходной ИП состояния, который через ОЗУ трансформируется во входной ИП ПУ (2, рис.4.9, *a*), поступающий в регистры управления ПВВ. Работа АЦП ПВВ обеспечивает формирование выходного ИП данных, соответствующих цифровому представлению преобразованного входного аналогового сигнала (входного процесса), который поступает в ОЗУ. При достижении определенного объема информации производится формирование двух ИП. Первым формируется и передается ИП управления НМД (3, рис.4.9, *a*), а затем - поток данных, который записывается на физическом уровне построения НМД. По окончании процесса записи информации, в соответствии с ИП ПУ (3, рис.4.9, *a*), осуществляется

последовательное чтение НМД, формирование ИП данных и их передача в ОЗУ. Одновременно в ОЗУ поступает ИП ПУ обработкой данных (4, рис.3.9, *a*), выходной поток ПС системы и выходной поток ПИ (рис.4.9, *a*). Обработка данных заканчивается формированием и передачей входного ИП для записи логических массивов результатов обработки по параметрам входного процесса (ЛМД, рис.4.9), а так же привязанные массивы ПС системы и ПИ.

На третьем уровне логики управления осуществляется вывод и представление результатов обработки данных, ПС системы и ПИ. При загрузке требуемых операций вторичной обработки данных производится чтение ЛМД (рис.4.9, *a*) с формированием выходного ИП результатов первичной обработки, а так же привязанных ПС системы и ПИ. После вторичной обработки данных формируются два входных ИП. Первичным является ИП управления монитором (5, рис.4.9, *a*), а вторичным является поток данных – результаты обработки параметров сигналов АЭ, ПС и ПИ. На данном уровне так же осуществляется независимый вывод на экран монитора ПС и ПИ. При чтении текущего массива ПС системы производится формирование выходного потока поступающего в ОЗУ. После проведения преобразования параметров в соответствующие форматы данных формируются два входных ИП: поток управления монитором (6, рис.4.9, *a*) и поток данных. Аналогичным образом формируются ИП при выводе ПИ, т.е. чтение массива с параметрами ПИ, преобразование формата и формирование двух потоков: потока управления монитором (7, рис.4.9, *a*) и потока данных.

Логика управления операциями обработки данных строится аналогичным образом, т.е. имеет многоуровневую организацию. При этом формируются специфические ИП управления, которые определяются выполняемыми операциями обработки данных – обработка усредненной энергии или суммарной энергии, чтение данных для группы выполняемых операций по вводимому имени

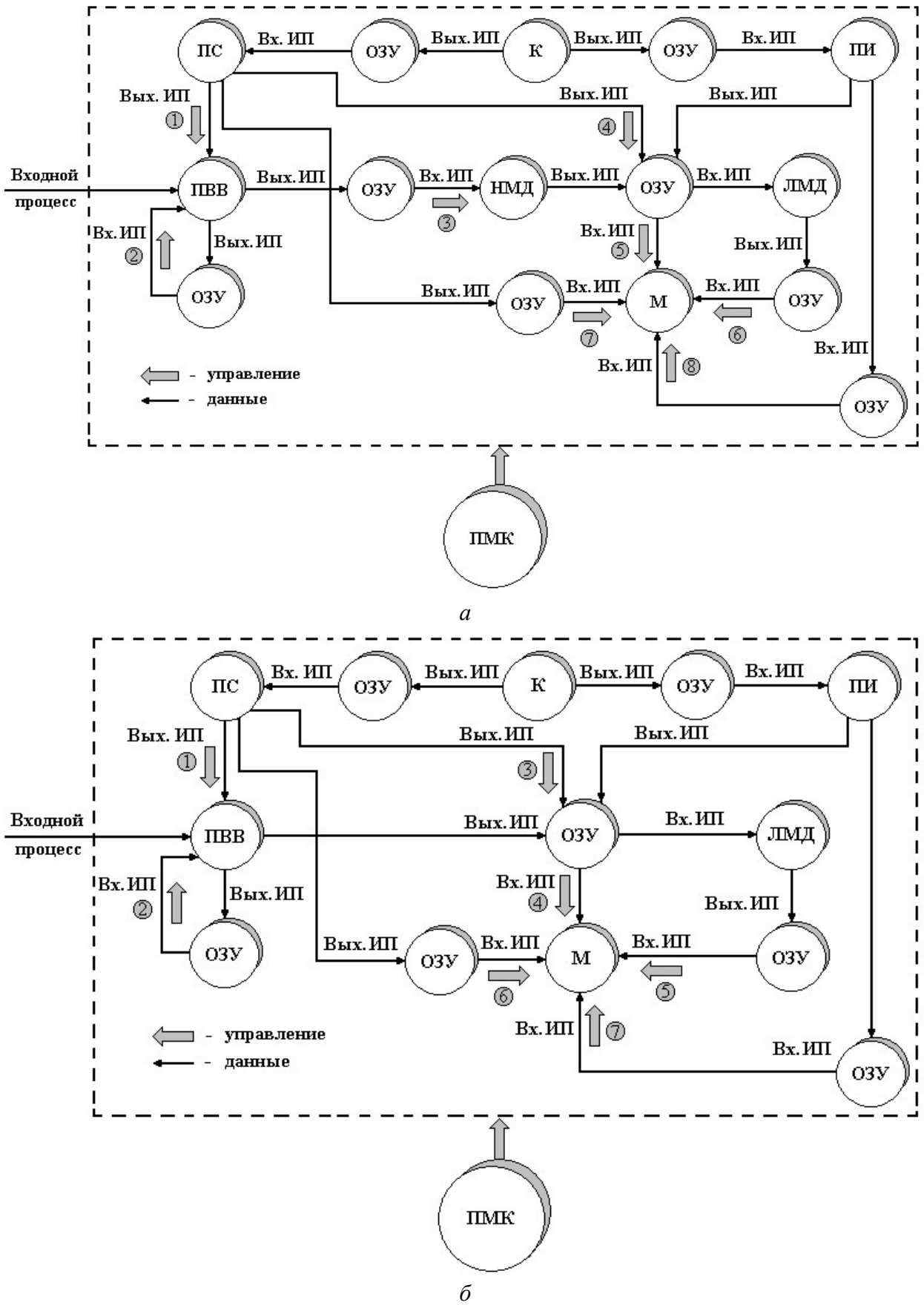


Рис. 4.9 Логика управления диагностическим комплексом при проведении кратковременных испытаний: ПС – параметры состояния; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; К – клавиатура; ПИ – протокол испытаний; ПВВ – порт ввода-вывода; НМД – накопительный магнитный диск; ЛМД – логический массив данных; М - монитор

или по зарезервированному имени, хранящемуся в соответствующем массиве и т.д. Однако и в этих случаях сохраняется последовательность прохождения ИП, т.е. первичными являются потоки управления и вторичными – потоки данных.

Логика управления диагностическим комплексом при проведении длительных испытаний аналогична логике управления комплексом при проведении кратковременных испытаний, т.е. имеет трех уровневую организацию с формированием однотипных ПУ и потоков данных. Это обусловлено тем, что при проведении регистрации и обработки сигналов АЭ, а так же представлении результатов анализа используются одними и те же элементы системы. Фактически осуществляется управление одними и те же элементами системы. Отличие логики управления при проведении длительных испытаний определяется отличием концептуальной части построения системы для данного типа испытаний пар трения – обработка результатов измерений в реальном масштабе времени. Другими словами в логике управления отсутствует управление НМД на физическом уровне его построения (рис.4.9, б). При этом производится непосредственная обработка результатов измерений с формированием входного ИП управления монитором (4, рис.4.9, б) и ИП данных для построения зависимости изменения амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени. В тоже время, логические массивы параметров результирующего сигнала АЭ формируются и записываются на НМД после завершения испытаний. При этом существуют отличия и в структуре ИП управления операциями обработки результатов измерений, согласно ПС системы, которые рассмотрены ранее. Назначение и последовательность прохождения всех остальных ИП практически остается без изменения.

Таким образом, наличие единых базовых элементов диагностического комплекса позволяет формировать единую логику управления комплексами, как при проведении кратковременных, так и при проведении длительных испытаний. При этом различия в логике управления являются минимальными и определяются различиями концептуальной части системы (рис. 4.1) – использование физического уровня построения НМД при проведении

кратковременных испытаний и его отсутствие при проведении длительных испытаний пар трения. Использование единой логики управления комплексом, в полной мере, позволяет формировать и единую логику управления обработкой данных, т.е. формировать единое программное обеспечение, с учетом различий в структуре ПУ и данных.

4.5 Программное обеспечение акусто-эмиссионной системы диагностики состояния объектов

Контроль за состоянием диагностического комплекса, управление операциями измерения, обработки данных и представления результатов, как было отмечено выше, осуществляется с использованием единой оболочки. При этом, не смотря на различия концептуальной части систем для проведения кратковременных и длительных испытаний пар трения (рис.4.8), логика управления системами (рис.4.9, а, б) имеет минимальные отличия друг от друга, которые связаны с операциями записи и первичной обработки входной информации. Наличие общих операций в логике управления позволяет формировать единую структуру программного обеспечения с учетом различий в концептуальной части систем.

В соответствии с общей логикой управления (рис.4.9, а,б) при построении программного обеспечения исходили из того, что в системах можно выделить две группы функциональных операций, которые определим исходя из представления единого интерфейса управления. Первая группа - внутренние операции, которые выполняются в пределах оболочки. Другими словами, формирование и последовательное выполнение “материнского” и “дочернего” процессов производится без выхода из оболочки (рис.4.10,а). Вторая группа – внешние операции, которые выполняются с выходом из оболочки. Т.е, формирование и выполнение “материнского” процесса осуществляется в пределах оболочки, а “дочернего” процесса - с выходом из оболочки (рис.4.10,б). При выходе из оболочки формируются параметры точки выхода, которые по завершении “дочернего” процесса используются в качестве точки возврата в “материнский”.

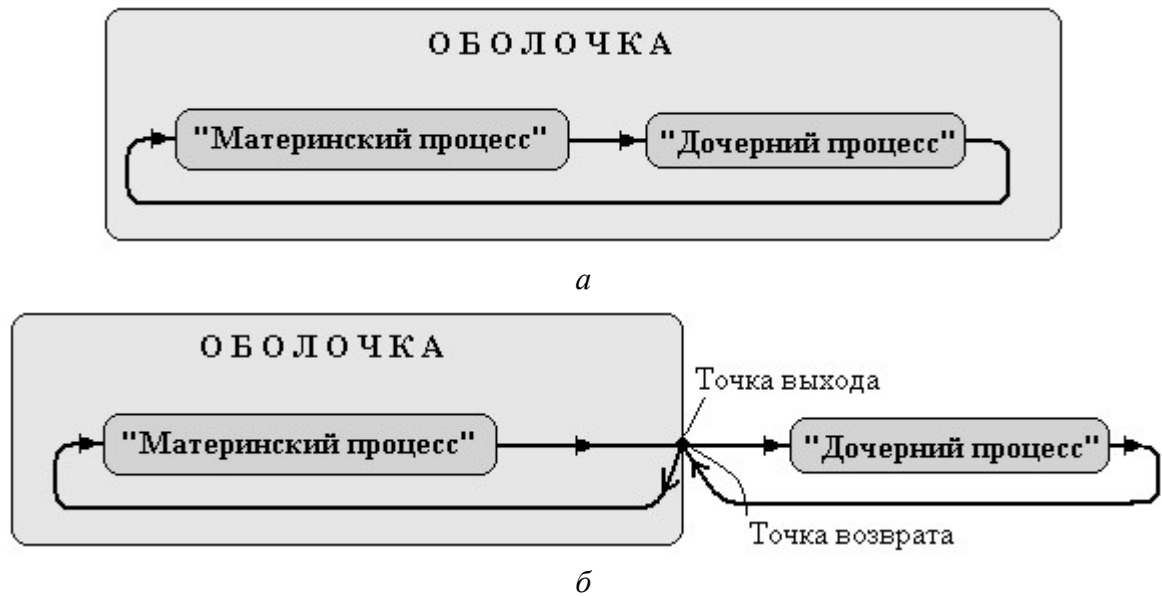


Рис. 4.10 Формирование и выполнение внутренних (а) и внешних операций (б)

Таким образом, в структуре программного обеспечения выделяются две группы функциональных операций, которые загружаются на исполнение с использованием панелей инструментов общего интерфейса управления (рис.4.11). В дальнейшем, для каждой панели инструментов формируется разветвленная структура, которая имеет многоуровневую архитектуру. На каждом уровне архитектуры существует строгая последовательность формирования переходов. При загрузке панели инструментов I уровня для заданной операции, например, панели А-1 (рис.4.11), производится формирование мини интерфейса управления А-1 с панелями инструментов (А-1-1, А-1-2,....А-1-К, рис.4.11), позволяющими загружать на исполнение одну из операций основной панели, которые реализуются с использованием соответствующий панелей инструментов II уровня. В дальней-шем структура программного обеспечения и формирование переходов осуществляется аналогичным образом (рис.4.11).

Однако для внутренних и внешних операций структура программного обеспечения и формирование переходов совпадают только на первом и втором уровнях архитектуры. Для внешних операций при загрузке любой панели инструментов II уровня, например, панели В-1-1 (рис. 4.11), производится выход из оболочки с загрузкой внешнего “дочернего” процесса. Вызов внешнего

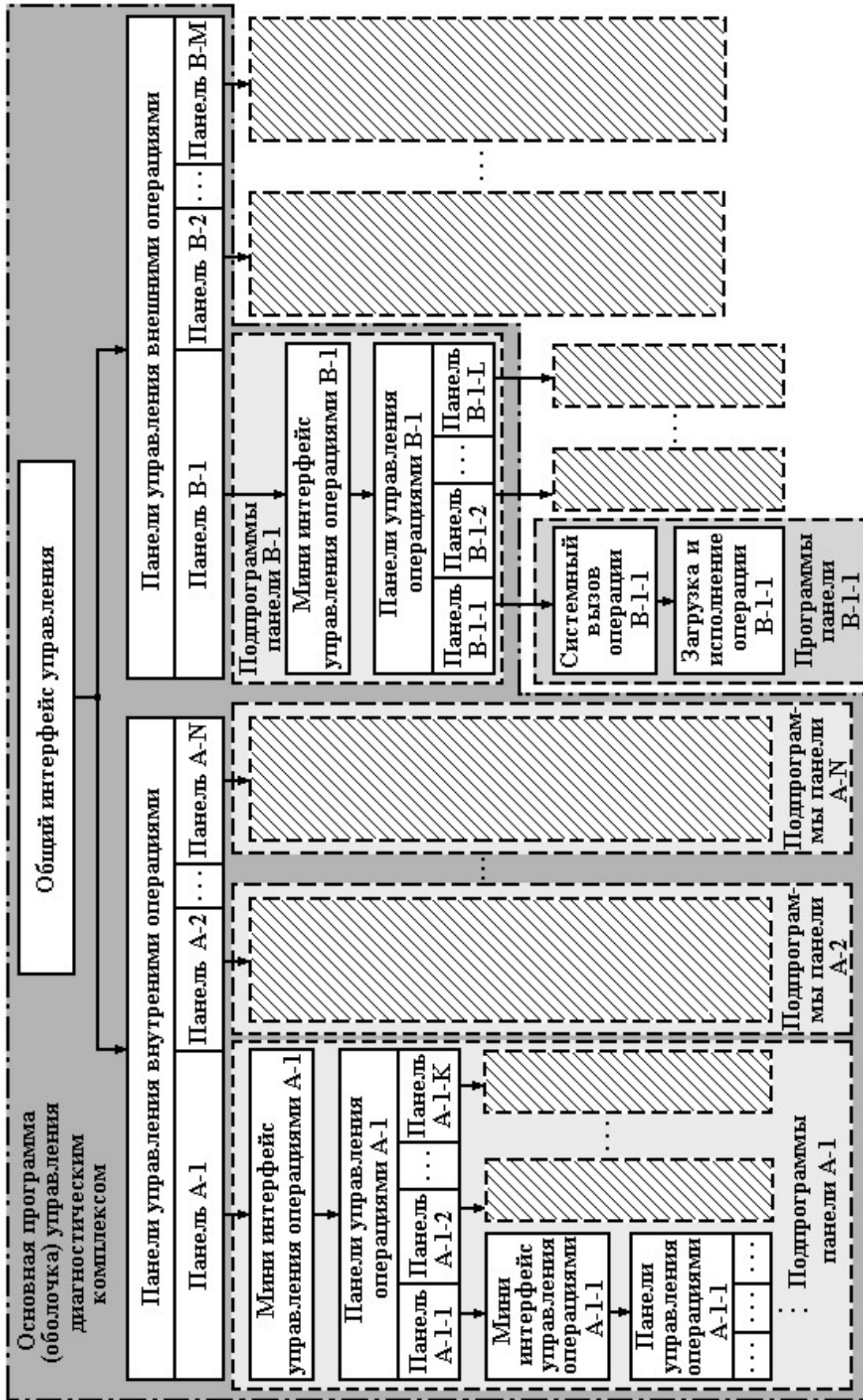


Рис. 4.11 Структура программного математического комплекса

дочернего процесса осуществляется с использованием функции системного вызова – функции “SYSTEM()”. Данная функция обеспечивает вызов вторичной копии оболочки “COMMAND.COM”, которая готовит все нужные параметры для функции DOS “EXEC”, выдает прерывание и обеспечивает загрузку на выполнение независимого модуля, вызываемого панелью инструментов В-1-1. Другими словами вычислительный процесс развивается по стандартной схеме, которая показана на рис. 4.12.

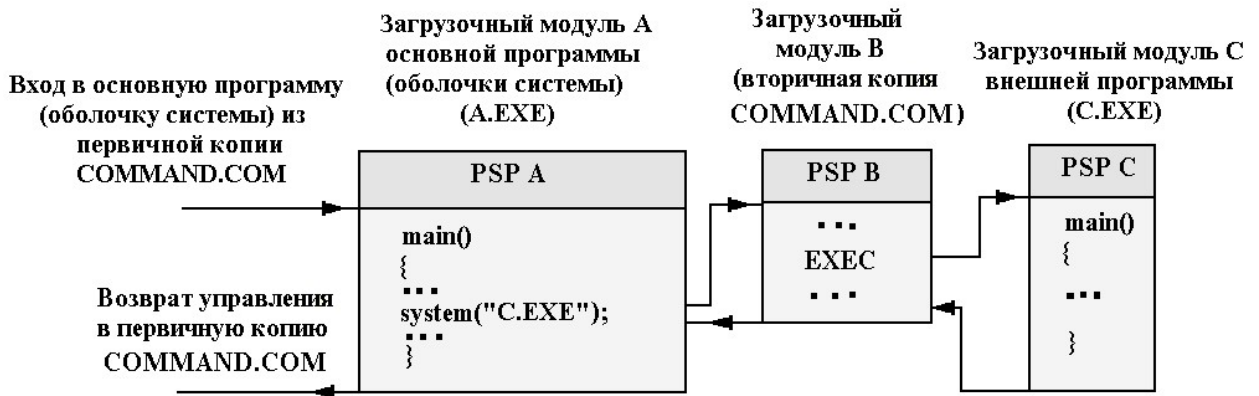


Рис. 4.12 Вычислительный процесс с последовательной динамической структурой: PSP – префикс сегмента программы (специальный управляющий блок)

При загрузке основной программы (оболочки управления диагностическим комплексом) A.EXE из командной оболочки COMMAND.COM производится формирование специального управляющего блока (PSP A), настройка адресов программы и ее выполнение. При загрузке из пределов основной программы (A.EXE) другой программы, т.е. из программы “предка” программы “потомка”, производится загрузка вторичной копии COMMAND.COM с передачей управления функции DOS “EXEC”, которая выполняет следующие действия: - производит распределение всей доступной памяти для загружаемой программы С.EXE; - строит специальный управляющий блок (PSP C); - производит загрузку программы С.EXE с настройкой адресов; - вызывает загруженную программу на исполнение и при ее завершении производится возвращение управления в EXEC, а затем в программу “предок”.

Не смотря на то, что использование системного вызова (“SYSTEM()”) приводит к потерям времени, связанным с поиском и загрузкой вторичной копии COMMAND.COM, а так же дополнительному расходу памяти компьютера, такой

подход позволяет произвести уменьшение объема основной программы (оболочки управления диагностическим комплексом), произвести перераспределение всех выполняемых операций на функциональные группы (внутренние и внешние), с учетом их назначения. С данных позиций, программное обеспечение (рис. 4.11) состоит из основной программы или оболочки управления диагностическим комплексом, подпрограмм, реализующих внутреннюю группу функциональных операций, и независимых программ, реализующих внешнюю группу функциональных операций. Подпрограммы, как было отмечено выше, выполняются в пределах оболочки, а независимые программы выполняются с выходом из оболочки.

Работа основной программы с перемещением по иерархическим уровням архитектуры осуществляется с использованием последовательных переходов в прямом направлении, т.е. с более высокого уровня на более низкий уровень. При этом возврат с более низкого уровня на более высокий уровень осуществляется в обратном порядке и только последовательным образом. Необходимость последовательных переходов обусловлена следующим.

Переходы в прямом и обратном направлении формируются с использованием переключателей. При этом для каждого последовательного перехода создается последовательная конструкция переключателя (рис. 4.13), а на каждом последующем переходе происходит разветвление конструкции переключателя, переходы в которых формируют отдельные ветви, которые так же могут разветвляться. Такой принцип позволяет создавать сложные, многоуровневые и разветвленные структуру сети переключателей. Управление переключателями обеспечивается при помощи независимых счетчиков на каждом уровне и каждой ветви переходов. Значения счетчиков модифицируются с переходом по уровням и ветвям переключателей. При этом количество счетчиков определяется количеством переходов (рис.4.14). На каждом уровне структуры возможно осуществлять переход по требуемой ветви ветвления. Однако, контроль состояния счетчиков удобно проводить при последовательных прямых и обратных переходах в выбранной ветви (ветвь 1, ветвь 2, рис.4.14).

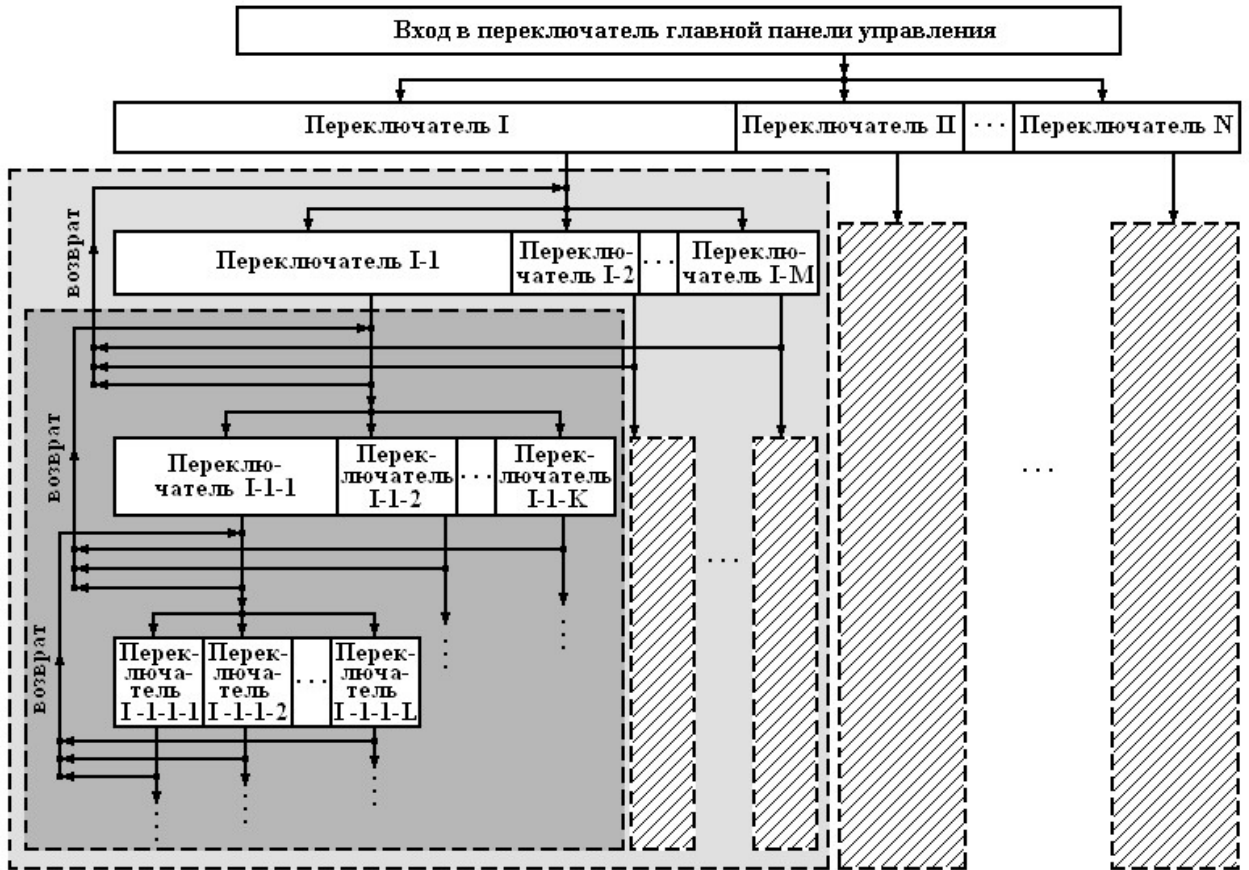


Рис. 4.13 Структура сети переключателей

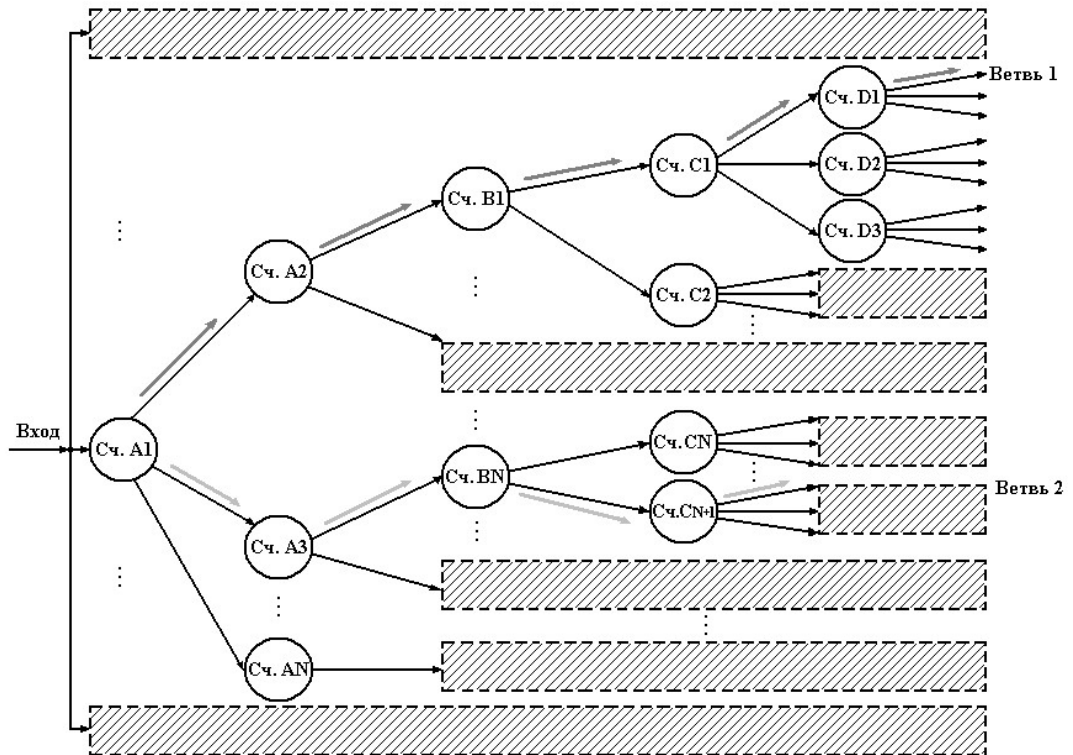


Рис. 4.14. Структура формирования счетчиков в ветвях переходов

Формирование перекрестных переходов, например, между ветвью 3 и ветвью 1, с учетом их глубины, приводит к значительному усложнению алгоритмов контроля прямых и обратных переходов, усложнению структуры общего интерфейса управления и, как следствие, дополнительному увеличению расхода памяти под код основной программы (включая и величину стека). Однако, как было отмечено выше, структура построения программного обеспечения формировалась с учетом необходимости сокращения объема основной программы управления диагностическим комплексом. Поэтому и использовалось распределение операций на функциональные группы - внутренние и внешние (рис. 4.11). Следует так же отметить, что усложнение алгоритмов может приводить к увеличению вероятности возникновения сбойных ситуаций.

4.5.1 Внутренние операции общего интерфейса управления системой

Группа внутренних функциональных операций представляет собой операции, которые связаны с параметрами управления диагностическим комплексом (параметрами состояния и протокола испытаний) и сервисными операциями. К данной группе относятся операции (рис. 4.15): изменения и контроля параметров состояния системы; изменения и контроля параметров протокола испытаний; изменения и контроля параметров калибровки системы; ввода и изменения имени файла; ввода и изменения имени диска; подсказки пользователю; сервисных операций.

Операция изменения и контроля параметров состояния системы выполняет несколько функций - осуществлять ввод, изменение, вывод и автоматическое формирование массива данных с параметрами состояния. При этом параметры вводятся в ручном режиме, а часть из них в автоматическом режиме, что обеспечивается поддержкой выполнения других внутренних операций. Такой операцией является операция калибровки системы или ПВВ по интервалу дискретизации и чувствительности на единицу младшего разряда АЦП. При выполнении данной операции производится определение параметров калибровки с автоматической заменой соответствующих значений в массиве параметров

состояния системы и его хранением на жестком диске, а так же выводом определенных значений на экран монитора.

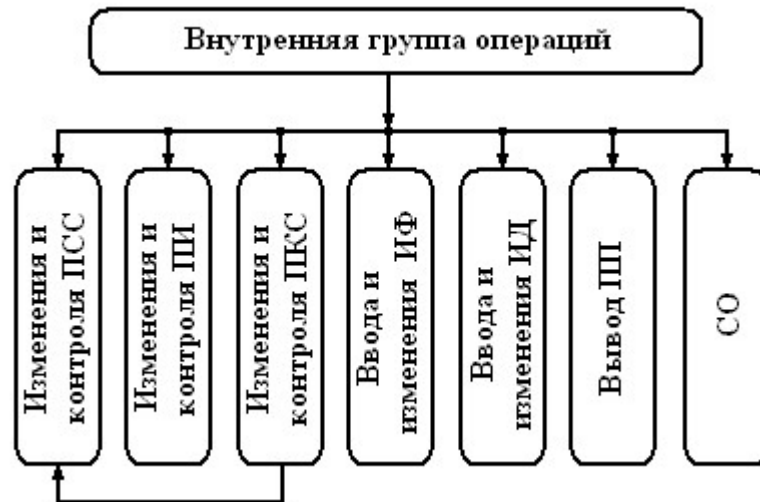


Рисунок 4.15. Структура внутренней группы операций, выполняемых в пределах оболочки. ПСС – параметры состояния системы, ПИ – протокол испытаний, ПКС – параметры калибровки системы, ИФ – имя файла, ИД – имя диска, ПП – подсказка пользователя, СО - сервисные операции.

Операция изменения и контроля параметров протокола испытаний также выполняет несколько функций - осуществляет ввод, изменение, вывод и автоматическое формирование массива данных с параметрами протокола. Параметры протокола вводятся только в ручном режиме.

Операции ввода и изменения имени файла и ввода и изменения имени диска используются для формирования специальных массивов с введенными именами. Данные имена используются в качестве автоматического ввода имени файла или имени диска при выполнении ряда операций из внешней группы - операций вторичной обработки данных и вывода результатов на экран монитора. При наличии введенных имен файла и диска производится их вывод на экран монитора для проведения контроля состояния системы. Операции работы с именами файла и диска выполняют и дополнительные функции – очистка сформированных массивов и ввод ключей для распознавания внешними операциями.

Операцию подсказка пользователю можно отнести к сервисным операциям. Однако она выделена в отдельную группу операций, так как практически реализует общую структуру построения программного

математического комплекса (рис. 4.11) с формированием переходов, сетей переключателей (рис. 4.13) и контроля состояния счетчиков (рис. 4.14). При этом формируются переходы в пределах уровня и по уровням для выбранной ветви, в соответствии с логикой управления системой. Однако существует отличие в реализации программного обеспечения, которое заключается в том, что при загрузке операций производится только вывод описания операции на экран монитора и общая система управления при работе с операцией. При выводе описания операции осуществляется чтение информации из логического массива описания всех операций в системе, который имеет постоянное хранение на жестком диске. Массив описания операций предназначен только для чтения. Такой подход позволяет проводить выполнение операции подсказка пользователю без выхода из оболочки, т.е. операция выполняется как внутренняя операция.

К внутренним операциям относятся и сервисные операции. Их наличие обусловлено тем, что при использовании общей оболочки, которая обеспечивает выполнение всех операций в системе, целесообразным является и выполнение из оболочки стандартных команд операционной системы. Другими словами, выполнение стандартных команд операционной системы необходимо осуществлять без выхода из оболочки управления системой. К таким командам относятся команды, обеспечивающие работу с файлами и дисками: копирование, удаление, переименование файлов, просмотр каталога или подкаталога диска и другие. Наличие специальных функций в языке C++ для работы с файлами и директориями позволяет формировать отдельную подгруппу операций поддерживающих выполнение необходимых стандартных команд.

В общей структуре программного обеспечения внутренняя группа функциональных операций формируется в виде подпрограмм. При этом каждая подпрограмма рассматривается как функция, реализующая определенный набор команд, которая имеет привязку к головной программе. Головная программа является приоритетной, а вызов функций (подпрограмм) и возврат в головную программу имеют строгую последовательность переходов (рис. 4.16), которая

контролируется с использованием счетчиков. Последовательность вызова подпрограмм не имеет значения. При этом подпрограммы могут вызываться из подпрограмм, что образует перекрестные ссылки и сеть переходов (рис. 4.16). Однако переходы в данной сети осуществляются последовательным образом с формированием определенной ветви, возврат из которой в головную программу, т.е. переходы в обратном направлении, соответствуют строгой обратной последовательности прямых переходов.

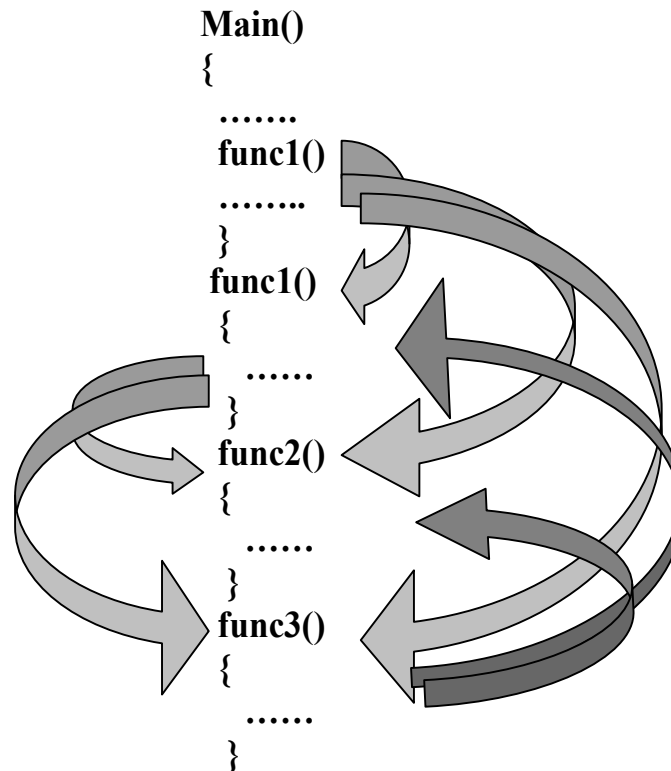
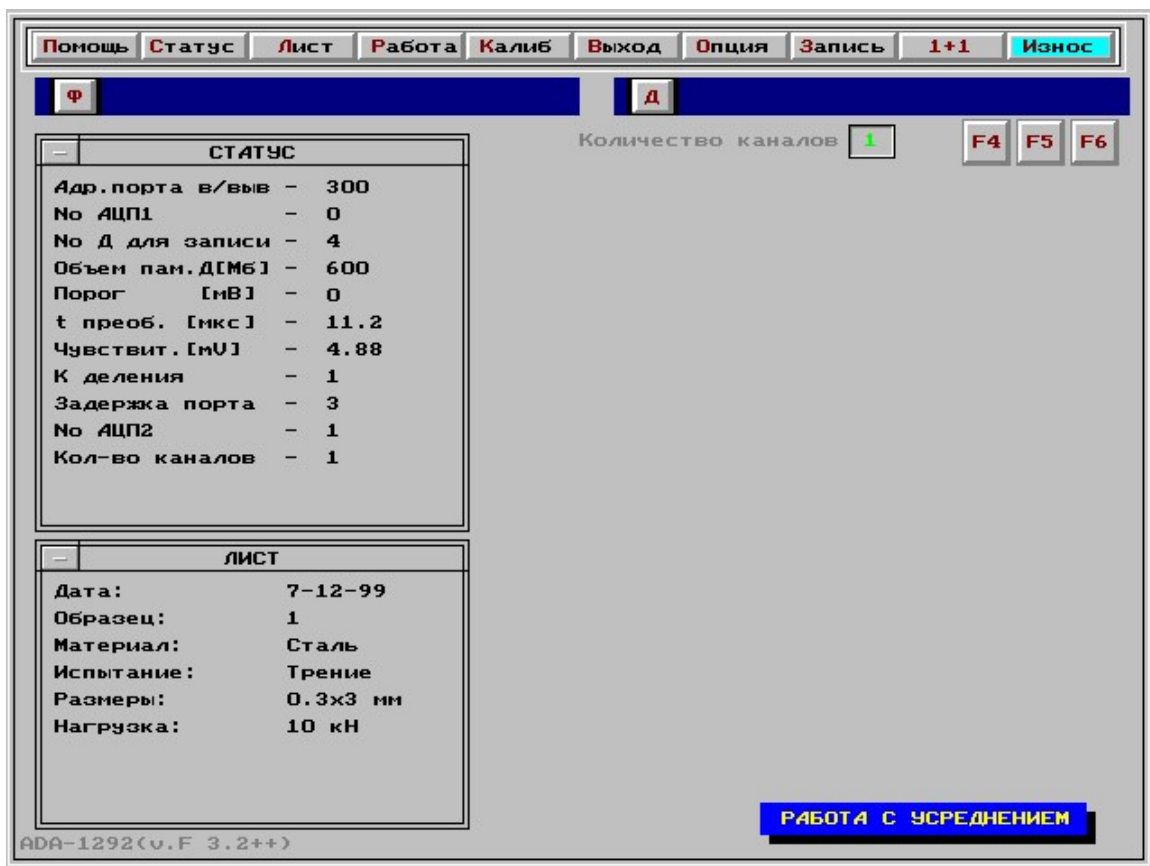


Рис. 4.16. Структура вызова подпрограмм и возврата в головную программу: Main() – головная программа; func1(), func2(), func3() - подпрограммы

С точки зрения программной реализации, вызова на исполнение каждой операции из внутренней группы операций, выполняемых в пределах оболочки, осуществляется с использованием соответствующих панелей инструментов общего интерфейса управления диагностическим комплексом (рис. 4.15). При этом панели инструментов разделены на два типа. Первый из них используется для вызова отдельных операций. При загрузке панели производится вызов операции на исполнение, а при ее завершении – возврат в общий интерфейс управления. Второй тип панелей инструментов предназначен для последующего вызова группы операций. В этом случае при загрузке панели формируется мини

интерфейс управления с перечнем операций, предназначенных для вызова на исполнение. После вызова операции и завершения работы с ней осуществляется возврат в мини интерфейс управления, а затем в основной интерфейс управления.

Фрагменты работы программного комплекса по формированию общего интерфейса управления и выполнения внутренних операций показаны на рис.4.17. На рис. 4.17, а показан общий интерфейс управления с панелями инструментов для загрузки внутренних и внешних операций. Мини интерфейс управления операциями “Помощь” пользователю, формируемый после загрузки панели инструментом “Помощь”, показан на рис. 4.17 б. На рис. 4.17 в показан результат выполнения операции, загружаемой с использованием панели “F4/F6” в мини интерфейсе управления операциями “Помощь”.



a

Рис. 4.17. Фрагменты работы программного математического комплекса: *a* – общий интерфейс управления диагностическим комплексом с панелями инструментов;

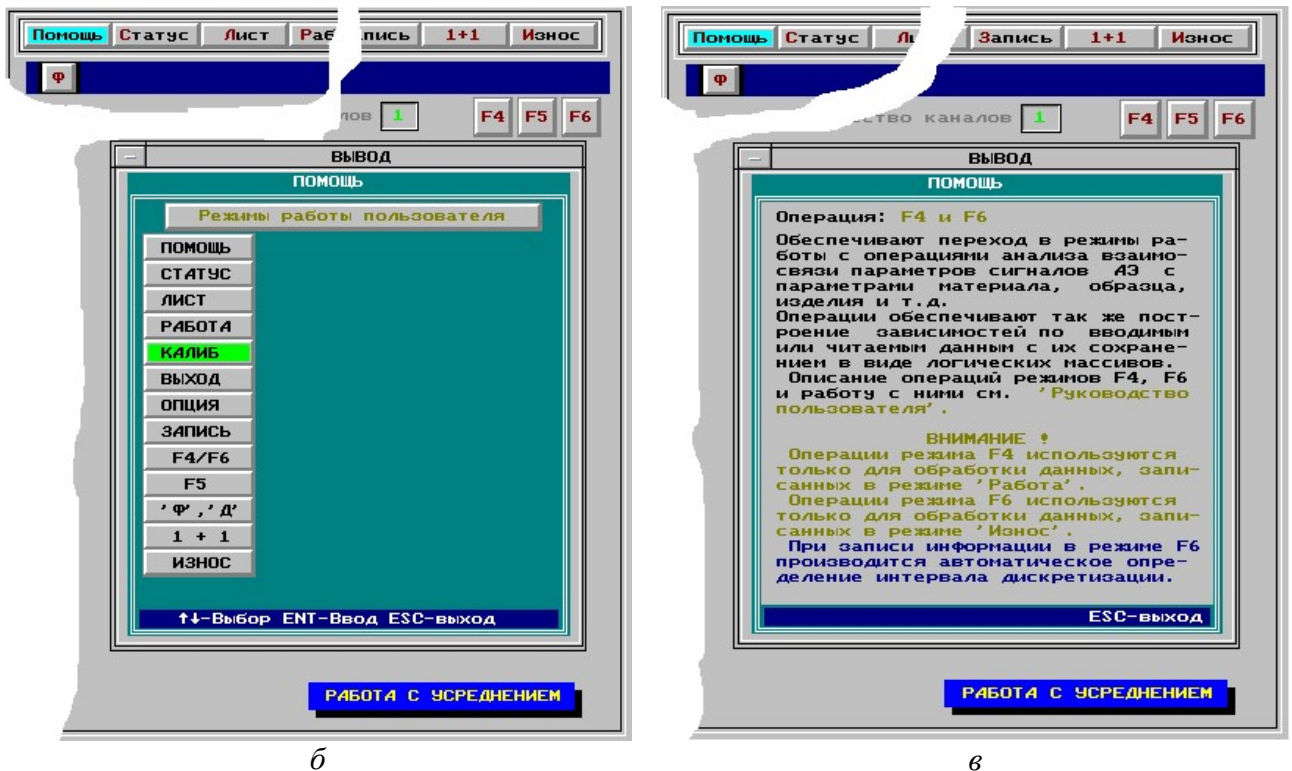


Рис. 4.17. Фрагменты работы программного математического комплекса: *а* – мини-интерфейс управления операции “помощь”; *б* – описание работы с операциями, загружаемыми с использованием панелей инструментов F4 и F6

Подобным образом организованы и все остальные панели инструментов основного интерфейса управления диагностическим комплексом.

4.5.2 Внешние операции общего интерфейса управления системы

Внешние операции управления диагностическим комплексом, как было отмечено выше, используются для записи входной информации, ее обработки, формирования массивов данных, проведения вторичной обработки информации, хранящейся в логических массивах данных и вывода результатов на экран монитора. Они загружаются с использованием системных вызовов и являются независимыми по отношению к общей оболочке управления.

Общая структура программного обеспечения внешних операций управления диагностическим комплексом, соответствует обрабатываемым и анализируемым параметрам для непрерывного сигнала АЭ (рис. 4.5). Не смотря на различия в концептуальной части построения систем для проведения кратковременных и длительных испытаний пар трения (рис. 4.1) обрабатываемые и анализируемые параметры сигналов АЭ в обоих случаях являются общими.

Другими словами, внешние операции диагностического комплекса, относящиеся к обрабатываемым и анализируемым параметрам сигналов АЭ, являются общими. Это обусловлено тем, что структуры логических массивов данных, формируемых по результатам испытаний, включая и массивы параметров состояния и протокола испытаний, являются одинаковыми для условий кратковременных и длительных испытаний. Распознавание вида проведенных испытаний при обработке массивов данных осуществляется по символам принадлежности, которые принимаются по умолчанию, и хранятся в начальных ячейках анализируемых массивов.

Различие во внешних операциях, согласно концептуальной части систем, относится только к операциям записи и первичной обработки входной информации, т.е. к алгоритмам ввода и первичной обработки входных сигналов АЭ. В случае кратковременных испытаний после преобразования входного процесса в цифровые коды производится запись информации на магнитный диск с последующей ее обработкой и формированием логических массивов данных. При длительных испытаниях производится обработка информации в реальном масштабе времени с выводом ее результатов на экран монитора и формированием логических массивов данных после завершения испытаний.

Все внешние операции, связанные с обработкой данных, имеют единую структуру построения, которая в общем случае соответствует рассмотренной ранее структуре построения программного обеспечения диагностического комплекса, с формированием сетей переключателей и счетчиков контроля прямых и обратных переходов. При этом программная реализация каждой внешней операции имеет многоуровневую организацию. В ее структуре выделяется головная программа или мини оболочка и подпрограммы, которые выполняются в пределах головной программы (рис. 4.18). Последние, как и в случае общего программного обеспечения, являются внутренними операциями. Их структура и последовательность вызова осуществляются аналогично рассмотренному выше.

При наличии головной программы и подпрограмм в каждой внешней

операции можно выделить подгруппы функциональных операций (рис. 4.18). Начальная подгруппа операций является единой для всех внешних операций и обеспечивает работу с именами логических файлов. Она поддерживается внутренними операциями общего интерфейса управления диагностическим комплексом, которые связанными с введенным именем файла и введенным именем диска (см. параграф 4.4.1). Фактически данная подгруппа операций используется для ручного ввода необходимого имени файла либо осуществляет автоматический ввод имени файла, зарезервированного внутренней операцией ввода и изменения имени файла (панель инструментов “Ф” общего интерфейса управления - рис.4.17, а). Аналогичным образом осуществляются операции ввода имени диска, на котором хранятся файлы (панель инструментов ”Д” общего интерфейса управления – рис. 4.17, а). Вызов имени диска используется в операциях для обработки результатов N проведенных экспериментов (рис. 4.5).

По введенному имени файла формируются имена всех необходимых логических файлов с данными, которые получены и хранятся на магнитном диске для каждого проведенного эксперимента. Например, массив времен, массив усредненных амплитуд, массив суммарных амплитуд, массив параметров состояния системы и т.д., которые сформированы для данного эксперимента.

К начальной подгруппе операций относятся и операции чтения массивов данных, которые выполняются по завершении формирования имен логических массивов. При этом осуществляется определение объема данных по каждому массиву, резервирование необходимого объема памяти и запись данных в оперативную память ПК.

Следующей подгруппой операций, входящих в головную программу, являются операции обработки данных. Они определяются назначением вызванной внешней операции системы – обработка усредненных амплитуд, обработка суммарной энергии, накопление суммарной энергии и т.д. (рис. 4.5). Обработка завершается выполнением операций вывода на экран монитора графической зависимости изменения обработанного параметра АЭ от времени, от нагрузки, от напряжения и т.д. При этом формируется графический мини

интерфейс управления внутренними операциями для вызванной внешней операции. Сформированный мини интерфейс со структурой переходов и счетчиков контроля являются первым уровнем управления.



Рис. 4.18. Структура построения внешних операций обработки данных

В дальнейшем структура построения программного обеспечения соответствует общей структуре построения программного математического комплекса. Мини интерфейс управления обеспечивает вызов внутренних операций из головной программы или оболочки вызванной внешней операции (рис. 4.18). Загрузка каждой операции обеспечивает формирование мини интерфейса управления операциями следующего уровня и т.д. При этом, как и в случае общей структуры программного обеспечения, производится

формирование последовательных переходов по уровням (I уровень, II уровень, III уровень,...) с формированием определенной ветви (рис. 4.18). Каждый переход в пределах уровня и по уровням контролируется с использованием соответствующих счетчиков переходов. После завершения внутренней операции осуществляется последовательный возврат в мини интерфейс управления первого уровня. При этом возврат осуществляется последовательным образом в порядке обратном порядку прямых переходов.

Внутренние операции, как и в случае общего интерфейса управления диагностическим комплексом, разделены по их функциональному назначению: операции работы с параметрами состояния системы; операции работы с протоколом испытаний; операции работы с графической информацией, выведенной на экран монитора; сервисные операции.

Первые две группы операций используются для вывода параметров протокола испытаний и параметров состояния системы для данных, полученных при проведении эксперимента. При этом используются все подходы к преобразованию и представлению информации, принятые при построении внутренних операций управления диагностическим комплексом.

Сервисные операции предназначены для трансформации графической информации в логические массивы данных с преобразованием их формата, т.е. преобразования в формат операционной системы DOS. При этом формирование массивов данных может осуществляться, как по всей графической информации, так и по отдельным ее фрагментам, выделяемым в графическом окне вывода. Наличие данных операций обусловлено необходимостью дополнительной обработки данных с использованием математических приложений под DOS и WINDOWS.

Операции работы с графической информацией, выведенной на экран монитора, являются более сложной группой операций. Они разделены на операции работы с текущим положением маркера и операции работы с фрагментом графического экрана вывода. Не смотря на такое разделение, оба типа операций имеют единую структуру построения. Рассмотрим структуру

операций для работы с текущим положением маркера.

При загрузке внутренней операции для работы с графической информацией формируется графическое окно вывода и мини интерфейс управления положением маркера со счетчиками переходов в двух координатных осях – по оси X и по оси Y (рис. 4.19). Любое изменение положения маркера приводит к модификации счетчиков переходов по соответствующим координатам. После изменения положения маркера производится последовательное выполнение группы операций (рис. 4.19). Первая из них производит расчеты координат нового положения маркера. Вторая, выполняет расчеты номера элемента массива для обработки данных. Третья, производится расчет действительных значений величин по координатным осям. Четвертая, осуществляет вывод полученных значений в графическое окно вывода. Все операции работы с графической информацией в общей структуре построения внешней операции представляют собой подпрограммы, общие принципы работы с которыми рассмотрены выше.

Структура операций, в случае работы с фрагментом графической информации, аналогична рассмотренной структуре операции работы с маркером. Отличие заключается в том, что вводятся дополнительные операции фиксации начального и конечного положения маркера по оси X , в промежутках между которыми осуществляется обработка данных результатов испытаний.

При работе с графической информацией используются и другие виды ее обработки. Например, определение углов наклона зависимостей относительно начала координат либо относительно выделенного фрагмента и другие. Однако при построении программного обеспечения используется единый подход и единые структуры, в соответствии с рис. 4.19. При этом различия в программном обеспечении касаются различий применяемых видов обработки.

При работе внешних операций сохраняются общие подходы в построении структур данных и их массивов, а так же принципы трансформации типов данных, которые используются в общей системе управления диагностическим



Рис. 4.19 Структура построения внутренней операции для работы с графической информацией

комплексом (рис. 4.3, рис. 4.6, рис. 4.9). Исходные данные, которые вводятся во внешние операции, являются данными, имеющими постоянное хранение на жестком диске. Они получены по результатам первичной обработки входной информации для каждого испытания. К постоянным массивам относятся и массивы параметров протокола испытаний и параметров состояния системы. При работе внешней операции на различных этапах вторичной обработки данных, т.е. данных прочитанных из логических массивов, формируются вторичные массивы, которые имеют временное хранение. Они хранятся только на время работы операции и удаляются по завершении работы с операцией. При этом временные массивы частично формируются в оперативной памяти ПК, а частично - на жестком диске.

На рис. 4.20, рис. 4.21, рис. 4.22 показаны фрагменты работы внешней операции по обработке усредненной амплитуды сигналов АЭ, при проведении тестовых испытаний системы.

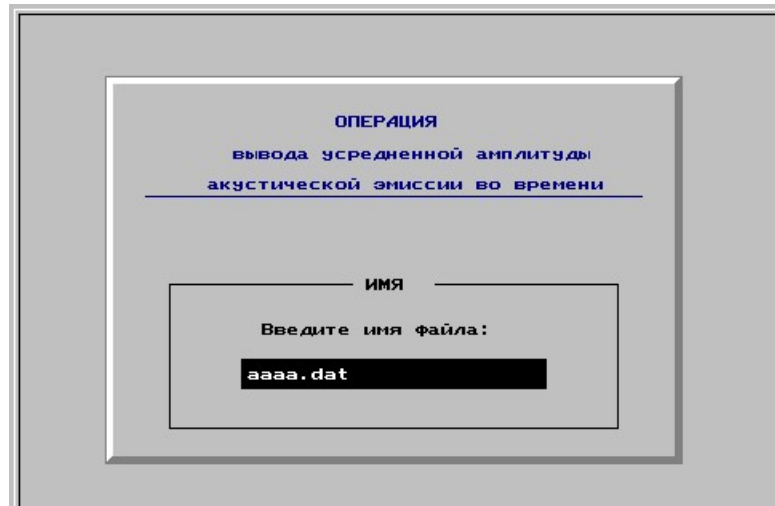


Рис. 4.20 Фрагмент работы внешней операции с использованием ручного ввода имени логического массива данных, хранящегося на жестком диске



Рис. 4.21 Фрагмент работы внешней операции по обработке усредненной амплитуды сигналов АЭ с построением зависимости ее изменения во времени и мини интерфейса управления операциями

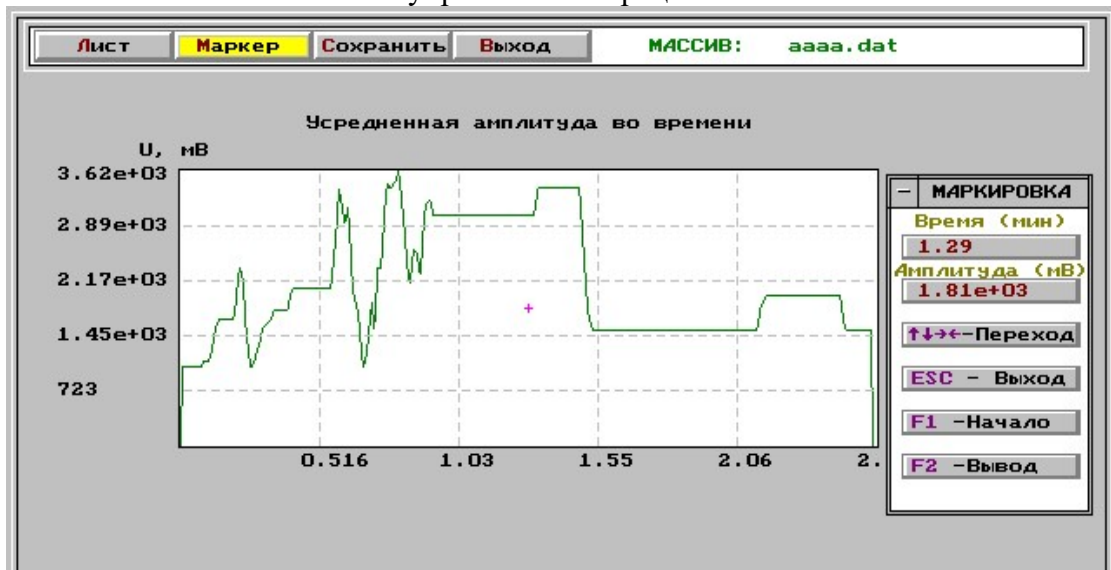


Рис. 4.22 Фрагмент работы внешней операции по обработке усредненной амплитуды сигналов АЭ с анализом зависимости ее изменения во времени в графическом окне вывода

Следует отметить, что структуры построения внешних операций, как при проведении кратковременных, так и длительных испытаний однотипны. При этом в системе управления операциями широко используются мини интерфейсы управления, т.е. структуры, которые позволяют формировать различные переходы, аналогично тому, как это используется при построении общего интерфейса управления диагностическим комплексом. Подобные структуры являются открытыми, т.е. позволяют проводить их расширение. Использование такого подход, во-первых, позволяет проводить наращивание программного обеспечения диагностического комплекса, т.е. добавлять внутренние и новые внешние операции обработки данных в общую оболочку управления. Во-вторых, в каждую внешнюю операцию вводить дополнительные внутренние операции вторичной обработки данных. При этом добавление как внешних, так и внутренних операций не приводит к изменению общей структуры построения диагностического комплекса (структуры электронных и программных средств), а приводит только к модификации программного обеспечения.

4.6 Метрологическое обеспечение средств акусто-эмиссионной системы

Согласно принятой концепции построения акусто-эмиссионной системы диагностики узлов трения все проводимые измерения реализуются только с использованием ПВВ, который осуществляет преобразование аналоговой информации в цифровой код. Результат каждого измерения характеризуется амплитудно-временными параметрами, имеющими размерность физических величин – амплитуда в вольтах и длительность в микросекундах, что определяется чувствительностью ПВВ на единицу младшего разряда и частотой дискретизации входного сигнала. Данные величины являются базовыми величинами, относящимися к основным параметрам используемого ПВВ. Они, естественно, характеризуются вариацией своих значений и влияют на ошибки обработки параметров сигналов АЭ по результатам проведенных измерений. Поэтому для определения действительных значений чувствительности ПВВ на единицу младшего разряда и интервала дискретизации необходимо проведение

его калибровки для заданных условий параметров состояния системы.

В разработанной акусто-эмиссионной системе весь процесс измерения и обработки результатов реализуется программно, что позволяет проводить автоматическую калибровку системы. Для этих целей было разработано программное обеспечение, установка и методика калибровки. Схема установки для проведения калибровки ПВВ в составе АЭ диагностического комплекса показана на рис.4.23.

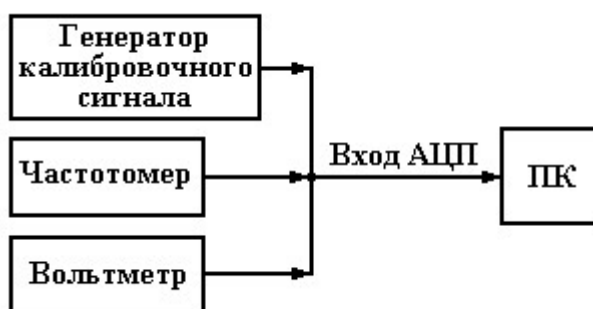


Рис. 4.23. Схема установки для калибровки ПВВ по аналоговому каналу

Генератор калибровочного сигнала служит для формирования сигнала с заданными параметрами (уровнем амплитуды и периодом следования) и передачи его на вход АЦП, размещенного на ПВВ. В схеме используется низкочастотный звуковой генератор типа ГЗ-118, а также вольтметр В7-26 и частотомер ЧЗ-54, для установки и контроля значений параметров калибровочного сигнала. При проведении калибровки используется сигнал прямоугольной формы с параметрами амплитуды - 2,5 В и 5 В, период следования - 1000 мкс.

Для проведения калибровки было разработано специальное ПМО. Оно обеспечивает ввод информации в ПК с последующей обработкой данных и представлением результатов анализа. Процедура калибровки сводится к выполнению последовательности операций. Производится непрерывное преобразование входного аналогового сигнала в цифровые коды с последующей их записью на УЗ. Затем осуществляется чтение записанной информации, ее обработка с определением параметров каждого зарегистрированного сигнала – амплитуды и длительности (в цифровых кодах), формирование массивов данных, вычисление значений чувствительности на единицу младшего разряда и

интервала дискретизации. В дальнейшем производится статистический анализ полученных данных.

Обработка информации строится исходя из принятой структуры ее записи (рис.4.24) в цифровом виде.

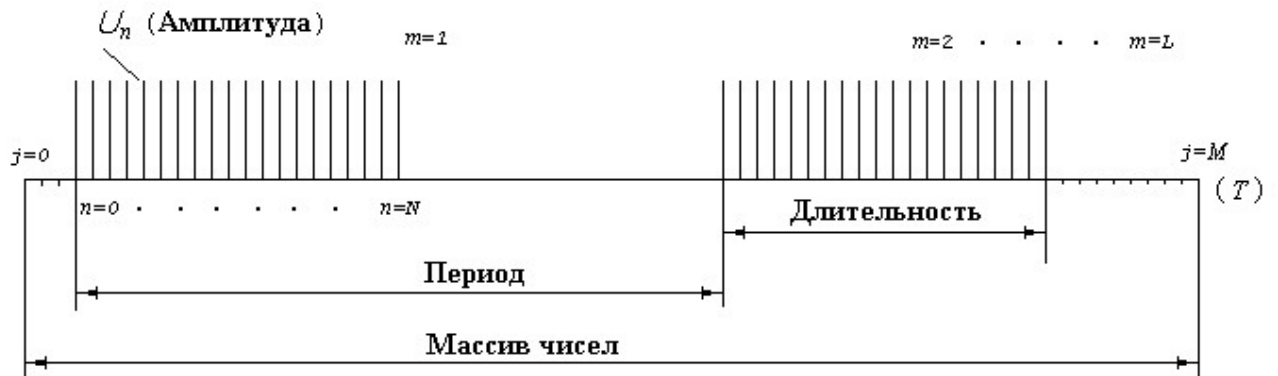


Рис. 4.24. Представление массива чисел по результатам измерений, хранящихся на жестком диске

Непрерывный сигнал $U(t)$ на некотором интервале времени $[0, T]$ представляется своими значениями $U_0, U_1, U_2, \dots, U_{M-1}$, взятыми, соответственно, в моменты времени $(0, \Delta t, \dots, (M-1)\Delta t)$, где Δt - интервал дискретизации входного сигнала; $M = T / \Delta t$ - количество проведенных измерений (длина реализации). Если сигнал является импульсным, то количество зарегистрированных импульсов на длине реализации M , составляет m . Каждый зарегистрированный импульс имеет длительность, равную $\tau_c = N \cdot \Delta t$, где N - количество измерений, для которых числовое значение амплитуды $U_n > 0$ и равняется N , где $n=0, 1, 2, \dots, N$; U_n - цифровой код n -го результата измерения амплитуды. Значение амплитуды сигнала по результатам измерений $U_c = \bar{U}_m \cdot \Delta U$, где ΔU - чувствительность АЦП на единицу младшего разряда; $\bar{U}_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n$ - амплитуда сигнала в цифровом коде; U_m - n -ый цифровой отсчет амплитуды сигнала (рис.4.24).

В соответствии со сказанным, по каждому m -му зарегистрированному сигналу определяются

$$\Delta U_m = \frac{U_c}{U_m}, \quad (4.7)$$

$$\Delta t_m = \frac{\tau_c}{N}, \quad (4.8)$$

где U_c, τ_c – амплитуда и длительность калиброванного сигнала, имеющие размерность, соответственно, мВ и мкс; U_m, N – соответственно, амплитуда и длительность обработанного сигнала в цифровых кодах (машинных отсчетах).

По результатам обработки, в соответствии с (4.7) и (4.8), производится формирование двумерного массива данных с вычисленными значениями чувствительности на единицу младшего разряда и интервала дискретизации по каждому сигналу. Полученные массивы используются для проведения статистической обработки данных - построения гистограмм распределения и обработка их параметров.

При проведении калибровки ПВВ осуществлялась регистрация и обработка 114 сигналов для калибровки по чувствительности и 74 сигналов для калибровки по интервалу дискретизации. Полученные результаты обработки, с использованием пакета прикладных программ для статистического анализа данных (*Origin*), показали, что расчетные значения чувствительности на единицу младшего разряда и интервала дискретизации подчиняются нормальному закону распределения (рис.4.25).

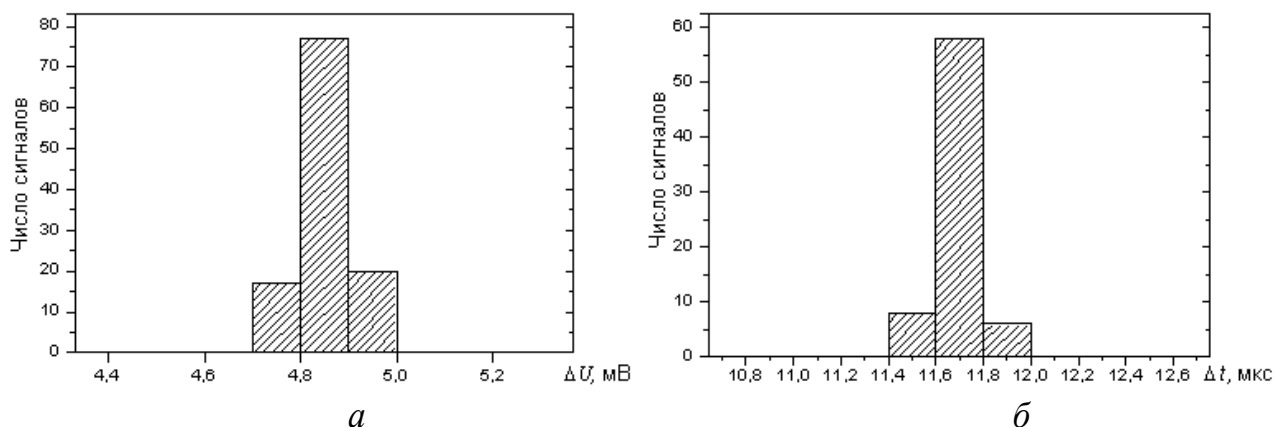


Рис. 4.25. Гистограммы распределений значений чувствительности АЦП на единицу младшего разряда (а) и интервала дискретизации (б).

Результаты анализа гистограмм распределения чувствительности на единицу младшего разряда и интервала дискретизации, в соответствии с [10], показали, что экспериментальные данные описываются нормальными законами

распределения (рис.4.26, рис.4.27) с вероятностью, соответственно: 0,9954 и 0,9966. Из анализа распределений получены оценки среднего ($\widehat{\Delta U}$) и стандартного отклонения (s_1) для чувствительности на единицу младшего разряда, а также получены оценки среднего ($\widehat{\Delta t}$) и стандартного отклонения (s_2) для интервала дискретизации.

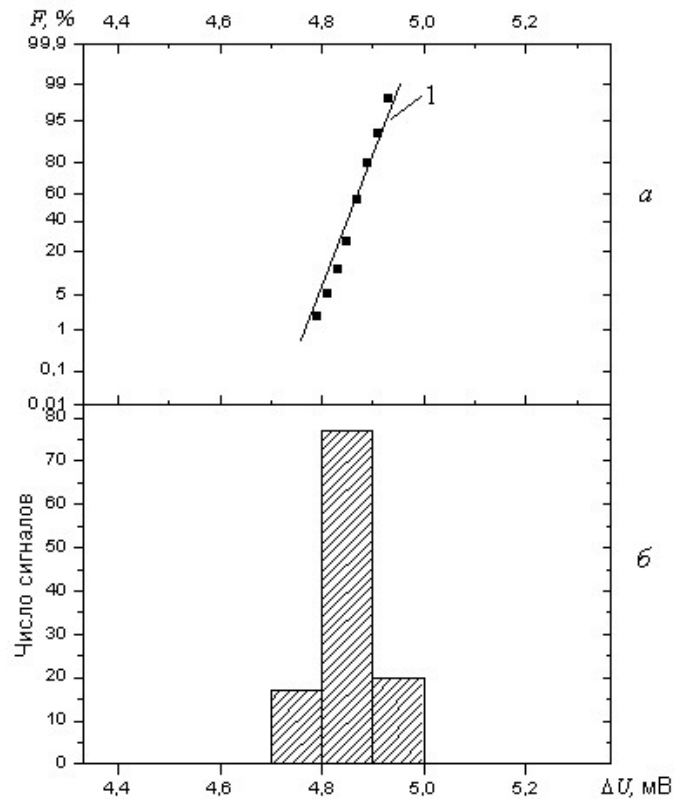


Рис. 4.26. Распределение по чувствительности на единицу младшего разряда: *a* - функция распределения; *b* - частота; 1 - функция для идеального нормального распределения

Значения для чувствительности на единицу младшего разряда составили: $\widehat{\Delta U} = 4,86$ мВ, $s_1 = 0,0112$ мВ. Так как оценки среднего определены для выборки из N элементов, то, в соответствии с [10], проведем расчеты доверительного интервала действительного среднего $\Delta \bar{U}$ для заданных вероятностей в виде

$$\Delta \bar{U} = \widehat{\Delta U} \pm \theta \cdot (s / \sqrt{N}), \quad (4.9)$$

где θ - коэффициент, значения которого являются табличными данными для заданных вероятностей: $\theta = 1,645$ для $p = 0,9$; $\theta = 2,0$ для $p = 0,955$; $\theta = 3,0$ для $p = 0,997$.

Обработка экспериментальных данных, в соответствии с (4.9), показала, что для заданных вероятностей среднее значение чувствительности на единицу

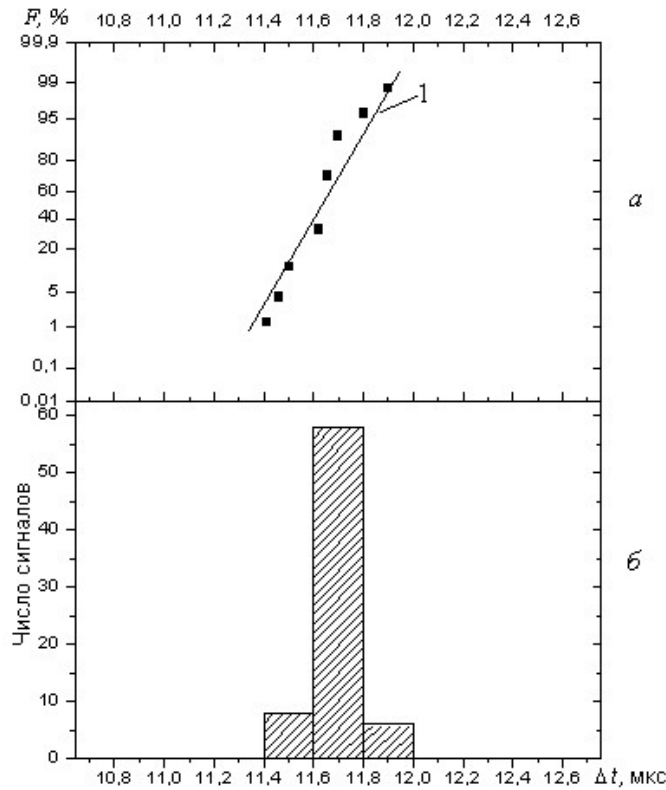


Рис. 4.27. Распределение по интервалу дискретизации: *a* – функция распределения; *б* – частота; 1 – функция для идеального нормального распределения

младшего разряда $\Delta\bar{U}$ лежит в пределах: $\Delta\bar{U} = (4,86 \pm 0,0017)$ мВ для вероятности 0,9; $\Delta\bar{U} = (4,86 \pm 0,002)$ мВ для вероятности 0,955; $\Delta\bar{U} = (4,86 \pm 0,003)$ мВ для вероятности 0,997. Доверительный интервал, в котором находится действительное значение чувствительности на единицу младшего разряда ΔU для заданных вероятностей, определим в виде

$$\Delta U = \Delta\bar{U} \pm \theta \cdot s, \quad (4.10)$$

Результаты расчетов, в соответствии с (4.10), для различных вероятностей приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1

Доверительные границы для чувствительности на единицу младшего разряда

Доверительные границы значения чувствительности на единицу младшего разряда ΔU в мВ для заданных вероятностей		
0,9	0,955	0,997
$4,86 \pm 0,0017$	$4,86 \pm 0,002$	$4,86 \pm 0,003$

Значения для интервала дискретизации составили: $\Delta\hat{t} = 11,7$ мкс, $s_2 = 0,08$ мкс. Так как, для интервала дискретизации оценки среднего определены для выборки из N элементов, то, в соответствии с (4.9), заменяя значения чувствительности на единицу младшего разряда на значения интервала

дискретизации, определим доверительные интервалы действительного среднего $\Delta \bar{t}$ для заданных вероятностей.

Обработка экспериментальных данных показала, что для заданных вероятностей среднее значение интервала дискретизации $\Delta \bar{t}$ лежит в пределах: $\Delta \bar{t} = (11,7 \pm 0,015)$ мкс для вероятности 0,9; $\Delta \bar{t} = (11,7 \pm 0,018)$ мкс для вероятности 0,955; $\Delta \bar{t} = (11,7 \pm 0,028)$ мкс для вероятности 0,997. Доверительный интервал, в котором находится действительное значение интервала дискретизации Δt для заданных вероятностей, определим используя выражение (4.10).

Результаты расчетов, которые проведены для интервала дискретизации в соответствии с (4.10), для различных вероятностей приведены в табл.4.2.

Таблица 4.2

Доверительные границы для интервала дискретизации		
Доверительные границы значения интервала дискретизации Δt в мкс для заданных вероятностей		
0,9	0,955	0,997
$11,7 \pm 0,015$	$11,7 \pm 0,018$	$11,7 \pm 0,028$

Из полученных результатов видно, что после калибровки ПВВ ошибка определения чувствительности на единицу младшего разряда составляет: 0,035% для вероятности 0,9; 0,04% для вероятности 0,955; 0,06% для вероятности 0,997; ошибка определения интервала дискретизации составляет: 0,13% для вероятности 0,9; 0,15% для вероятности 0,955; 0,24% для вероятности 0,997.

Таким образом, полученные данные можно рассматривать как характеристику устойчивости работы ПВВ, что обеспечивает точность результатов измерений.

Среди параметров состояния системы, как было отмечено выше, важным параметром является интервал дискретизации Δt . Он может задаваться с использованием счетчика таймера или формироваться программным путем с использованием задержки срабатывания порта. Последний означает, что запуску АЦП на преобразование предшествует выполнение определенного количества пустых операций, исполнение которых требует определенных затрат времени.

Использование задержки порта обусловлено необходимостью

регулирования величины интервала дискретизации в зависимости от скорости вращения пары трения и длительности проводимых испытаний при максимальном объеме формируемого массива данных в 64 Кбайт. При большом значении скорости вращения пары трения и большой длительности испытаний объем формируемого массива данных может превышать 64 Кбайт. Для предотвращения возникновения подобных ситуаций необходимо либо снижать скорость вращения пары трения либо изменять интервал дискретизации, т.е. регулировать значение программной задержки ПВВ в машинных отсчетах. Так как скорость вращения пары трения задается условиями испытаний и не может подвергаться изменению, то для правильной записи информации о сигналах АЭ необходимо проводить регулирование интервала дискретизации.

Следует отметить, что на значение интервала дискретизации значительное влияние оказывает быстродействие ПК. Данный фактор необходимо учитывать в каждом конкретном случае расчета зависимости изменения интервала дискретизации от задержки срабатывания АЦП, т.е. для каждого конкретного ПК. Поэтому необходимо проводить калибровку интервала дискретизации от задержки срабатывания порта.

В принятой конфигурации работы системы используется формирование интервала дискретизации программным путем с использованием задержки преобразования ПВВ. В параметрах состояния она задается в позиции “Задержка порта”.

Определение интервала дискретизации Δt в зависимости от задержки срабатывания порта осуществляется с использованием режим калибровки ПВВ. Калибровку выполняют один раз после установки ПВВ в ПК. При изменении значения задержки необходимо проводить изменение значения интервала дискретизации в параметрах состояния системы.

Для проведения калибровки используется установка, структурная схема которой показана на рис.4.23. Калибровка проводится в соответствии с разработанной выше методикой. При этом на вход ПВВ подается калиброванный сигнал с известными параметрами с выхода генератора калибровочного сигнала.

После записи сигнала в ПК выполняется автоматическая его обработка и расчет значения интервала дискретизации.

На рис.4.28 показан результат проведенной калибровки в виде зависимости изменения интервала дискретизации Δt от задержки срабатывания АЦП.

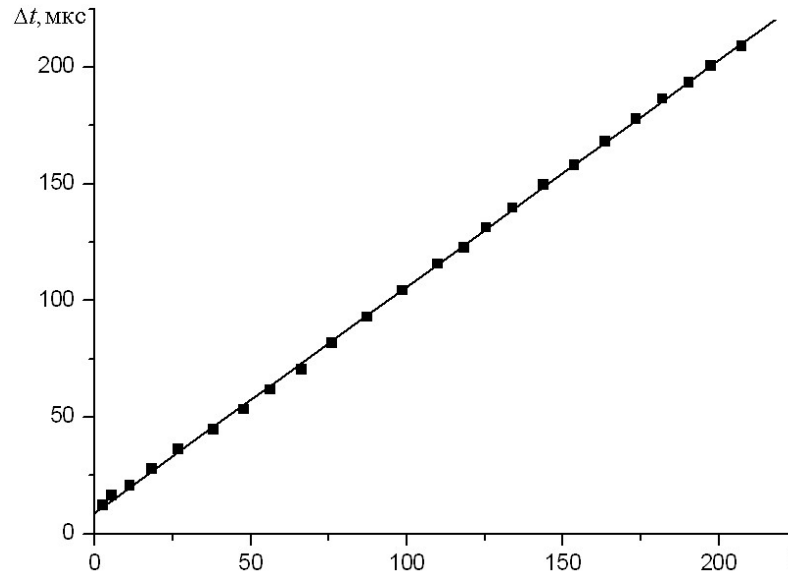


Рис. 4.28. Результат изменения интервала дискретизации Δt от задержки запуска АЦП

Дальнейший анализ полученной зависимости осуществлялся с использованием пакета прикладных программ (*Origin*). Результаты проведенного анализа показали, что зависимость (рис.4.28) описывается линейной функцией

$$\Delta t = A + B \cdot l, \quad (4.11)$$

где A, B - коэффициенты; $A = 8,996$, $B = 0,97$. При этом дисперсия для вероятности $P = 0,99982$ соответствует $\sigma^2 = 1,25$. Из полученных результатов видно, что максимальная ошибка определения интервала дискретизации не превышает $\pm 1,12$ мкс.

Выводы по четвертой главе

1. Разработана концепция построения акусто-эмиссионных систем для диагностики узлов трения, в основе которой лежит формирование распределенных структур с различием принципов хранения информации и методами её обработки, что определяется различием видов проводимых испытаний - кратковременные и длительные испытания. Созданы структуры АЭ систем, которые ориентированы на максимальное использование гибких

программных средств, обеспечивающих контроль состояния оборудования, а также управление процессами измерений, обработки, анализа информации и представления её результатов.

2. Разработаны структуры и состав информационных потоков, циркулирующих в системах, которые являются основой логики управления системами. Определено их назначение, последовательность и направление передачи по отношению к программному обеспечению. Сформирована внутренняя структура стационарных и промежуточных массивов данных, определяющих параметры, необходимые для контроля и управления устройствами внутренней части систем, а также управления обработкой данных.

3. Разработана структура многоуровневой логики контроля и управления диагностическими комплексами, при проведении кратковременных и длительных испытаний, в основе которой лежит формирование и передача информационных потоков. Уровни управления логики работы комплекса определены выбором однотипных информационных потоков управления и данных, в соответствии с назначением выполняемых операций.

4. Разработана структура программного обеспечения с наращиваемой многоуровневой иерархической архитектурой, обеспечивающей выполнение независимых внутренних и внешних операций в диагностическом комплексе. Создан общий графический интерфейс управления комплексом, который работает в интерактивном режиме, и обеспечивает формирование сетей последовательных прямых и обрабатываемых переходов при выполнении всех операций в системе.

5. Разработана методика и программное обеспечение для калибровки диагностического комплекса, позволяющие определить параметры системы по чувствительности на единицу младшего разряда и интервала дискретизации. Результат статистической обработки экспериментальных данных по калибровке показали, что максимальная ошибка определения действительного значения чувствительности на единицу младшего разряда и интервала дискретизации для вероятности 0,997 не превышает, соответственно, $\pm 0,06\%$ и $\pm 0,24\%$.

ВЫВОДЫ

1. Впервые разработана модель результирующего сигнала АЭ, который формируется при механическом нагружении поверхностных слоев материалов, и учитывает напряженно-деформированное состояние поверхностей контактного взаимодействия и скорости развития разрушения вторичных структур I и II типов.
2. Установлено, что с уменьшением времени начала разрушения вторичных структур I и II типа происходит сжатие результирующего сигнала во времени, а с увеличением напряженно-деформированного состояния наблюдается возрастание среднего уровня его амплитуды и величины разброса. При этом верхнее значение границы разброса амплитуды результирующего сигнала определяется амплитудами сигналов АЭ, возникающих при разрушения вторичных структур II типа, а нижний её уровень – амплитудами сигналов, возникающих при разрушения вторичных структур I типа.
3. Установлено, что для стадии нормального состояния деталей, средняя амплитуда результирующего сигнала АЭ описывается линейной функцией во времени. При переходе к стадии катастрофического состояния деталей зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени описывается степенной функцией, возрастание значения показателя степени которой обусловлено возрастанием интенсивности износа.
4. Определено, что с увеличением объема материала, вступившего в пластическую деформацию и площади разрушений вторичных структур I и II типов, наблюдается резкое возрастание амплитуды результирующего сигнала АЭ и уменьшению величины её разброса, что приводит к возрастанию значения показателя степени аппроксимирующего выражения.
5. Разработан метод определения контактных напряжений в фрикционных узлах по сигналам АЭ, основанный на установленной взаимосвязи среднего уровня результирующего сигнала АЭ с величиной контактных напряжений, что обеспечивает повышение точности измерений механических напряжений в условиях эксплуатации.

6. Разработаны концепция построения, технические и программные средства приборной АЭ системы измерения, обработки, анализа АЭ информации и вывода его результатов.

7. Создан ряд методик для длительных и кратковременных испытаний фрикционных узлов с использованием обработки сигналов АЭ, а также методика калибровки приборной АЭ системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К. Количественная сейсмология. Теория и методы /К. Аки, П. Ричардс - М.: Мир, 1983. – Т2. – 360 с.
2. Алешин Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия: справ. пособие / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев – Мн.: Выш. шк., 1987. – 271 с.
3. Бабак В.П. Исследованием материалов и изделий методом АЭ для прогнозирования их состояния / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 1997. – №1. – С.25–34.
4. Бабак В.П. Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Калита // Технологические системы. - 2002. - № 1(12). - С. 26-34.
5. Бабак В.П. Моделирование сигналов акустической эмиссии при протекании в материале пластической деформации / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Калита // Технологические системы. - 2002. - № 3(14). - С. 77-81.
6. Бабак В.П. Моделирование сигналов акустической эмиссии при скачкообразном развитии процессов разрушения / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Калита// Технологические системы.- 2005.- № 3(29).- С.30-37.
7. Бабак В.П. Моделі сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів пар тертя / В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Стадниченко, А.П. Стахова // Проблеми тертя та зношування. – 2007. – Вип.47. – С. 3–8.
8. Бабак В.П. Модель сигнала акустической эмиссии при образовании в материале трещины с учетом релаксационных процессов / В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, В.М. Калита // Технологические системы. - 2002. - № 5 (16). - С. 20-23.

9. Бабак В.П. Моделювання сигналів акустичної емісії при виникненні в матеріалі тріщин / В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Калита // Вісник НАУ. - 2002. - № 1. - С. 5-10.
10. Бабак В.П. Обробка сигналів / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер-К. : Либідь, 1999. - 496 с.
11. Бакара К.Б. Акустическая эмиссия и её применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / К.Б. Бакара. – М.: Атомиздат, 1990. – 304 с.
12. Баранов В.М. Акустическая эмиссия при трении / В.М. Баранов, Е.М.Кудрявцев, Г.А.Сарычев и др. - М.: Энергоатомтздат, 1998. – 216 с.
13. Бдюм Т. Исследование акустической эмиссии генерируемой в процессе ортогонального резания/ Т. Бдюм, И. Инасаки // Современное машиностроение. – 1991. – Сер.Б. – № 1. – С.40 – 48.
14. Безымянный Ю.Г. Акустико-эмиссионный контроль в процессе высокочастотных испытаний материалов / Ю.Г. Безымянный, Д.В. Галаненко, Е.А. Козирацкий // Акустичний симпозиум “Консонанс-2007”: Київ. Ігм НАН України. 25–27 вересня 2007. - С. 20-25.
15. Белоногий Д.Ю., Разработка канала регистрации акустической эмиссии / А.А. Чаплюк, С.Н. Харлап, О.В. Холодилов // Современные инновации в науке и технике [Текст]: Сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (17 апреля 2014 г.). – В 4-х томах, Том 1, Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014, С. 132–139
16. Березняков А.И. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами/ А.И. Березняков, В.Н. Стадниченко // Трение и износ. – 1998. – №3. – С.312–317.
17. Бернштейн М.Л. Структура и механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. – М. : Издательство Металлургия, 1970. - 472 с.

18. Бершадский Л.И. Распознавание характеристик изнашивания в акустико-эмиссионном сигнале на основе информационно-термодинамических представлений / Л.И. Бершадский, И.Г. Носовский, И.А. Жигалов // Трение и износ. – 1988. – № 2 – С.239–246.
19. Бигус Г.А. АЭ-контроль: учеб. Пособие / Г.А.Бигус, В.И. Иванов, Н.А. Быстрова и др. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 88 с.
20. Бодров А.И. Исследования процессов трения трибоузлов по параметрам акустической эмиссии / А.И. Бодров, А.А. Деев, А.И. Горностаев // Современная наука глазами молодых ученых: достижения, проблемы, перспективы: Материалы межвузовской научно-практической конференции 27 марта 2014 года. Часть 1. – Рязань: ФГБОУ ВПО РГТУ, 2014. – 220 с.
21. Бойко В.С. Звуковое излучение двойникующих дислокаций / В.С. Бойко, Р.И. Гарбер, Л.Ф. Кривенко, С.С. Кривуля // ФТТ – 1970. – 12, №6. – С.1753 – 1755.
22. Буйло С.И. Связь параметров акустической эмиссии растущей трещины с коэффициентом интенсивности напряжений и типом напряженного состояния / С.И. Буйло // Дефектоскопия. - 2006. - №3. - С. 44-48.
23. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики / С.И. Буйло. - Ростов на Дону: Изд-во ЮФУ, 2008.-192 с.
24. Булатов П.И. Применение метода акустической эмиссии для оценки влияния условий трения на изнашивание наполненных полимерных материалов / П.И. Булатов, Ю.П. Козырев // Трение и износ. – 2002.– №6. – С. 670–674.
25. Бухало О.П. Применение, воспроизведение и сертификация импульсной модели стохастического сигнала / О.П. Бухало // Измерительная техника. - №6. - 1997. - С.24 - 44.

26. Вимірювання фізичних величин : навч. посіб. / Г.О. Оборський, П.Т. Слободяник, В.Л. Костенко, С.Г. Антощук; за ред. Г.О. Оборського. - О. : Астропринт, 2012. - 400 с.
27. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов - М.: Машиностроение, 1985.
28. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов // М.: Изд-во стандартов. – 1986.
29. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения // М.: Изд-во стандартов. – 1986. – 16 с.
30. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования // М.: Стандартиформ. – 2007. – 16 с.
31. Грешников В.А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В.А. Грешников, Ю.В. Дробот.- М: Изд-во стандартов, 1976. - 272 с.
32. Грин Р.Е. Характеристика источников акустической эмиссии для оценки прочности конструкций // Акустическая эмиссия в диагностике предразрушающего состояния и прогнозировании разрушения сварных конструкций: Докл. I Межд. Школы стран членов СЭВ (Варна, октябрь, 1986). - 1986. - С. 26 - 36.
33. Денисов В.И. Неразрушающий контроль подшипников скольжения методом акустической эмиссии/ В.И. Денисов, Г.А. Сарычев, В.М. Щавелин // Неразрушающие физические методы и средства контроля: тез. Всесоюзной нуч.-техн. конф. – Минск. –1981. – С. 164 – 165.
34. Джус Р.М. Пристрій для безупинної реєстрації динаміки зміни геометрії зразків при випробуваннях на тертя і знос/ Р.М. Джус, В.М. Стадниченко, М.Г. Стадниченко // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”: Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – 2003. – №12. – С.58–64.
35. Дробот Ю.Б. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом/ Ю.Б. Дробот, А.М. Лазарев - М.: Изд-во стандартов. –1987. – 128 с.

36. Ермолов И.Н. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов - М.: Высш. Школа, 1991. – 283 с.
37. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 3 / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге, под ред. В.В. Ключева - Москва, Машиностроение, 2004.
38. Ескермесов Д.К. Изучение структур и физико-механических свойств многоэлементных нитридных покрытий на основе (Ti-Zr-Cr-Nb)N / Д.К. Ескермесов, С.В. Плотников, А.Д. Погребняк, Н.К. Ердыбаева // 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2015 г., Минск, Беларусь, - С. 346-349.
39. Иванов В.И. Акустическая эмиссия: учеб. пособие (Диагностика безопасности)/ В.И. Иванов, Г.А. Бигус, И.Э. Власов под общ. ред. Ключева В.В. - М.: ИД «Спектр», 2011. - 192 с.
40. Иванов В.И. Акусто-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В.И. Иванов, В.М. Белов. – М: Машиностроение. – 1981.–184 с.
41. Кісі Т. Виникнення акустичної емісії та механічні умови під час випробувань на в'язкість руйнування у пружно-пластичній області / Т. Кісі, Т. Оно, Т. Курібаясі // Хіґакай кенса. – 1981. – 30, №11. – С.896 – 902.
42. Калмыкова Т.Ф. Оценка износа с помощью сигналов акустической эмиссии/ Т.Ф. Калмыкова, А.И. Свиридёнок, О.В. Холодилов, В.А. Белый // Материалы пятого Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механоэмиссии и механохимии твёрдых тел. –1987. –С.162–166.
43. Каминский А. А. Механика разрушения полимеров / А.А. Каминский, Д.А. Гаврилов – К.: Наук. думка, 1988. – 224 с.
44. Капранов Б.И. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учебное пособие / Б.И. Капранов, М.М. Коротков. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 186 с.
45. Кареев А.Е. Разработка методов обработки сигналов акустической эмиссии на основе кластерного анализа для повышения надежности контроля

- машиностроительных конструкций: дис. кандидата техн. наук: 05.02.11 / Кареев Андрей Евгеньевич. - Новосибирск, 2006. - 160 с.
46. Кепич Т.Ю. Напряженное состояние тонкостенных сварных конструкций со сквозными и поверхностными трещинами в зоне шва / Т.Ю. Кепич, Ю.А. Рудяк // Автомат. сварка. – 1988. – № 9. – С. 9 - 13.
47. Кепич Т.Ю. Оптичний метод визначення напружено-деформованого стану об'єктів шляхом аналізу поглинання світла / Т.Ю. Кепич, О.В. Мильніков, Ю.А. Рудяк // Вісник КНУ. Серія фіз.- мат. науки. – 2003. - Вип. 5. – С. 45-53.
48. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т.7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. - М.: Машиностроение, 2005. - 829 с.
49. Короткевич С.В. Структурная самоорганизация поверхностей подшипников качения при граничном трении / О.В. Холодилов, В.Г. Пинчук, В.В. Кравченко // Ремонт, восстановление и модернизация. – 2013. – № 1. – С. 15–27.
50. Крагельский И.В. Возможность применения метода акустической эмиссии для оптимизации микрорельефа поверхностей трения / И.В. Крагельский, Н.В. Щавелин, Н.В. Гитис // Трение и износ. – 1984. – №5. – С.773–778.
51. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. - М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
52. Крагельский И.В. Узлы трения машин: Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. - М.: Машиностроение. –1984. – 280 с.
53. Криворудченко В.Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта / В.Ф. Криворудченко, Р.А. Ахмеджанов; Под ред. В.Ф. Криворудченко. – М.: Маршрут, 2005. – 436 с.

54. Лавров А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (Обзор) / А.В. Лавров, В.Л. Шкурятник // Акустический журнал. - 2005. - Том 51, Приложение. - С. 6 - 17.
55. Лавров А.В. Пространственная локализация разрушения как причина вариации амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии / А.В. Лавров // Акустический журнал. - 2005. - Том 51, №3. - С. 383-390.
56. Ланге Ю.В. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения / Ю.В. Ланге, В.А. Воронков. Справочник. Изд. второе. - Москва, 2003.
57. Лепедин А.А. Исследование характеристик акустико-эмиссионных сигналов при разрушении пористого железа / А.А. Лепедин, В.В. Поляков // Известия алтайского государственного университета. - 2009. - №1(61). - С. 124-128.
58. Лян С.Ю. Исследование формоизменения листового металла с помощью акустической эмиссии / С.Ю. Лян, Д.А. Дорнфелд // Современное машиностроение. - 1990. - Сер.Б. - № 7. - С. 99 - 107.
59. Макклиток Ф. Пластические аспекты разрушения. Разрушение: Т.3. - Пер. с англ. - М.: Мир, 1976. - С. 67 - 262.
60. Маламедов И.М. Физические основы надежности / И.М. Маламедов. - Л.: Энергия, 1970. - 152 с.
61. Маслов Б.Я. Измерение энергии и амплитуды импульсных АЭ сигналов / Б.Я. Маслов, В.А. Коротеев, А.Е. Стецюк // Дефектоскопия. - 2005. - №6. - С. 17-22 .
62. Мелехин В.П. Влияние механизмов пластической деформации цинка на акустическую эмиссию / В.П. Мелехин, Р.И. Минц, Л.М. Куглер // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. - 1971. - №3. - С.128 - 131.
63. Муравьев В.В. Влияние условий нагружения на информативные параметры и спектр сигналов акустической эмиссии в образцах углеродистых сталей / В.В. Муравьев, М.В. Муравьев, С.А. Бехер // Дефектоскопия. - 2002. - №7. - С. 10-20.

64. Німченко Т.В. Моделювання апаратури ІВС для реєстрації неперервної акустичної емісії / Т.В. Німченко, А.П. Стахова // Електроніка та системи управління. - 2007. - №4(14). - С. 110-113.
65. Німченко Т.В. Сучасні апаратні та програмні засоби для дослідження сигналів акустичної емісії / Т.В. Німченко, А.П. Стахова // Наука та молодь. - 2009. - №9. - С. 84-87.
66. Носов В.В. Методика определения информативных параметров акустической эмиссии / В.В. Носов // Дефектоскопия. - 1998. - N5. - С. 91-98.
67. Носов В.В. О выборе подхода к разработке методов неразрушающего контроля прочности изделий на основе использования явления акустической эмиссии / В.В. Носов, А.И. Потапов // Дефектоскопия. - 1996. - №6. - С. 39-44.
68. Носов В.В. Структурно-имитационная модель параметров акустической эмиссии / В.В. Носов, А.И. Потапов // Дефектоскопия. - 1996. - №6. - С. 30-38.
69. Овчарук В.Н. Идентификация механических параметров при статических испытаниях образцов по спектральным характеристикам сигналов акустической эмиссии / В.Н. Овчарук, Чье Ен Ун // Моделирование систем. - 2004. - №2(8). - С. 53-60.
70. Однокольцев А.В. Система неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии / А.В. Однокольцев, А.И. Власов, А.В. Руткевич // Инженерный вестник. - 2012. - №08. - С. 1-19.
71. Панфилов В.А. Электрические измерения : учебник: ЭБ.-3-е изд., испр. / В.А. Панфилов - М: Академия, 2006. - 288 с.
- 72.. Патент на корисну модель № 34919 Україна, МКП G01N 29/04, 3/56. Спосіб визначення контактної навантаженості в фрикційних вузлах в момент виникнення заїдання / Філоненко С.Ф., Стахова А.П., Кравченко В.Г., Стадниченко В.М. - № u200804250; заявл. 04.04.08; опубл. 26.08.08, Бюл. №16.

73. Пивоваров В.А. Прогрессивные методы технической диагностики авиационной техники: Учебн. Пособие / В.А. Пивоваров. – М.: Моск. гос. техн. ун-т гражд. Авиации. – 1999. – С.31–37
74. Поляков В.В. Моделирование акустической эмиссии при разрушении пористых металлических материалов / В.В. Поляков, А.В. Егоров, А.А. Лепендин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2004. - №8, Т.70. - С. 31-33.
75. Постановление Госгортехнадзора РФ от 09.06.2003 № 77 "Об утверждении Правил организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.06.2003 N 4778).
76. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого тела / И.А. Разумовский.- М.: Изд. МГТУ., 2007. - 240 с.
77. РД 03-131-97 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов»
78. Рудяк Ю.А. Метод визначення величин коефіцієнтів інтенсивності напружень за даними вимірювання поглинання інтенсивності світла / Ю. А. Рудяк // Вісник СумДУ. - 2012. - №4. - С. 88-91.
79. Свиридёнок А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свиридёнок, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова, О.В. Холодилов, под редакцией Белого В.А. - Мн.: Наука и техника, 1987. - 280 с.
80. Семашко Н.А. Акустическая эмиссия при решении некоторых вопросов авиационного производства/ Н.А. Семашко, В.И. Муравьев, А.В. Фролов и др. //Авиационная промышленность. – 2004. – №2. – С.85–89.
81. Скальський В.Р. До проблеми автоматизації діагностування конструкцій методом акустичної емісії / В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків // Технич. диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – С. 3 – 9.
82. Стадниченко В.М. Акустическая эмиссия при исследовании эффективности трибовостанавливающих составов / В.М. Стадниченко,

- А.П. Стахова // АВІА-2011: ІХ міжнар. наук.-техн. конф., 19-21 квіт. 2011 р.: тези доп. - К., 2011. - Т.1. - С. 1.19-1.22.
83. Стадниченко В.М. Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом акустической эмиссии / В.М. Стадниченко // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. - 2010. - №1(61). - С.109-117.
84. Стахова А.П. Результати моделювання сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів матеріалів з протіканням пластичної деформації / А.П. Стахова // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2016. - №1. - С. 41-44.
85. Стахова А.П. Проведення теоретичних і експериментальних досліджень для встановлення закономірностей зміни акусто-емісійного випромінення / А.П. Стахова // Наукоємні технології: наук.-техн. конф., 15-19 листоп. 2011 р.: тези доп. - К., 2011. - С. 48.
86. Стахова А.П. Взаимосвязь сигналов акустической эмиссии с напряженно-деформированным состоянием узлов трения / А.П. Стахова // АВІА-2009: VII міжнар. наук.-техн. конф., 21-23 верес. 2009 р.: тези доп. - К., 2009. - Т.1. - С. 1.1-1.4.
87. Стахова А.П. Інформаційно-вимірювальна система для визначення інформативних параметрів методом акустичної емісії / А.П. Стахова // Збірник наукових праць ОДАТРА. - 2016. - №1(8). - С. 69-72.
88. Стахова А.П. Система неруйнівного контролю методом акустичної емісії для статичних та динамічних видів випробувань / А.П. Стахова // Вісник Інженерної академії України. - 2015. - №4. - С. 127-129.
89. Стахова А.П. Акусто-емиссионная система с отдельной реализацией процедур кратковременных и длительных испытаний для исследования процессов трения / А.П. Стахова // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: 5-а наук.-практ. конф., 24-25 листоп. 2015 р.: тези доп. - Івано-Франківськ, 2015. - С. 194-195.

90. Стахова А.П. Визначення закономірностей акусто-емісійного випромінювання при моделюванні результуючого сигналу акустичної емісії / А.П. Стахова // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VI міжнар. наук.-практ. конф., 26-29 квіт. 2016 р.: тези доп. - Чернігів, 2016. - С. 312-314.
91. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. - М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993.- 454 с.
92. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / С.Ф. Филоненко. – К. :КМУГА, 1999. – 312 с.
93. Филоненко С.Ф. Акусто-эмиссионная система диагностики узлов трения / С.Ф. Филоненко, А.П. Стахова // Технологические системы. - 2008. - № 3(43). - С. 26-32.
94. Филоненко С.Ф. Моделирование сигналов акустической эмиссии при изменении объема материала, вступившего в пластическую деформацию / С.Ф. Филоненко, А.П. Стахова, В.Г. Кравченко // Технологические системы. – 2008. – №1(41). – С.22–27.
95. Филоненко С.Ф. Моделирование сигналов акустической эмиссии при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания / С.Ф. Филоненко, А.П. Стахова // Технологические системы. – 2007. – №4(40). – С. 41–47.
96. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. - М. : Metallurgy, 1970. - 376 с.
97. Фриштер Л. Ю. Расчетно-экспериментальный метод исследования НДС составных конструкций в зонах концентрации напряжений: автореф. дис. на соиск. науч. степени д-ра физ.-мат. наук / Л.Ю. Фриштер. – Москва, 2009. – 40 с.
98. Хирт Д. Теория дислокаций / Д. Хирт, И. Лоте. - М. : Атомиздат, 1972. - 600 с.
99. Шамин А.Е. Программно-аппаратный комплекс предварительной обработки сигналов акустической эмиссии / А.Е. Шамин, В.Н. Овчарук //

- Оразовательные, научные и инженерные приложения в среде LAB VIEW и технологии National Instruments - 2006: материалы научно-практической конференции. - М.: 2006.
100. Шарапов В.М. Электроакустические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, Л.Г. Куницкая, под ред. В.М. Шарапова. - Москва: Техносфера, 2013. 296 с.
 101. Acoustic emission and fracture of ductile materials / J. Masounave, J Lanteigne, M.N. Bassim and D.N. Hay // *Engng. Fract. Mech.* – 1976. – 8, №4. –P.701 – 709.
 102. Acoustic emission for the detection of shaft-to seal rubbing in large power generation turbines/ M. Leahy, D. Mba, P. Cooper, A. Montgomery, D. Owen. – *Advanced Materials Research.* – 2006. –vols.13-14. – P. 433–438.
 103. Acoustic Emission, ASTM STP 505, 1972. 560 p.
 104. Alan Hase, Masaki Wada and Hiroshi Mishina. Acoustic Emission in Elementary Processes of Friction and Wear // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C.* - Vol. 74 (2008). - №748. - P. 3042-3049.
 105. An information-measuring system for an acoustic emission signal selection and processing/ Bukhalo O., Klym B., Pochapsky E. and other / 15-th World Conf. On Non-Destr. Testing. (15-21 October 2000 in Roma). *Proceedings.*-P.78-82.
 106. An information-measuring system for an acoustic emission signal selection and processing/ O. Bukhalo, B.Klym, E.Pochapsky et al.// 15-th World conf. On Non-Destr. Testing (15-21 October 2000 in Roma). – 2000. – P. 78–82.
 107. Baranov V. Acoustic emission in friction AE/ V. Baranov, E. Kudryavtsev, G. Sarychev, V. Schavelin //Amsterdam. – 2007. –218 p.
 108. Bhat M.R., Murthy C.R.L. Fatigue damage stages in unidirectional glass-fibre-epoxy composites: identification through acoustic emission technique // *Int. J. Fatigue.*-№ 15, 1993.-P.401-405.
 109. Brown W. F, Jr. and Srawley J. E. Current status of plane crack toughness testing./ NASA TM X–52209. Cleveland, Ohio.– 1966. – 256 p.

110. Brown W. F, Jr. and Srawley J.E. Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials. /American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania. ASTM STP – 1967. – P.40.
111. Choudhury A. Application of acoustic emission techniques for the detection of defects in rolling element bearings/ A. Choudhury, N. Tandon // Tribology International. – vol. 33. – P. 39–45.
112. Dornfeld D. Process monitoring and control for precision manufacturing/ D. Dornfeld // Production engineering. –1999.— №6.– P. 29–34.
113. Dunegan H.L. Ultrasonic acoustic emission from materials.// IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1969. – №1. – P.16 – 32.
114. Eda H., Kanino Y. At all I-n process detection of grinding cracks by use of acoustic emission //Bull.Japan Sc. Of Pre.Eng.-1985.-19.-№3.-P.181-186.
115. Engle R. B. Acoustic emission and related displacements in lithium fluoride single crystals./ Ph.D. Thesis. Michigan State University, East Lansing Michigan. 1966.
116. Filonenko S.F. Definition of contact stress in friction units on the basis of the acoustic emission method application / S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova // Aviation. - 2009. - V. 13. - №. 3. - P. 72-77.
117. Filonenko S.F. Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction / S.F. Filonenko, A.P. Stakhova, T.N. Kositskaya // Proceedings of NAU. - 2008. - №2. - C.28-34.
118. Filonenko S.F. Modelling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers / S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova // Aviation. – 2008. –V.12. – №3. – P. 87–94.
119. Filonenko S.F. The modeling of acoustic emission radiation at normal wear/ S.F. Filonenko, V.N. Stadnychenko, A.P. Stakhova // AVIATION IN THE XXI-st CENTURY. Safety in aviation and space technology: the third world congress: proceedings, September 22-24, 2008. - K., 2008. - V.1. - P. 2.1-2.8.
120. Filonenko S.F. Research of influence of thermal resistance of elements of trybosystem on wearproofness of friction units / S.F. Filonenko, V.N.

- Stadnychenko, A.P. Stakhova // AVIATION IN THE XXI-st CENTURY. Safety in aviation and space technology: the forth world congress: proceedings, September 21-23, 2010. - K., 2010. - V.1. - P. 12.1-12.4.
121. Fisher R.M. and Lally L.S. Microplasticity detected by an acoustic technique. // *Canad. J. Phys.*, – 1967. – 45, №2. – P.1147 – 1159.
122. Fitzgerald E. R. Mechanical resonance dispersion and plastic flow in crystalline solids.// *Journal of the Acoustical Society of America* – 1960. – 32, №10. – P.1270 – 1289.
123. Fujii Y. et al. Review of the Levitation Mass Method (LMM)—A precision method for measuring mechanical quantities using an optical interferometer // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2016. – T. 1719. – №. 1. – P. 020001.
124. Geng R. Application of AE Technique onto Landing Gear Controlling Test of an Aircraft/ R. Geng, P. Jing, G. Fu, K. Wu. // *ECNDT*. – 2006.– 6 p.
125. Hamstadt M.A., O’Gallagher A., Gary J. Modeling of buried acoustic emission monopole and dipole sources with a finite element technique // *J.of acoustic emission*.-1999-v.17, N3-4.-P.97-110.
126. Harrison M.F. The acoustics of racing engine intake systems / M. Harrison, A. Dunkley // *Journal of Sound and Vibration*. 2004.– vol. 271. – P. 959–984.
127. Hojen-Sorensen P.A. Mean field approaches to independent component analysis/ P.A. Hojen-Sorensen, O. Winther, L.K. Hansen // *Neural Comput.* – 2002. –14. – P.889–918.
128. Houle P.A., Sethna J.P. Acoustic emission from crumpling paper // *Physic. Review E*.-1996.-v.54.-No 1.-P.278-283
129. ISO 9004:2009 Managing for the sustained success of an organization — A quality management approach
130. Jamaludin N. Condition monitoring of low-speed rolling element bearings using stress wave/ N. Jamaludin, R. Bannister // *Mechanical Engineering*. – 2006. – vol. 215. – P. 245–271.

131. James D.R. The sources of acoustic emission in deforming single crystals. /In: Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, 1971, Kyoto, Abstr.,vol.3 – P.960 – 961.
132. Jamison D. E., McDaniel C. R. Methods for determining mechanical quantities associated with a deformation force by utilizing an integrated computational element : пат. 9513110 США. – 2016.
133. Kalyanasundaram P. Characterization of Microstructures in Metallic Materials using Static and Dynamic Acoustic Signal Processing Techniques / P. Kalyanasundaram, B. Raj, T. Jayakumar. // Proc. Vth International Workshop: Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials. – 2005. – P. 43–50.
134. Madding R.P. Thermographic Instruments and systems. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin - Extension, Department of Engineering and Applied Science, Madison, Wisconsin, 1979.
135. Majeed M.A., Murthy C.R.L. A model with nonzero rise time for AE signals // Sādhanā.-v.25, Part 5, 2001.-465-474.
136. Mba D. Detection of shaft-seal rubbing in large-scale power generation turbines with Acoustic Emission/ D. Mba, A. Cooke, D. Roby, G. Hewitt // A Journal of Power and Energy. –vol. 218. –2004.– P.71–82.
137. McFadden P.D. Acoustic emission transducer for the vibration monitoring of bearings at low speeds / P.D. McFadden, J.D. Smith// Journal of Mechanical Engineering Science. – 1984. – vol. 198. – P.127–130.
138. McMeecking R.M. Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic–plastic materials and implications for fracture //J. Mech. and Phys. Solids. –1977. – 25,№5. – P.357–381.
139. Morris S. Use of Electrostatic Charge Monitoring for Early Detection of Adhesive Wear in Oil Lubricated Contacts/ S. Morris, J.K. Wood, T.J Harvey // ASME Journal of Tribology.– 2002. – №124. – P.288–296.
140. Ogbonah V. Condition monitoring of gear failure with acoustic emission . – Master`s degree thesis. – 2007. – 31 p.


141. Ookawa A. and Yazu K. The energy radiated from a dislocation by an accelerated motion through impurity fields.// *Journal of the Physical Society of Japan* – 1963. – 18 (Supplement I). – P. 36–43.
142. Possibilities of sliding pair diagnostics and control due to acoustic emission signals generated by contact friction zone process /V.M. Szchavelin, G.A. Sarichev, M.I. Schakhnovsky, V.M. Revenko // *Proc. of the 3 Symposium of the IMEKO.* – 1984. – P.501–512.
143. Quintelier J. Wear of steel against carbon fibre reinforced pps / J. Quintelier, P. Samyn, P. Baets, W. Ost, W. Van Paepegem// *Tribology in industry.* – vol.27. – № 3-4. – 2005. – P. 29–35.
144. Sato I. Rotating machinery diagnosis with acoustic emission technique. – *Electr. Eng.* – 110. –1990. –P.115–127.
145. Sato Y. Diagnosis of rotating slides in rotary compressors using acoustic emission technique. – *International Compressor Engineering.* – 1988. – P. 405 – 412.
146. Schofield B.H. Research on the sources and characteristics of the acoustic emission / In: *Acoustic emission, ASTM STP 505* – Baltimor, 1972. – P.11 – 19.
147. Serdobolskaja O.Yu. Acoustical emission at destruction of KCl TGS crystals// *XIII Session of the Russian Acoustical Society (Moscow, August 25-29, 2003).*-P.111-113.
148. Shibata M.A. A theoretical evaluation of acoustic emission signals the rise-time effect of dynamic forces // *Mater. Eval.*–1984.–№1.–P.107–116.
149. Sun J. Wear monitoring by acoustic emission and electrostatic technology/ J. Sun, J. K. Wood, L. Wang // *Surface Engineering & Tribology Group.* – 2007.–234 p.
150. T Yan and B E Jones. Tracebility of acoustic emission measurements using energy calibration methods // *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000) L9-L12.

151. Tan C. Identification of the Acoustic Emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox/ C.Tan, D. Mba // Tribology International. –vol. 38. –2005. – P. 469–480.
152. Tandon N. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings/ N. Tandon, A. Choudhury //Tribology International. –vol.32. –P.469–480.
153. Tandon N. Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings/ N. Tandon, A. Choudhury // Tribology International – vol. 28. – P.301–306.
154. Tandon N. Detection of defects in gears by acoustic emission measurement/ N. Tandon, S. Mata // Journal of acoustic emission. – vol. 17. – 1999. – P.23–27.
155. The acoustic emission signals modelling at friction of materials' surface layers / V.P. Babak, S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko [and et al.] // Wear (London, UK). - in printing.
156. Toutountzakis T. Observation of acoustic emission activity during gear defect diagnosis/ T. Toutountzakis, D. Mba // NDT and E International. – №36.– 2003. –P. 471–477.
157. Ucisik H. and Ono K. Acoustic emission characteristics of high strength aluminum alloys during fracture toughness test. / Proc. Second Acoustic Emission Symposium. Japan Industrial Planning Association, Tokyo, Japan. 2–4 Sep, 1974. – Session 4. – P.64–65.
158. Wang X. A new contact metal ceramic-fluid acoustic emission sensor/ X.Wang, Z.Wang, F. Li // Experimental Techniques. –2003. – vol.27. –2003. – P. 27–30.
159. Wavelet transform of AE signals/ H. Suznki, T. Kinjo, Y.Hayachi and et al.// J. of Acoustic emission.–1996.–vol.14.– №2.–P.69–84.
160. X.Lei, K.Kusunose. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compressing using acoustic emission monitoring //J.of Geophys. Research.-v.105, № B3, 2000.-P.6127-6139.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ «Український кардан»
м. Чернігів

 Трейтяк В.О.
05.2016 р.
код 33800101
Україна м. Чернігів

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Стахової Анжеліки Петрівни
у виробничих умовах ТОВ «Український кардан»

Цей акт складено комісією ТОВ «Український кардан» у складі:
голова комісії

виконавчий директор

Потапенко А.М.

та членів комісії:

заступник виконавчого директора

Кононенко В.І.

з підготовки виробництва

заступник виконавчого директора

з виробництва

Верхулевський О.І.

головний технолог

Примак М.М.,

яка констатує, що за результатами дисертаційної роботи Стахова А.П. проаналізувала експериментальні закономірності зміни параметрів результуючого сигналу акустичної емісії при механічних навантаженнях поверхневих шарів матеріалів і зміні умов взаємодії поверхонь контакту та запропонувала метод визначення контактних напружень за сигналами акустичної емісії, який базується на встановленні взаємозв'язку середнього рівня результуючого сигналу акустичної емісії з величиною контактних напружень і забезпечує підвищення достовірності визначення контактних напружень.

Комісія відзначає, що Стахова А.П. розробила концепцію побудови, технічні та програмні засоби мобільної системи збору, обробки, аналізу акусто-емісійної інформації та виводу її результатів.

Комісія підтверджує, що отримані результати досліджень Стахової А.П., зокрема метод визначення контактних напружень був впроваджений та успішно використовується в технологічних процесах при виробництві продукції на ТОВ «Український кардан» м. Чернігів.

Голова комісії:

Члени комісії:


 А.М. Потапенко
В.І. Кононенко
О.І. Верхулевський
М.М. Примак

ПОГОДЖЕНО

Проректор з навчальної та виховної роботи НАУ
 Т. Іванова
 “ 05 ” 12 2016 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

В.о. ректор

“ ” 2016 р.

**АКТ****впровадження результатів дисертаційної роботи**

Комісія у складі: голова комісії – завідувач кафедри інформаційно-вимірjuвальних систем д.т.н., доцент Орнатський Д.П. та членів комісії: завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, д.т.н., професор Квасніков В.П., професор кафедри інформаційно-вимірjuвальних систем, д.т.н., професор Щербак Л.М. констатує, що результати дисертаційної роботи асистента кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету Стахової Анжеліки Петрівни впроваджені у навчальний процес Національного авіаційного університету на кафедрі інформаційно-вимірjuвальних систем та на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій навчально-наукового інституту інформаційно-діагностичних систем, а саме:

Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, алгоритми, програми, ДСТ, технологічні вимоги, інше)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний, інший)
1	2
Методика проведення короткочасних та тривалих досліджень для вимірювання механічних величин	Наявність єдиних пристроїв та пріоритетність програмного забезпечення дозволило реалізувати в єдиній системі процедури короткочасних та довготривалих випробувань з вимірюванням механічних напружень
Метод визначення контактних напружень за сигналами акустичної емісії	Розроблений метод заснований на встановленому взаємозв'язку середнього рівня результуючого сигналу акустичної емісії з величиною контактних напружень і забезпечує підвищення достовірності визначення контактних напружень та деформацій

1	2
Приладова система та програмний математичний комплекс для вимірювання механічних напружень	Матеріали для вивчення студентами лабораторних робіт по вимірюванню механічних величин об'єктів на основі явища акустичної емісії

Результати дисертаційної роботи Стахової А.П. за темою «Приладова система для вимірювання механічних напружень на основі явища акустичної емісії» впроваджені у навчальний процес кафедри інформаційно-вимірювальних систем та кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій:

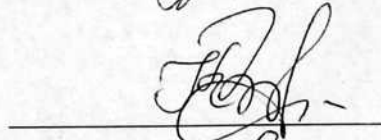
- застосовуються в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології».
- використовуються у курсах з дисциплін «Фізичні основи сучасної метрології» та «Автоматизація експериментальних досліджень напряму підготовки 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» зі спеціальністю 7(8).05100102 «Інформаційні вимірювальні системи» при проведенні лабораторних та практичних робіт.

Голова комісії:



Д.П. Орнатський

Члени комісії:



В.П. Квасніков



Л.М. Щербак

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

