

## Содержание

<b>Обозначения и сокращения.....</b>	<b>7</b>
<b>Введение .....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1.</b>	
<b>Научные основы аппаратной реализации компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов .....</b>	<b>11</b>
1.1 Общие сведения .....	11
1.2 Основные понятия.....	13
1.3 Общая методика разработки ПАК.....	15
1.3.1 Общая технология создания ПАК.....	15
1.3.2 Устройство сбора данных.....	19
1.4 Датчики физических величин.....	22
1.4.1 Метрологические характеристики датчиков .....	22
1.4.2 Системы согласования сигналов.....	26
1.4.3 Методы подключения сигналов с датчиков.....	30
1.4.4 Схемы формирования сигналов измерительных преобразователей.....	39
1.4.5 Датчики с токовым выходом.....	42
1.4.6 Датчики электрического заряда .....	43
1.4.7 Резистивные датчики .....	44
1.5 Сбор данных.....	46
1.5.1 Аналого-цифровое преобразование.....	46
1.5.2 Апертурное время .....	49
1.5.3 Шум квантования.....	50
1.5.4 Статические параметры .....	51
1.5.5 Динамические параметры .....	52
1.5.6 АЦП в составе модулей или плат сбора данных .....	53
1.6 Многофункциональные платы и модули сбора данных.....	55
1.6.1 Общая структура плат сбора данных .....	55
1.6.2 Платы и модули сбора данных .....	56

1.6.3 Многофункциональные модули сбора данных.....	58
1.7 Предварительная обработка оцифрованных сигналов.....	60
1.8 Методология разработки алгоритмического и программного обеспечения идентификационных измерений .....	62
<b>Глава 2.</b>	
<b>Разработка исследовательской системы .....</b>	<b>69</b>
2.1 Аппаратная реализация исследовательской системы .....	69
2.2 Методика анализа испытательных сигналов.....	71
2.3 Программное обеспечение исследовательской системы .....	73
<b>Глава 3.</b>	
<b>Апробация исследовательской системы.....</b>	<b>78</b>
3.1 Диагностика водородного топливного элемента.....	78
3.1.1 Объект исследования .....	78
3.1.2 Условие эксперимента по исследованию ТЭ.....	80
3.1.3 Результаты эксперимента.....	83
3.2 Диагностика гидроагрегата ГЭС .....	100
3.2.1 Описание объекта исследования и результаты аналитических исследований по вибродиагностике.....	100
3.2.2 Первый вариант технологических решений вибродиагностики гидроагрегата.....	106
3.2.3 Второй вариант технологических решений вибродиагностики гидроагрегата 110	
3.3 Предварительная диагностика состояния сердечно-сосудистой системы человека .....	113
3.3.1 Аналитические исследования в области патологии сердечно-сосудистой системы.....	114
3.3.2 Методика и инструменты исследования .....	122
<b>Заключение .....</b>	<b>136</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>139</b>
<b>Приложение А.....</b>	<b>144</b>

## Обозначения и сокращения

АСУ	Анодная система увлажнения
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
БДЭС	База данных электронных сигналов
ВБ	Верхний бьеф
ВП	Виртуальный прибор
ВРУ	Выбор режима увлажнения
ВЧП	Вычислительная платформа
Д	Датчик
ИАС	Идентификационный анализатор сигналов
ИИ	Идентификационный инструмент
ИИС	Информационно-измерительная система
ИКл	Иерархический классификатор
ИК	Измерительные каналы
ИОН	Источник опорного напряжения
ИП	Измерительный преобразователь
ИУ	Инструментальный усилитель
ИШ	Идентификационная шкала
К	Компаратор
КАИ	Канал абсолютных измерений
КОИ	Канал относительных измерений
КП	Компьютерный прибор
КСУ	Катодная система увлажнения
ЛК	Лингвистический код
МСД	Модуль сбора данных
НГП	Нижний генераторный подшипник
НИР	Научно-исследовательская работа
НК	Нижняя крестовина
НУ	Нормализирующее устройство

ОЗУ	Оперативное запоминающее устройство
ПАК	Программно-аппаратный комплекс
ПБ	Правый берег
ПИП	Первичный измерительный преобразователь
ПК	Персональный компьютер
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
ПЛК	Программируемый логический контроллер
ПО	Программное обеспечение
ПСД	Плата сбора данных
РВИ	Распределение временных сигналов
РМЗ	Распределение мгновенных значений
РОР	Регулятор объемного расхода
РТ	Регулировка температуры
СИЭ	Система измерения электрического сигнала
СС	Считыватель сигналов
ССС	Сердечно-сосудистая система
ТИИС	Теория идентификационных измерений сигналов
ТК	Табличный классификатор
ТЭ	Топливный элемент
УПК	Усилитель с программируемым коэффициентом усиления
УСД	Устройство сбора данных
УУ	Устройство управления
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
ЦОС	Цифровая обработка данных
ЦСП	Цифровой сигнальный процессор
ЭКГ	Электрокардиограмма

## **Введение**

Кардинальным путем развития теории и технологий измерений является распространение принципа «метризуемости» на все большее число свойств (величин) объектов и процессов окружающего мира. Принцип – «измеряй неизмеримое», сформулированный еще Галилеем в средние века, остается актуальным и в настоящее время.

Как известно форма сигнала является весьма информативной, измеряемой и преобразуемой величиной. Данное положение послужило основой для создания нового научного направления – теории идентификационных измерений сигналов (ТИИС) [1].

Предложенные компьютерные приборы и инструменты измерения и преобразования формы сигнала (или его характеристик) имеют преимущества над аналогами по следующим свойствам: анализ сигналов в широком диапазоне, высокая точность измерений, распознавания и идентификации, универсальность, встраиваемость в автоматизированные системы. А, следовательно, ТИИС имеет большую перспективу для решения прикладных задач управления, контроля и диагностики.

Дальнейшим развитием НИР стало проведение мероприятий по разработке исследовательской системы на основе инструментов и методов ТИИС, ее внедрению в энергетике, виброакустическом анализе и электрокардиографии.

В первом разделе монографии описано создание научно-теоретических основ проектирования и конструирования аппаратной части, разработки алгоритмического и программного обеспечения компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов на основе идентификационных измерений сигналов. Обеспечить высокую степень гибкости автоматизированных систем сбора данных и управления позволяет использование модульного принципа реализации аппаратного и программного обеспечения.

Во втором разделе представлен материал по разработке универсальной и эффективной исследовательской системы на основе инструментов и методов ТИИС. Аппаратная часть исследовательской системы реализована на основе реконфигурируемой, надежной и компактной системы управления и сбора данных в режиме реального времени National Instruments CompactRIO. Программное обеспечение исследовательской системы – сложный комплекс виртуальных приборов с возможностями интеллектуальной обработки периодических и случайных сигналов, управления базами данных, удобным интерфейсом пользователя. Исследовательская система может решать задачи измерения, оценки состояния, диагностики, управления различными сложными объектами.

В третьем разделе представлены результаты апробации (применения) разработанной исследовательской системы для решения реальных прикладных задач:

- разработка методов диагностики водородного топливного элемента;
- оценка состояния подшипниковых узлов и диагностика по вибрационным сигналам гидроагрегата;
- предварительная диагностика состояния ССС человек по ЭКГ.

Некоторые исследования были проведены в рамках творческого сотрудничества с зарубежными учеными.

## **Глава 1.**

### **Научные основы аппаратной реализации компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов**

#### **1.1 Общие сведения**

При современном уровне развития науки и техники сформировался обширный класс контрольно-измерительных и управляющих систем, задачей которых является автоматизированный сбор данных и управление технологическими процессами различной степени сложности. Стремительное развитие информационных технологий оказало значительное влияние на принципы создания такой контрольно-измерительной техники. Использование персональных компьютеров и микроконтроллерного управления при создании аппаратных средств позволило добиться высокой степени быстродействия, точности и автоматизации процессов мониторинга и управления.

Добиться значительной степени гибкости автоматизированных систем сбора данных и управления позволяет использование модульного принципа реализации аппаратного и программного обеспечения. Системы, основанные на данном принципе, способны дать конечному пользователю свободу в выборе функционального назначения используемого оборудования. Этот аргумент становится весьма актуальным, так как применение готовых систем не сможет обеспечить идеально подходящих характеристик для конкретного приложения. Точное соответствие требованиям решаемой задачи может обеспечить только система, позволяющая произвольным образом выстраивать свои технические характеристики.

Путь к созданию подобных автоматизированных систем заключается в объединении широко распространившейся и проникшей во все сферы человеческой деятельности компьютерной технологии общего назначения с современными технологиями сбора данных и управления. Можно предположить, что такая интеграция потребует специфичных знаний в области

программирования аппаратуры управления и сбора данных. Однако современные программные средства дают возможность рядовому пользователю персональным компьютером в короткие сроки овладеть технологией программирования аппаратной части системы за счет применения объектно-ориентированных языков программирования.

Программно-аппаратные комплексы, построенные на базе серийно выпускаемых персональных компьютеров (ПК), автоматически приобретают мощные вычислительные средства, современные технологии обработки и анализа данных, в том числе в реальном времени, надежные системы передачи и хранения информации. За счет технологичности производства ПК существенно снижается стоимость реализуемых на их основе контрольно-измерительных систем. Такие системы легко модернизируются в соответствии с современным уровнем развития электронно-вычислительной техники.

Непосредственный ввод данных в ПК может производиться через стандартные платы, устанавливаемые пользователем в слоты компьютера. В соответствии с этим, на данный момент на рынке измерительной техники существует сегмент стандартизированных и недорогих аппаратных средств, реализуемых на базе ПК, которые с легкостью интегрируются в функционально сложные системы управления и контроля. Данный вид аппаратуры дает возможность отказаться от использования дорогостоящих программно-аппаратных комплексов, способных решать узкий круг задач и являющихся непригодными для реконфигурации.

Объединение ПК со специальной аппаратурой сбора данных и управляющего программного обеспечения образует некоторый инструмент сбора данных – автоматизированную измерительную систему. Так как конечный потребитель может задавать необходимую функцию этого инструмента, то такую интеграцию можно классифицировать как «виртуальный прибор» (ВП) или компьютерный прибор (КП).

Следует отметить, что для ряда приложений локальный сбор данных может быть неприемлемым - слишком агрессивна для компьютера физическая среда. В



этом случае проблема решается при помощи установки на объектах программируемых логических контроллеров, которые в свою очередь имеют большие возможности для связи с ПК.

Таким образом, становится очевидным, что многие функции, необходимые для построения измерительных приборов, можно реализовать средствами компьютерной техники. Эта возможность основывается на концепции [2] использования компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов.

В результате можно утверждать, что для удовлетворения все возрастающих нужд современного производства нельзя больше опираться на ограниченное число производителей традиционных приборов, которые не в состоянии удовлетворить весь спектр потребностей в специальных инструментальных средствах. Пользователи и производители проявляют все больший интерес к преимуществам виртуальных приборов, обосновывая это их функциональной гибкостью, высокой производительностью, дешевизной и простотой в эксплуатации.

## **1.2 Основные понятия**

По причине преимущественного доминирования на отечественном рынке аппаратных и программных средств зарубежных производителей (США, Западная Европа) появилось большое количество технической терминологии, заимствованной из англоязычных источников. Среди них понятие «система сбора и обработки информации», происходящее от англ. «data acquisition system». В отечественной литературе данное понятие используется как синоним термину «измерительная система» [2].

Под информационно-измерительной системой (ИИС) понимается совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы (ИК), и вспомогательных устройств (компонентов измерительных систем), функционирующих как единое целое,

предназначенная для: получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние; машинной обработки результатов измерений; регистрации и индикации результатов измерений и результатов их машинной обработки; преобразования этих данных в выходные сигналы.

Современные ИИС обладают рядом существенных особенностей, среди которых:

- высокие технические характеристики и расширенные функциональные возможности вследствие применения современной элементной базы;
- широкое использование электронно-вычислительных средств;
- тенденция к применению модульных систем и типовых аппаратных платформ;
- высокая степень автоматизации процесса сбора и обработкой измерительной информации.

Таким образом, современная ИИС – это высокопроизводительная автоматизированная система, основанная на использовании модульных аппаратных средств и мощного ПО, запускаемого на ПК или промышленном контроллере. В такой ситуации программные и аппаратные средства ИИС тесно связаны между собой, что позволяет говорить об аппаратно-программных комплексах или другими словами компьютерных приборах.

Программно-аппаратный комплекс составляют готовые аппаратные и программные модули, на основе которых можно создавать ИИС без проведения сложной разработки. Таких модульных платформ на мировом рынке имеется в настоящее время достаточное количество, и каждая из них предназначена для определенной области использования, обладает необходимой гибкостью и многофункциональностью.

Подобная реализация ИИС дает возможность осуществления внешней управляемости системой посредством ПК и специализированного ПО, поддерживающего создание графического интерфейса пользователя. В частности

и по этим причинам для обозначения подобных систем, интегрированных с ПК, часто применяют термин «компьютерный прибор».

### **1.3 Общая методика разработки ПАК**

#### **1.3.1 Общая технология создания ПАК**

Предложим общую технологию создания программно-аппаратных комплексов для автоматизированного сбора данных и управления на основе системного подхода к проектированию сложных объектов. Как известно основной общий принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей явления или сложной системы с учетом их взаимодействия.

В соответствии с этим целесообразно при описании технологии создания автоматизированной измерительной системы применить блочно-иерархические принципы представления о проектируемой системе. Сложная система будет расчленяться на иерархические уровни. Так на верхнем уровне используется наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень подробности описания будет возрастать, при этом рассматривается уже отдельные блоки системы, но с учетом воздействий на каждый из них его соседей. Такой подход позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности, поддающиеся решению с помощью имеющихся средств проектирования. Разбиение на уровни производится таким, чтобы документация на блок любого уровня была обзрима и легко воспринимаема.

Методика синтеза структуры ПАК так же должна обеспечивать достаточно свободы для выбора конкретных технических решений. Поэтому правильно спроектированная система будет допускать множество технических реализаций путем выбора различных компонентов архитектуры и методов взаимодействия между ними.

В соответствии с этим при построении структуры ПАК должны быть заложены следующие свойства будущей автоматизированной системы:

- слабая связанность элементов архитектуры между собой (т. е. декомпозицию системы на части следует производить так, чтобы обмен данными между компонентами был минимален и через них не замыкались контуры автоматического регулирования);
- тестируемость (возможность установления факта правильного функционирования);
- диагностируемость (возможность нахождения неисправной части системы);
- ремонтпригодность (возможность восстановления работоспособности в кратчайшие сроки при оправданных экономических затратах);
- надежность (например, путем резервирования и дублирования);
- простота обслуживания и эксплуатации (минимальные требования к квалификации и дополнительному обучению эксплуатирующего персонала);
- безопасность (соответствие требованиям промышленной безопасности и технике безопасности);
- экономичность (экономическая эффективность в процессе функционирования);
- модифицируемость (возможность перенастройки для работы с другими технологическими процессами или типами данных);
- функциональная расширяемость (возможность ввода в систему дополнительных функциональных возможностей, не предусмотренных в техническом задании);
- наращиваемость (возможность увеличения размера автоматизированной системы при увеличении размера объекта автоматизации или объема информации);
- максимальная длительность жизненного цикла системы без существенного морального старения, достигаемая путем периодического

обновления аппаратных и программных компонентов, а также путем выбора долгоживущих промышленных стандартов;

- минимальное время на развертывание системы.

Структура системы может быть различной в зависимости от решаемой задачи автоматизации измерения и контроля [2]. Такими задачами могут быть:

- мониторинг (продолжительные или дискретные измерения и контроль с архивированием полученной информации);
- автоматическое управление (в системе с обратной связью или без нее);
- диспетчерское управление (управление с помощью человека-диспетчера (эксперта), который взаимодействует с системой через человеко-машинный интерфейс);
- обеспечение безопасности.

Тогда, в самом общем виде структурную схему ПАК, позволяющую удовлетворять приведенным выше критериям, можно представить в виде, изображенном на рисунке 1.

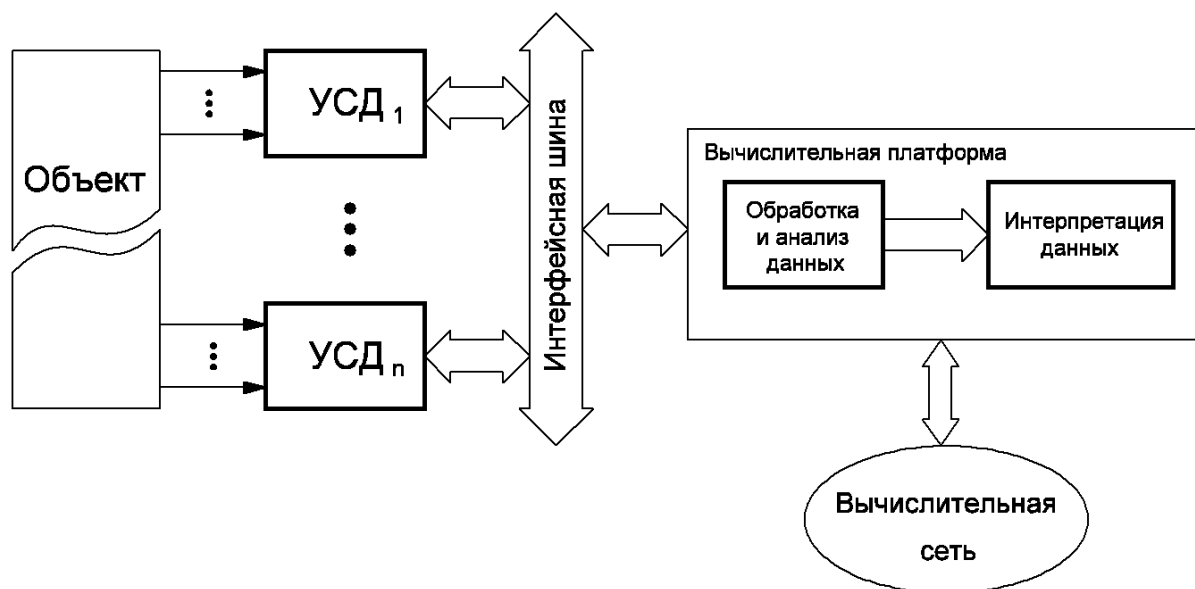


Рисунок 1 – Общая структура ПАК

Данная структурная схема будет удовлетворять аппаратному обеспечению различных фирм-производителей, так как они схожи между собой и удовлетворяют современному уровню развития электроники.

Как следует из рисунка 1, ПАК может содержать несколько устройств сбора данных (УСД). Задача УСД заключается в получении измерительных сигналов от объекта измерения (Объект) с помощью первичных измерительных преобразователей, нормализации сигналов, коммутации заданного числа каналов данных и аналого-цифрового преобразования. Несколько УСД используются в распределенных ИИС, когда необходимо получать данные с многих удаленных объектов измерения.

В этом случае говорят о задачах телемеханики (дистанционные измерение, управление, сигнализация). Однако, в связи с тем, что каналы дистанционной связи (интернет, радиоканал, опτικο-волоконный канал, проводной канал) органично входят практически в любую систему автоматизации, задачу телемеханики все реже выделяют как самостоятельную.

В общем случае УСД одной ИС могут быть разнотипными. Кроме того распределенная ИС может быть как одноуровневой, так и многоуровневой, центрального или децентрализованного управления.

В качестве вычислительной платформы (ВЧП) на рисунке 1 может выступать ПК и/или программируемый логический контроллер (ПЛК) в зависимости от решаемой задачи и условий окружающей среды. ВЧП в распределенной ИС управляет сбором данных, посылая к УСД соответствующие команды, может собирать уже готовые массивы измерительной информации для последующей обработки более высокого уровня, производит анализ полученной информации и осуществляет интерпретацию данных. Несколько вычислительных платформ могут быть объединены в вычислительную сеть.

За обмен данными между УСД и ВЧП отвечает интерфейсная шина, обозначающая на схеме рисунок 1 один из стандартных компьютерных интерфейсов.

В соответствии с рисунком 1, сформулируем основные конструктивные требования, необходимые для создания программно-аппаратных комплексов и компьютерных приборов:

- использование ПК или ПЛК;
- использование набора специальных аппаратных модулей, которые интегрируются в ВЧП в качестве внутренних и/или внешних устройств и без ВЧП функционировать не могут;
- использование специализированного ПО, включающего в свой состав драйверы упомянутых устройств и средства, формирующие и поддерживающие графический интерфейс пользователя;
- использование для разработки ПО специальной среды графического программирования, созданной для этой цели (например, LabVIEW).

Далее рассмотрим особенности реализации и использования компонентов системы, представленной на рисунке 1, в отдельности.

### 1.3.2 Устройство сбора данных

Структурная схема УСД в модульном исполнении, представлена на рисунке 2.

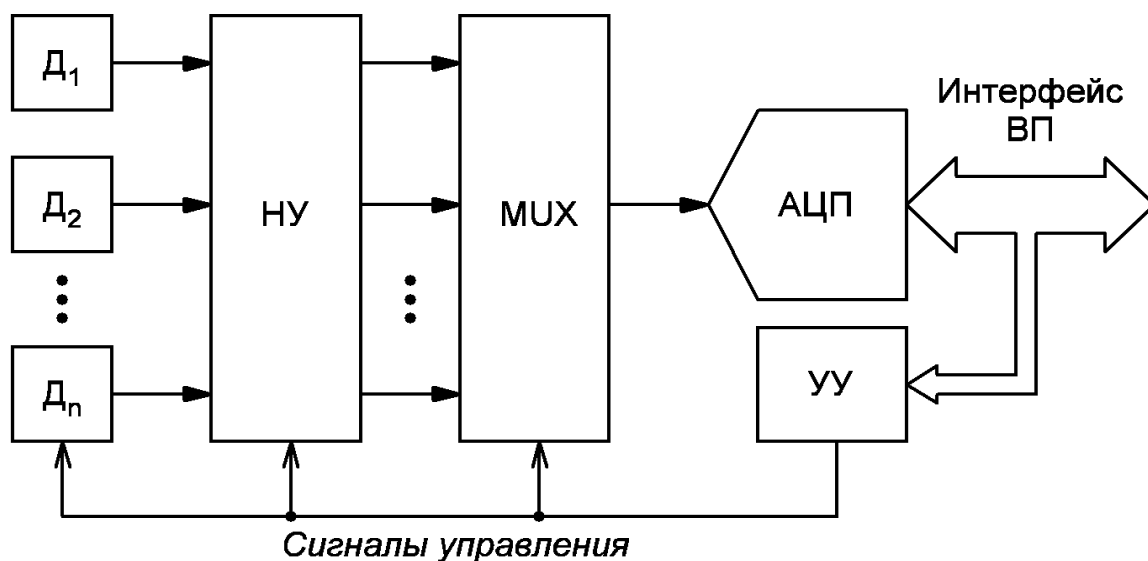


Рисунок 2 – Устройство сбора данных

В соответствии с рисунком 2, УСД может состоять из  $n$ -ого количества датчиков (Д). В структуре датчиков [3] обычно выделяют измерительный преобразователь, непосредственно связанный с измеряемой величиной, т.е. непосредственно воспринимающий энергию измеряемой величины, и называют его первичный измерительный преобразователь (ПИП) или чувствительный элемент.

Чувствительный элемент – это измерительный преобразователь, обеспечивающий преобразование измеряемой величины в информативный сигнал, удобный для последующего использования (передачи, обработки, хранения и т.п.). Чувствительный элемент должен быть инвариантным к неинформативным параметрам и обеспечивать заданную функцию преобразования относительно информативных параметров. Это достигается комбинацией технологических, конструктивных и алгоритмических методов. Первичный измерительный преобразователь в значительной степени определяет основные технические характеристики датчика.

Датчики могут принимать от объекта измерения сигналы различного типа. В общем случае можно говорить об активных и пассивных датчиках. Активные датчики осуществляют преобразование энергии от входа к выходу. Пассивные или параметрические – это датчики, в которых входная энергия изменяет параметры определенных элементов ПИП. Активные и пассивные датчики различаются способами формирования сигналов и схемами сопряжения.

Современные датчики [4] способны воспринимать следующие входные физические величины: электрические, магнитные, тепловые, механические, геометрические, оптические, акустические, ионизационные, концентрации и состава вещества. Для этого применяются такие физико-химические эффекты, как резистивные, электростатические, электромагнитные, оптические, биохимические, изменения электрического заряда, напряжения или тока, геометрических размеров, массы или положения.

Подавляющее большинство используемых датчиков формируют на выходе сигналы электрической природы, которые согласно рисунку 2 поступают на вход



многоканального нормализующего устройства (НУ). Его задача заключается в формировании  $n$  сигналов в форме напряжений определенного диапазона значений. Это необходимо для согласования выходных сигналов датчиков с последующими устройствами. Поэтому состав НУ, как правило, входят мостовые схемы, измерительные усилители, линейризаторы, образцовые меры, масштабирующие блоки, фильтры и т. п.

Далее, согласно рисунку 2, нормализованный многоканальный измерительный сигнал мультиплексируется (MUX) и поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для передачи цифрового сигнала в вычислительную платформу над ним необходимо произвести заданные преобразования в соответствии с используемым интерфейсным протоколом.

С помощью того же интерфейса производится управление УСД, в частности настройка АЦП. На схеме (рисунок 2) показано устройства управления (УУ), в задачи которого входит регулировка работы датчиков и НУ, а так же коммутация портов мультиплексора.

В качестве интерфейса вычислительной платформы (ВЧП) следует понимать [5]:

- внешние интерфейсы ПК – RS-232, USB, Fire Wire (IEEE-1394) и др.;
- стандарты локальных компьютерных сетей: Ethernet, Arcnet и др.;
- системные шины ПК – ISA, PCI, Compact PCI, PCICMCIA и др.;
- приборный интерфейс IEEE-488.1 (другие названия: HP-IB, GPIB, МЭК-625.1);
- магистрали для промышленных систем и контроллеров (PLC) – CANbus, MODbus, Fieldbus и др.;
- магистрали магистрально-модульных измерительно-вычислительных и управляющих систем и комплексов: VME, VXI, PXI и др.

Отметим, что схема, представленная на рисунке 2, имеет упрощенный характер и не отражает полного состава УСД. Более детализировано структуру УСД можно будет оценить рассматривая в отдельности каждый из компонентов.

## 1.4 Датчики физических величин

### 1.4.1 Метрологические характеристики датчиков

Давая оценку основным метрологическим характеристикам датчиков необходимо обозначить основополагающее понятие, лежащее в основе принципа их работы. Измерительное преобразование – это операция преобразования входного сигнала  $x$  в выходной сигнал  $y$ , информативный, параметр которого с заданной точностью функционально связан с информативным параметром входного сигнала. Тогда измерительный преобразователь (ИП) — это техническое средство, реализующее измерительное преобразование[3].

К основным техническим характеристикам ИП относятся [3]:

- номинальная статическая характеристика преобразования;
- уравнение преобразования;
- коэффициент преобразования;
- чувствительность;
- диапазон измерений;
- быстродействие;
- погрешность измерения (преобразования).

Одной из основных метрологических характеристик измерительных преобразователей является статическая характеристика преобразования (иначе называемая функцией преобразования или градуировочной характеристикой). Она устанавливает зависимость  $y = f(x)$  информативного параметра  $y$  выходного сигнала измерительного преобразователя от информативного параметра  $x$  входного сигнала. Такая аналитическая зависимость будет называться уравнением преобразования.

Статическая характеристика нормируется путем задания в форме уравнения, графика или таблицы.

Если статическая характеристика преобразования линейна, т.е.  $y = kx$ , то коэффициент  $k$  называется чувствительностью измерительного прибора

(преобразователя). В противном случае под чувствительностью следует понимать производную от статической характеристики.

Указанные характеристики конкретного датчика получают с помощью совокупности измерительных операций, которые называются градуировкой датчика.

Чувствительность – это отношение приращения величины выходного сигнала  $Y$  к приращению величины входного сигнала  $X$  или производная функции преобразования:

$$s = dy/dx \quad (1)$$

Чувствительность цепочки последовательно соединенных датчика и вторичных ИП с линейными функциями преобразования равна произведению их чувствительностей:

$$s = \prod_i s_i. \quad (2)$$

Выражение (2) определяет результирующую чувствительность и определяет требование линейности преобразования каждого из измерительных преобразователей.

Важнейшей проблемой при использовании датчиков является обеспечение постоянства чувствительности  $s$ , которая должна как можно меньше зависеть от частоты измерений, времени и воздействия других физических величин, характеризующих не сам объект, а его окружение.

Для преобразователей с линейной зависимостью значение чувствительности равно коэффициенту преобразования.

Следующее понятие – диапазон измерений, определяемый разностью предельных величин, ограничивающих диапазон измеряемой величины, в котором работа ИП соответствует принятым условиям (заданным требованиям).

Так же часто на практике используется понятие динамический диапазон, определяемый соотношением

$$D = 20 \lg \frac{x_k}{x_n}, \quad (3)$$

где:  $x_k$  - конечное значение диапазона, определяемое допустимым значением нелинейных искажений, а  $x_n$  - начальное значение диапазона, в два раза превышающее уровень собственных шумов.

Быстродействие – это параметр датчика, позволяющий оценить, как выходная величина следует во времени за изменениями измеряемой величины. Скорость затухания переходного (неустановившегося) процесса в датчике, играет решающую роль при выборе последнего в качестве входного ИП при воздействии на средство измерений, работающее в динамическом режиме. При этом иногда пользуются аналогичным термином – постоянной времени, также характеризующей инерционные свойства преобразователя. Отсюда появляется требование быстродействия датчика. Очевидно, что вклад переходных режимов в применяемых датчиках должен быть сведен к минимуму.

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Она возникает из-за несовершенств измерительной цепи, в которой частично теряется информация о сигнале в процессе его обработки

Погрешность измерений можно оценить лишь приближенно, поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно. Однако строгое и точное понимание особенностей измерительного канала позволяет уменьшить погрешность измерений и, следовательно, более уверенно говорить об истинном значении измеряемой величины.

По характеру неопределённости различают систематические и случайные погрешности. Систематические погрешности это:

а) погрешности значения опорной величины, смещение нуля прибора, ошибки при определении опорной температуры (термопара), опорного напряжения (измерительный мост);

б) погрешности, связанные с определением характеристик датчика (коэффициент преобразования), ошибки при градуировке;

в) погрешности, связанные со способом и условиями применения самого датчика (быстродействие, влияние самого датчика на измеряемый параметр);

г) погрешности из-за использования необработанных надлежащим образом данных (отклонение от линейности, саморазогрев и т.д.).

Уменьшение систематической составляющей погрешности заключается в проведении комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на устранение или снижение перечисленных выше категорий.

Случайные погрешности представляют собой:

а) погрешности, связанные с собственными параметрами измерительной аппаратуры (порог чувствительности, погрешности считывания прибора, погрешности гистерезиса, погрешности квантования АЦП и др.);

б) появление в измерительной цепи паразитных случайных сигналов (шумы, наводки электромагнитных полей, флуктуации питающего напряжения и др.);

в) погрешности, вызванные влияющими величинами (температура, влажность и др.).

Для уменьшения случайных погрешностей следует:

- производить защиту измерительного канала от причин погрешностей;

- использовать рациональные измерительные процедуры (дифференциальные схемы измерения, устранение наводок и др.);

- проводить обработку результатов.

Таким образом, представленная выше информация показывает, что выбор типа первичного преобразователя с соответствующими решаемой задаче

характеристиками является весьма сложной задачей и будет не под силу неподготовленному пользователю

#### 1.4.2 Системы согласования сигналов

Как отмечалось ранее, для измерения различных физических величин используются различные типы датчиков. В таблице 1 представлены основные типы датчиков, генерирующие электрический сигнал, пропорциональный измеряемой физической величине.

Каждый тип датчиков из таблицы 1 требует особых условий для преобразования физического явления в измерительный сигнал. Уровень электрического сигнала, создаваемый датчиками должен быть приведен к соответствующему входному диапазону. Для этого используется нормализующее устройство (рисунок 2), в котором усиливаются сигналы низкого уровня, а так же изолируются и фильтруются для более точных измерений. Кроме того, для генерации сигнала на некоторых датчиках используется питание по току или напряжению. На рисунке 3 показаны варианты различной конфигурации НУ при различных источниках измерительных сигналов.

Таблица 1 – Типы датчиков

Физическая величина	Тип преобразователя
Температура	Терморезисторы, термопары, термисторы
Свет	Фоторезисторы, фотодиоды, приборы с зарядовой связью
Сила и давление	Тензодатчики, пьезоэлектрические ИП, динамометрические элементы
Звук	Микрофоны
Положение (смещение)	Потенциометры, сельсины, оптические датчики положения
Расход жидкости	Манометры-расходомеры, вертушечные расходомеры, ультразвуковые расходомеры
Кислотность	pH электроды
Магнитное поле	Датчик Холла

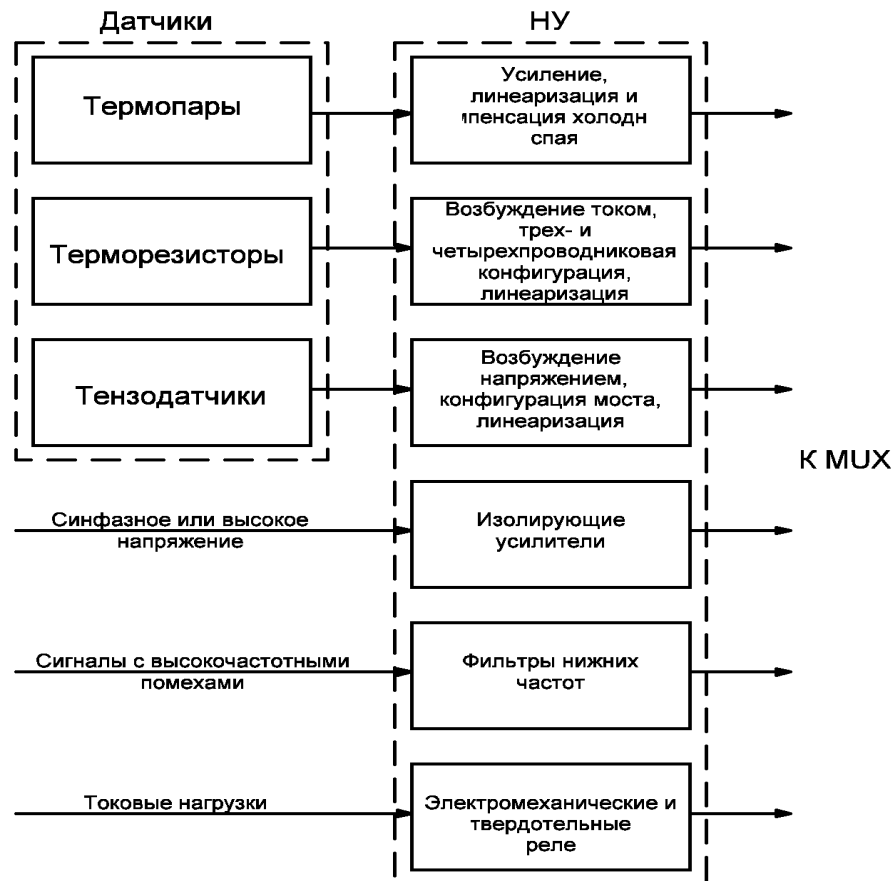


Рисунок 3 – Нормализация сигналов

Вместе с тем, в качестве носителя информации в системах автоматизированного сбора данных приняты к использованию электрические сигналы постоянного и переменного тока:

- уровни постоянного тока:  $0 \div 5$  мА;  $0 \div 20$  мА;  $4 \div 20$  мА;  $-0,5 \div 5$  мА;  $-20 \div 20$  мА;  $-100 \div 100$  мА;
- уровни постоянного напряжения:  $0 \div 10$  мВ;  $0 \div 20$  мВ;  $0 \div 50$  мВ;  $0 \div 100$  мВ;  $0 \div 1$  В;  $0 \div 5$  В;  $0 \div 10$  В;  $-100 \div 200$  мВ;  $-1 \div 1$  В;  $-5 \div 5$  В;  $1 \div 5$  В;  $-10 \div 10$  В;
- уровни напряжения переменного тока:  $0 \div 1$  В;  $0 \div 2$  В на частотах 50 или 400 Гц;
- частотные сигналы:  $2 \div 4$  кГц;  $4 \div 8$  кГц с амплитудами  $60 \div 160$  мВ;  $160 \div 600$  мВ;  $0,6 \div 2,4$  В;  $2,4 \div 12$  В.

Выходы НУ должны обеспечивать нагрузочную способность 250 Ом, 1 кОм, 2,5 кОм.

Данный факт делает возможность производства и использования унифицированных модульных блоков для создания компьютерных приборов.

Основными функциями НУ являются.

Усиление – наиболее распространенный тип согласования сигналов. Усиление используется для увеличения разрешения и уменьшения шума. Для достижения наибольшей точности максимальный диапазон напряжения в усиленном сигнале должен равняться максимальному входному диапазону АЦП. В частности, если система согласования сигналов состоит из нескольких НУ, как часто происходит на практике, то в ПК посылаются только усиленные сигналы, таким образом, уменьшается шум при измерениях.

Электрическая изоляция сигнала с датчика необходима по соображениям безопасности. В системе, в которой проводятся измерения, могут проходить высоковольтные переходные процессы, потенциально опасные для компьютера без модулей согласования. Дополнительная причина заключается в разности потенциалов «земли» и синфазных напряжений. Когда вход УСД и полезный сигнал измеряются относительно потенциала «земли», это может привести к эффекту паразитного контура с замыканием через землю, который может являться причиной некорректных измерений или даже выхода измерительной системы из строя, если разница потенциалов слишком велика. Использование НУ с модулями согласования с развязкой сигнала устраняет контуры заземления и обеспечивает корректное измерение сигнала.

Фильтрация необходима для удаления из полезного сигнала аддитивных помех и искажений. Шумовой фильтр используется для квазипостоянных сигналов, таких как температура, для устранения высокочастотных составляющих, которые уменьшают точность измерений.

Для переменных сигналов, таких как вибрации, следует применять антиалиазинговые фильтры (фильтр защиты от наложения спектров). Антиалиазинговые фильтры являются фильтрами низких частот, однако они



обладают очень резкими границами в спектральном представлении, что позволяет полностью убрать все частоты в сигнале, которые больше входной полосы частот прибора. Если эти составляющие не удалять, то они дадут ложный сигнал в полосе пропускания прибора.

Модули согласования НУ также обеспечивают питание для некоторых типов датчиков, таких как датчики деформаций, термисторы и терморезисторы. Например, при измерениях с помощью терморезисторов, как правило, необходим источник тока, который преобразует изменения сопротивления в измеряемое напряжение. Датчики деформации имеют очень малое сопротивление и обычно используются в конфигурации моста Уитстона и в сочетании с источником напряжения для питания.

Линеаризация – еще один способ согласования сигнала. Многие датчики, такие как термопары, имеют нелинейный отклик на изменения измеряемой физической величины.

Кроме этого, в ряде случаев в процессе измерения должно осуществляться так называемое анэнергетическое согласование, которое предотвращает передачу энергии или мощности между объектом измерения и измерительной системой. Или же наоборот – производится извлечение максимально допустимой мощности из измеряемого объекта, чтобы усиление мощности в измерительной системе было как можно меньшим.

Для передачи высокочастотных измерительных сигналов по соединительным линиям от объекта измерения к измерительной системе осуществляется согласование с характеристическим импедансом сигнальной линии или согласование по отсутствию отражения. Для очень длинных однородных кабелей можно ввести понятие о так называемом характеристическом импедансе. Характеристический импеданс кабеля равен входному сопротивлению кабеля бесконечной длины.

Обозначим импеданс измеряемого объекта  $Z_0$ , характеристический импеданс кабеля  $Z_k$ , и входной импеданс измерительной системы  $Z_u$ ; тогда согласование с характеристическим импедансом достигается при  $Z_0 = Z_k = Z_u$ .

Если сопротивления на концах линии передачи не равны ее характеристическому сопротивлению, то отражения от концов линии приведут к возникновению в ней стоячих волн; в этом случае по сигналу на выходе уже нельзя судить о сигнале на входе.

Следует четко понимать природу измеряемого сигнала, конфигурацию, в которой производятся измерения и воздействие, которое может оказывать окружающая среда. Основываясь на этой информации, необходимо определять, нужно ли использовать модули согласования сигнала НУ в данной системе сбора данных или нет.

#### 1.4.3 Методы подключения сигналов с датчиков

При создании системы сбора данных часто приходится иметь дело с различными типами источников сигналов, представляющих собой выходные электрические цепи используемых датчиков.

Такие цепи, прежде всего, различаются характером внутреннего сопротивления. По этому параметру выделяют источники напряжения, характеризующиеся внутренним сопротивлением, полярностью и максимальным выходным током, источники тока, обладающие свойствами полярности, запаса по напряжению и внутренним сопротивлением, а так же источники переменного заряда, имеющие ярко выраженный емкостной характер внутреннего импеданса.

Источники сигнала классифицируются по наличию заземления. Источник, гальванически связанный с землей, является заземлённым (рисунок 4,а,б). Если для однофазного источника оказывается заземлённой точка сигнальной цепи (рисунок 4,а), то для дифференциального – электрически симметричная относительно фазовых проводов общая точка, связанная общим проводом источника (рисунок 4,б). Как правило, заземлённым бывает источник заряда; источники напряжения и тока бывают заземлёнными или изолированными.

В противоположность заземленному источнику, изолированный (незаземлённый, отвязанный от земли, с плавающей землей) источник не связан

с землей гальванически (рисунок 4,в). Примерами могут являться термопара, изолированная обмотка трансформатора и др [5].

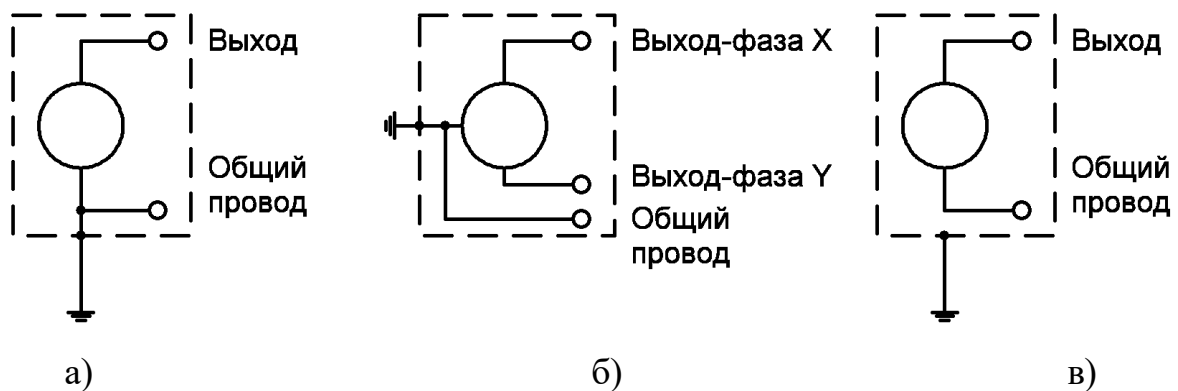


Рисунок 4 – Заземление источников сигналов

В распределенных системах сбора данных часто наблюдается ситуация, когда измеряемый объект подключен к земляной шине не в той же точке, что и измерительная система; это может произойти, например, когда используются две различные розетки силовой сети. Такой случай показан на рисунке 5.

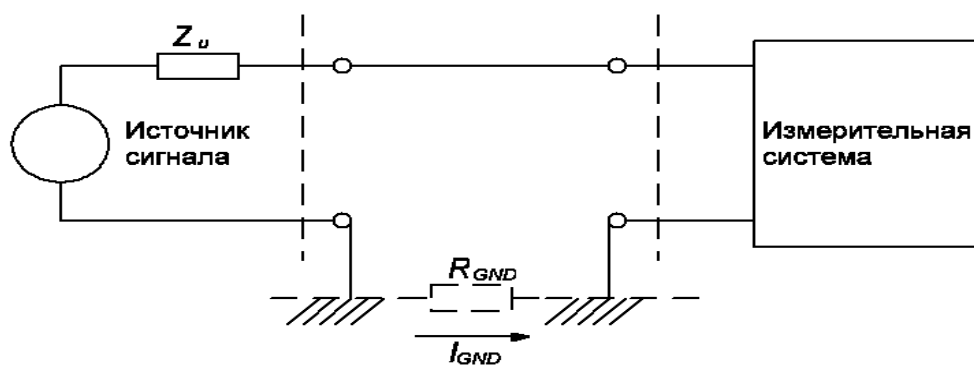


Рисунок 5 – Заземление в различных точках земляной шины

В аппаратуре, заземленной таким образом, могут возникать значительные наводки из-за паразитных токов  $I_{GND}$ , протекающих по земле. Сопротивлением  $R_{GND}$  по земляной шине между измеряемым объектом и измерительной системой пренебрегать нельзя – оно бывает порядка 0,1 Ом/м). Это ненулевое сопротивление и паразитные блуждающие токи, протекающие по земляной шине (вызываемые в ней другим оборудованием, подключенным к этой же шине),

создадут на  $R_{GND}$  напряжение. Поэтому, когда должны быть измерены малые сигналы, эти аддитивные возмущения будут относительно велики, и проведение чувствительных измерений может быть легко нарушено.

Для устранения влияния паразитных токов следует категорически придерживаться правила единственной точки заземления, как это представлено на рисунке 6.

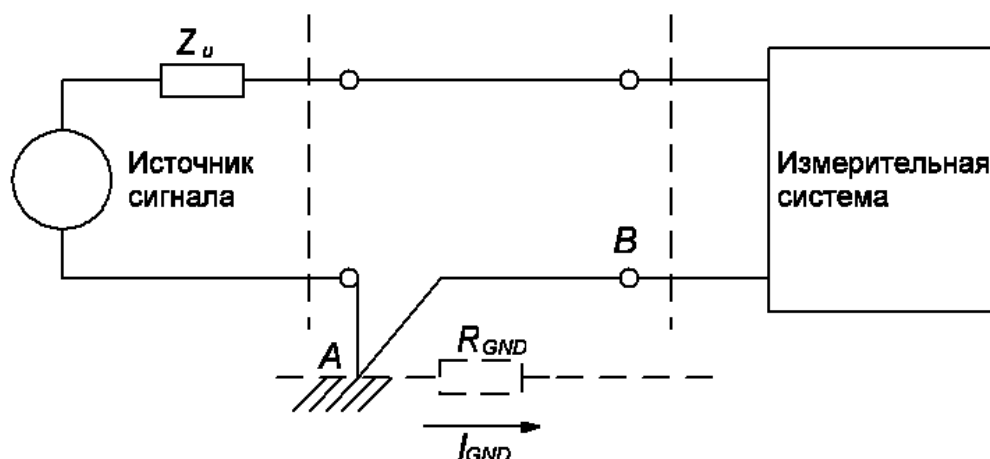


Рисунок 6 – Заземление в одной точке

Как видно из рисунка 6, напряжение на  $R_{GND}$  остается в стороне от входной цепи измерительной системы и потому не оказывает влияния.

Для большинства измерений этот метод заземления является предпочтительным и обеспечивает надлежащее устранение помех от паразитных токов. Однако малое напряжение помехи все же присутствует, так как система заземлена посредством проводника АВ. По этому проводнику течет ток земли измерительной системы.

Избежать влияния даже малых напряжений помех позволяет использование измерительной системы с симметричным входом относительно земли. При такой реализации входной цепи вход также называется дифференциальным или плавающим.

Дифференциальный вход, показанный на рисунке 7, позволяет принять пару входных сигналов  $X$  и  $Y$  симметрично относительно общего провода и

выделить полезный разностный сигнал  $U_d = (U_Y - U_X)$  на фоне общего аддитивного помехового сигнала  $\delta$ , выполнив над входными аналоговыми сигналами операцию вычитания:

$$U_d = (U_Y + \delta) - (U_X + \delta) = (U_Y - U_X). \quad (4)$$

Обычно  $X$  — это неинвертирующий, а  $Y$  — инвертирующий вход.

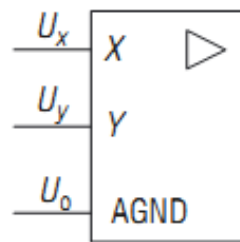


Рисунок 7 – Дифференциальный вход

Аддитивный сигнал помехи  $\delta$  называется синфазным, полезный разностный сигнал  $U_d$  противофазным (дифференциальным) .

Коэффициент ослабления синфазного сигнала  $k_{осс} = \delta/U_d$  определяет качество дифференциального входа. Дифференциальный вход, в отличие от однофазного, позволяет подключить источник сигнала таким образом, чтобы ток сигнальной цепи не протекал через общий провод.

Важно помнить, что дифференциальный вход — это всегда трёхточечное подключение. Очень часто дифференциальный вход является входом напряжения, реже встречаются дифференциальные (разностные) токовые входы и дифференциальные входы заряда.

На рисунке 8 представлена структурная схема заземления дифференциальной измерительной системы, позволяющей регистрировать очень малые входные сигналы.

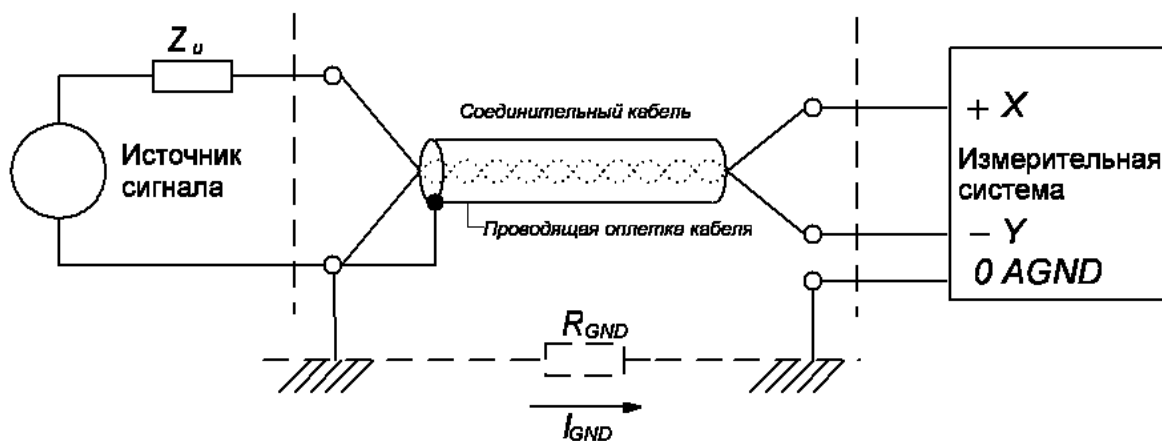


Рисунок 8 – Дифференциальная измерительная система с экранированием

Заземление системы, согласно рисунку 8, осуществляется через отдельный входной зажим (клемма 0 или «AGND» – аналоговая земля). Такое заземление корпуса или кожуха необходимо по соображениям безопасности. Ток земли измерительной системы потечет через эту отдельную клемму и поэтому останется в стороне от входной цепи.

Напряжение, возникающее на сопротивлении земляной шины  $R_{GND}$ , накладывается на потенциалы обоих входных зажимов  $X$  и  $Y$  (относительно клеммы 0). Подобная дифференциальная измерительная система бывает специально сконструирована таким способом, чтобы быть максимально нечувствительной к любому напряжению, которое одновременно присутствует на двух входных зажимах.

Для организации системы в соответствии с рисунком 8 использовался дифференциальный источник напряжения с ложной второй фазой (рисунок 9) – это однофазный источник с внутренним сопротивлением  $R_u$ , который был дополнен эквивалентом второй фазы с нулевым выходным напряжением. При этом выходное сопротивление ложной фазы  $R_u + R_f$  стремятся сделать равным выходному сопротивлению истинной фазы для того, чтобы достичь приблизительной симметрии выходного импеданса фаз по отношению к общей аддитивной (синфазной) помехе.

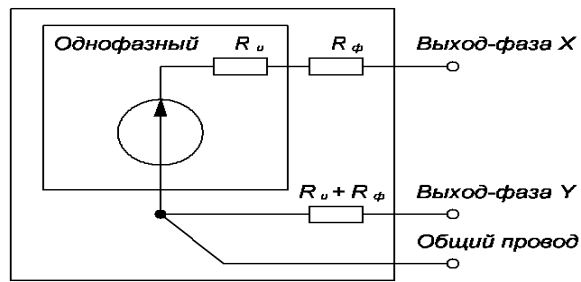


Рисунок 9 – Дифференциальный источник напряжения с ложной второй фазой

Кроме того, на рисунке 8 показано как избежать емкостных наводок путем экранирования кабеля проводящей оплеткой, заземленной на стороне измеряемого объекта (при измерении напряжения). Кроме того, показано, что благодаря применению кабеля с двумя внутренними скрученными проводниками можно избежать индуктивной наводки.

Часто при сборе данных с датчиков используется простой однофазный вход (рисунок 10), использующий двухточечное подключение. Это может быть вход напряжения, токовый или вход заряда.

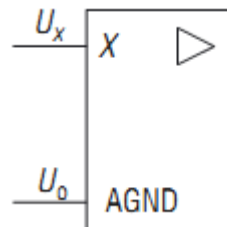


Рисунок 10 – Однофазный вход

Дифференциальный вход с динамическим коммутатором каналов (рисунок 11) схемотехнически реализуется путем аналогового мультиплексирования входных цепей для реализации многоканальных режимов. Это решение традиционно применяется в многоканальных АЦП с мультиплексированием каналов.

Этот вход является полноценным дифференциальным, поскольку симметрия входов практически не нарушена. Тем не менее, в динамическом

режиме работы аналогового мультимплексора (режим динамического опроса каналов АЦП) этот вход является несколько ухудшенным дифференциальным входом.

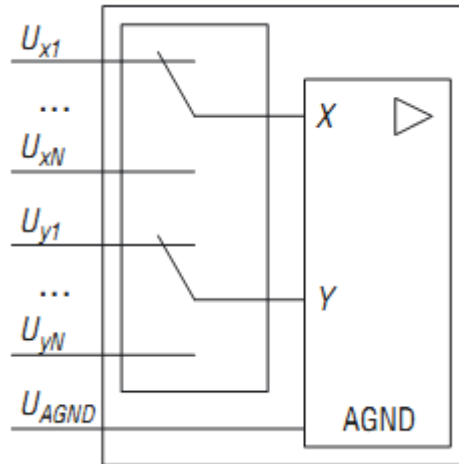


Рисунок 11 – Дифференциальный вход с динамическим коммутатором каналов

Это объясняется тем, что при динамической коммутации каналов на сигнальную цепь канала относительно общего провода AGND динамически разряжается эквивалентная паразитная ёмкость  $C_n$  порядка 100 пФ.

Так как поданные на входы каналов напряжения в общем случае разные, то и начальные условия перезаряда паразитных ёмкостей в отдельно взятый момент коммутации с одного канала на другой тоже разные.

Тогда, если внутреннее сопротивление источника сигнала принять  $R_u$ , то в течение времени  $t \approx 2,3R_uC_n$  перезаряда коммутационной ёмкости после момента коммутации на инвертирующий и неинвертирующий входы воздействует в общем случае неодинаковая помеха, искажающая информационный сигнал дифференциального входа.

Эффект перезаряда коммутационной ёмкости накладывает определённые ограничения на выбор типа и способа подключения источника сигнала к дифференциальному входу с динамической коммутацией каналов, а также



ограничения на выбор самого режима коммутации, которым в большинстве случаев можно управлять.

Псевдодифференциальный вход, показанный на рисунке 12, схемотехнически получается из дифференциального путем подключения динамического коммутатора (аналогового мультиплексора) к одной из фаз дифференциального входа.

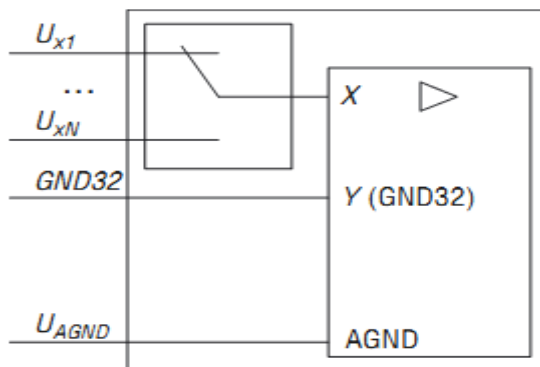


Рисунок 12 – Псевдодифференциальный вход

Полученная коммутация позволяет динамически собирать данные со входов  $N$  каналов. Такое решение традиционно применяется, например, в 16 канальных АЦП с мультиплексированием каналов, где существует так называемый 32 канальный псевдодифференциальный режим, когда динамически коммутируется только одна из фаз внутреннего дифференциального входа, а вторая фаза  $GND32$  не коммутируется и является своеобразным общим проводом для сигнальной цепи 32 каналов.

При использовании псевдодифференциального входа следует учитывать эффект перезаряда коммутационной емкости.

В случае получения данных от источника сигнала с «плавающей землей» можно применять как дифференциальные измерительные системы, так и системы с общим проводом. Однако, в случае дифференциальной измерительной системы необходимо чтобы уровень синфазного напряжения сигнала относительно заземления измерительной системы остается в рамках допустимого синфазного напряжения для данного измерительного устройства.

Как известно, диапазон синфазного напряжения ограничивает разрешенное для каждого из входов максимальное напряжение относительно заземления измерительной системы. Пренебрежение этим ограничением приводит не только к ошибке измерения, но может привести к повреждению компонентов устройства. Следующее уравнение является определением синфазного напряжения

$$U_s = (U_Y + U_X)/2. \quad (5)$$

Различные явления, такие например, как входной ток смещения инструментального усилителя, могут сдвигать уровень источника сигнала с «плавающей землей» за пределы рабочего диапазона напряжений входного каскада устройства сбора данных. Для привязки этого уровня к некоторому опорному потенциалу, используется схема, представленная на рисунке 13.

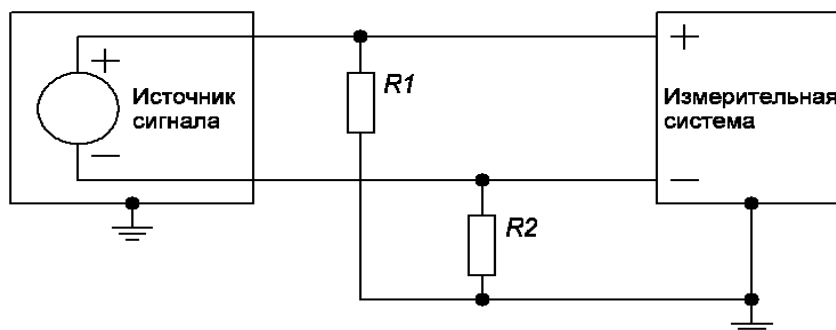


Рисунок 13 – Использование согласующих резисторов

Резисторы смещения  $R1$  и  $R2$  создают цепь постоянного тока от входов инструментального усилителя к его заземлению. Для работы инструментального усилителя требуется, чтобы оба его входа имели развязки по постоянному току на землю. Если источник имеет соединение по переменному току (емкостная связь), то инструментальному усилителю необходим резистор между положительным входом и аналоговой землей. Если импеданс источника небольшой, то можно выбрать сопротивление достаточно большое, чтобы

незначительно нагружать источник, но и достаточно малое, чтобы не создавать существенного смещения напряжения на входе и, как следствие, входного тока смещения (обычно выбирают 100 кОм – 1 МОм). В этом случае вы можете присоединить отрицательный вход прямо к AGND. При значительном импедансе источника следует сбалансировать путь прохождения сигнала, используя одинаковые резисторы на положительном и отрицательном входах, как показано на рисунке 13. При этом из-за нагрузки источника, немного возрастет ошибка.

Для источников сигнала, связанных по постоянному току с усилителем, необходим только резистор  $R2$ . Для источников сигналов, связанных по переменному току,  $R1 = R2$ .

#### 1.4.4 Схемы формирования сигналов измерительных преобразователей

Как известно [6], в генераторных ИП преобразование входной измеряемой величины в значение выходного сигнала реализуется в виде уровня электрического напряжения, тока или заряда. В большинстве случаев на выходе ПИП формируются сигналы относительно низкого уровня, поэтому последующее преобразование должно обеспечивать усиление.

При использовании ПИП с выходным сигналом в виде электрического напряжения применяются инструментальные усилители (ИУ). ИУ предназначены для задач, требующих прецизионного усиления с высокой точностью передачи сигнала, а также для работы с датчиками сигналов благодаря высокому входному сопротивлению, низкому значению напряжения смещения, точности передачи сигнала и высокой степени подавления синфазных сигналов.

ИУ относятся к классу операционных усилителей с одним принципиальным отличием, связанным с работой исключительно с замкнутыми линейными цепями обратных связей. Поэтому в ИУ отсутствует в качестве контролируемого параметра коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью. Вместо этого вводятся параметры точности и нелинейности передачи

сигналов при выбранных фиксированных значениях коэффициентов усиления по напряжению ( $K_u$ ), обычно 1, 10, 100, 1000. Данные параметры оцениваются в относительных единицах ppm ( $10^{-6}$ ) или в процентах. Например, точность передачи сигнала в 100 ppm соответствует в процентах величине = 0,01%.

Существуют модели с фиксированными и перестраиваемыми коэффициентами усиления. Причем различают ИУ, перестраиваемые коммутацией внутренних компонентов и усилители с внешней регулировкой. Наиболее удобными для применения в системах сбора данных являются ИУ с программируемым  $K_u$ .

Рассмотрим основные принципы включения ИУ при сборе электрических сигналов.

Датчики с потенциальным выходом (источники напряжения).

Функциональная схема включения представлена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Датчики с потенциальным выходом

При данном типе датчиков используется схема неинвертирующего включения операционного усилителя, представленного на рисунке 15.

Напряжение на выходе схемы, представленной на рисунке 15,а, рассчитывается по формуле

$$U_{вых} = U_x(1 + R2/R1), \quad (6)$$

Схема, представленная на рисунке 15,б позволяет избежать влияния постоянной составляющей сигнала.

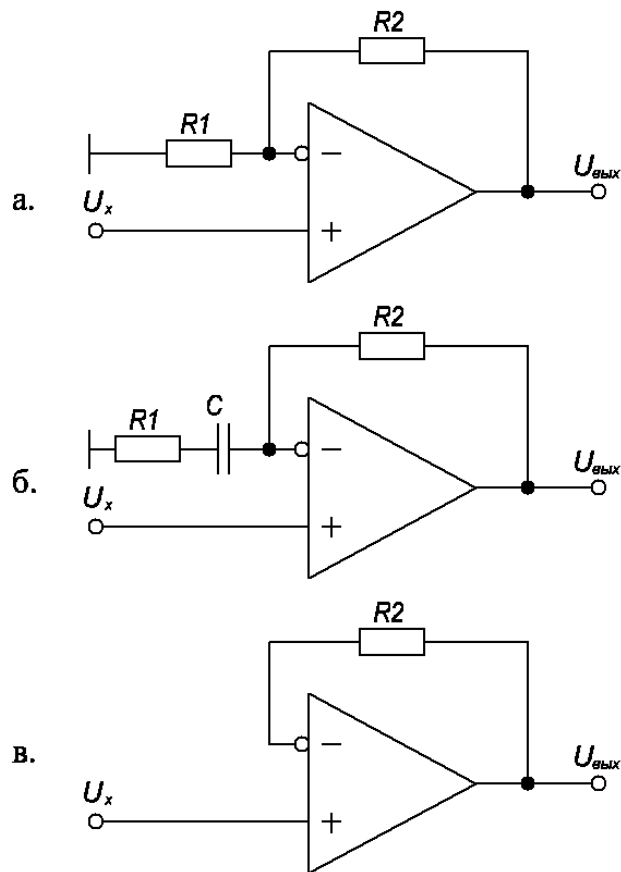


Рисунок 15 – Включение датчиков с потенциальным выходом

По постоянной составляющей коэффициент усиления схемы по напряжению равен единице, чем обеспечиваются устойчивость усилителя и малый дрейф. Для комплексной амплитуды выходного напряжения имеем:

$$U_{вых}(j\omega) = U_x \left( 1 + \frac{R2}{R1 + 1/j\omega C} \right). \quad (7)$$

В полосе пропускания должно выполняться условие  $R1 \gg 1/j\omega C$ , тогда выражение (7) совпадает с (6).

Для согласования высокоомного датчика с низкоомной нагрузкой применяют ИУ, включенный в режиме повторителя напряжения (рисунок 15,в).

#### 1.4.5 Датчики с токовым выходом

При использовании ПИП или датчиков с выходным сигналом в виде электрического тока наиболее приемлемым является применение преобразователей ток-напряжение. Функциональная схема включения представлена на рисунке 16.

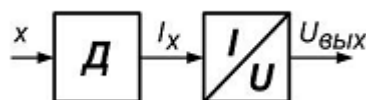


Рисунок 16 – Датчики с токовым выходом

Для реализации функциональной схемы на рисунке 16 применяют обычно инвертирующее включение ОУ в режиме преобразователя ток-напряжение, как показано на рисунке 17.

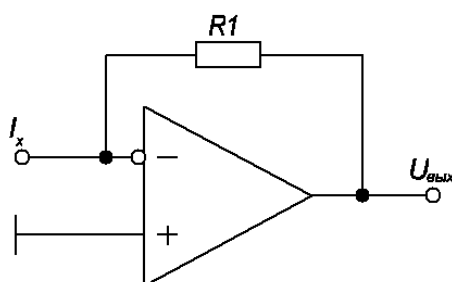


Рисунок 17 – Включение датчиков с токовым выходом

Выходное напряжение схемы на рисунке 17:

$$U_{вых} = -I_x R1, \quad (8)$$

Следует отметить некоторые особенности и преимущества применения токовых сигналов. Такие сигналы примерно на порядок более помехоустойчивы, чем сигналы в виде напряжения. Это позволяет передавать информацию от датчиков с токовыми выходами на расстояния в сотни метров. Многие

промышленные датчики имеют стандартный токовый выход 4...20 мА; 0...20 мА; 0...5 мА или  $\pm 5$  мА.

Наиболее востребованными свойствами обладает диапазон 4...20 мА, который широко используется в так называемых аналоговых интерфейсах «токовая петля». В диапазоне 4...20 мА нет нулевой точки, что обеспечивает более широкий частотный диапазон передаваемых сигналов, также начальный диапазон ниже 4 мА может быть использован для питания внутренних компонентов датчиков.

#### 1.4.6 Датчики электрического заряда

При использовании преобразователей с выходным сигналом в виде уровня электрического заряда применяются усилители заряда (преобразователи заряд-напряжение). Функциональная схема представлена на рисунке 18.

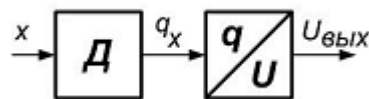


Рисунок 18 – Датчики электрического заряда

Схема для преобразования величины заряда  $q$  в пропорциональное напряжение (усилитель заряда) приведена на рисунке 19.

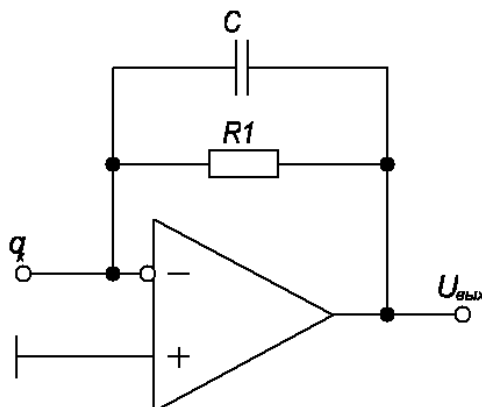


Рисунок 19 – Включение датчиков с зарядовым выходом

Выходное напряжение схемы без учета влияния сопротивления резистора  $R$  ( $R \rightarrow \infty$ ):

$$U_{\text{вых}} = -q_x / C. \quad (9)$$

Сопротивление  $R$  обеспечивает режим работы ОУ по постоянному току. Поэтому такой усилитель имеет характеристику фильтра верхних частот:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{q_x}{C} \cdot \frac{j\omega C}{1 + j\omega C}. \quad (10)$$

Как видно из приведенных соотношений, величина емкости конденсатора  $C$  определяет значение коэффициента преобразования, а величина  $R$  (при заданном коэффициенте преобразования) – частоту среза этого фильтра.

Выходное напряжение усилителя заряда практически не зависит от паразитной емкости соединительного кабеля. Это позволяет располагать такие датчики (например, датчики виброускорений) на удалении в десятки метров от усилителей.

#### 1.4.7 Резистивные датчики

Функциональная схема включения резистивного датчика представлена на рисунке 20.

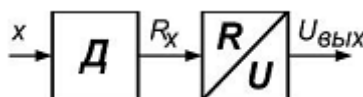


Рисунок 20 – Включение резистивного датчика

Электрическая принципиальная схема включения показана на рисунке 21.



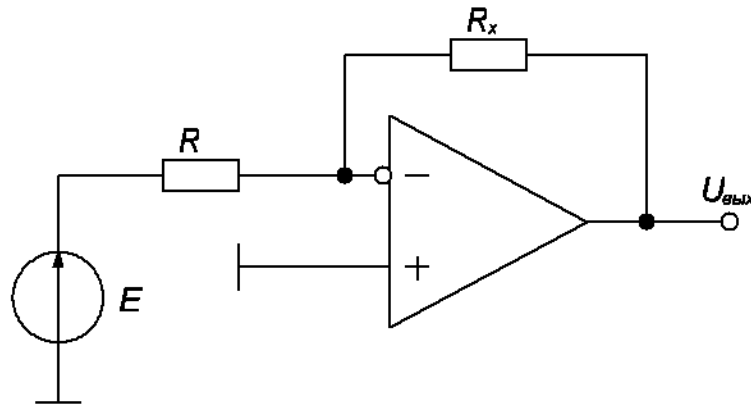


Рисунок 21 – Принципиальная схема подключение резистивном датчиков

Для схемы на рисунке 21 выходное напряжение пропорционально сопротивлению  $R_x$  датчика:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{ER_x}{R}. \quad (11)$$

В ряде случаев требуется получить обратно пропорциональную зависимость от  $R_x$ , например, для линеаризации статической характеристики датчика с гиперболической зависимостью. С этой целью в схеме на рисунке 21 нужно поменять местами сопротивления  $R_x$  и  $R$ :

$$U_{\text{вых}} = -\frac{ER}{R_x}. \quad (12)$$

Как следует из рассмотренного материала, на современном этапе развития технологии проведения измерений накоплен большой объем теоретических знаний, разработаны эффективные методики организации сбора данных, унифицированы и стандартизированы средства измерений. Однако разработка для решения отдельно взятой задачи узкоспециализированной системы становится нерациональным в условиях стремительно развивающихся и

изменяющихся требований к оборудованию. В соответствии с этим, современные автоматизированные измерительные системы эффективно реализовывать, закладывая на этапе проектирования значительную программно-аппаратную гибкость, а так же точность, надежность и функциональность. Решение подобной нетривиальной задачи лежит в использовании модульных НУ или даже в ряде случаев модулей в виде УСД, позволяющих производить быструю реконфигурацию измерительной системы. Такой подход так же дает возможность проводить конфигурирование ИС в рамках решаемой задачи даже пользователям, не обладающим исчерпывающими теоретическими и практическими знаниями в области схемотехнических решения ИК систем сбора данных.

## **1.5 Сбор данных**

### **1.5.1 Аналого-цифровое преобразование**

Как известно [7], на практике не исключена возможность непосредственного преобразования различных физических величин в цифровую форму, однако такая задача является весьма сложной и решается лишь в редких случаях. По этой причине на данный момент наиболее рациональным признается способ преобразования различных по физической природе величин сначала в аналоговые электрические сигналы в виде тока или напряжения с амплитудой, пропорциональной измеряемой величине, а затем производится их перевод в цифровую форму с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

АЦП – это устройства, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые коды, пригодные для обработки цифровыми устройствами.

АЦП является основным элементом УСД. Так как чаще всего выходной величиной датчика является напряжение, то перед подачей на вход АЦП его

необходимо предварительно преобразовывать в напряжение определенного диапазона значений. Эта процедура осуществляется в НУ.

При преобразовании напряжения в цифровой код выполняются три независимые операции: дискретизация, квантование и кодирование.

Теоретически процесс дискретизации можно представить как умножение исходного сигнала  $s(t)$  на некоторую решетчатую функцию  $x(nT)$  с единичной амплитудой. Здесь  $n = 0, 1, 2, \dots$ , а  $T$  – интервал дискретизации. В качестве такой функции чаще всего используют дискретную дельта-функцию  $\delta((n-m)T)$ .

Тогда операция дискретизации будет эквивалентна амплитудной модуляции дельта-функции  $\delta((n-m)T)$  функцией  $s(t)$

$$s(nT) = s(t) \cdot \delta((n-m)T) = \sum_{m=0}^{\infty} S(mT) \cdot \delta((n-m)T). \quad (13)$$

Связь между спектрами  $S(e^{j\omega T})$  и  $S(j\omega)$  дискретного сигнала  $s(nT)$  и аналогового  $s(t)$  определяется формулой:

$$S(e^{j\omega T}) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} S(j\omega + j\omega_d m). \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что после дискретизации спектр сигнала  $s(t)$  будет дублироваться по оси частот в обе стороны от оси ординат, группируясь вокруг частот, кратных  $\omega_d$  (круговая частота дискретизации). Спектр такого сигнала представлен на рисунке 22.

Для восстановления аналогового сигнала  $s(t)$  достаточно пропустить дискретный сигнал  $s(nT)$  через фильтр нижних частот, с полосой пропускания, соответствующей полосе исходного сигнала. Однако данная процедура будет осуществима лишь при отсутствии перекрытия основного спектра и соседнего с ним сдвинутого. Если в процессе дискретизации произойдет перекрытие

спектров, то появится много новых комбинационных частот, которые попадут в полосу исходного сигнала.

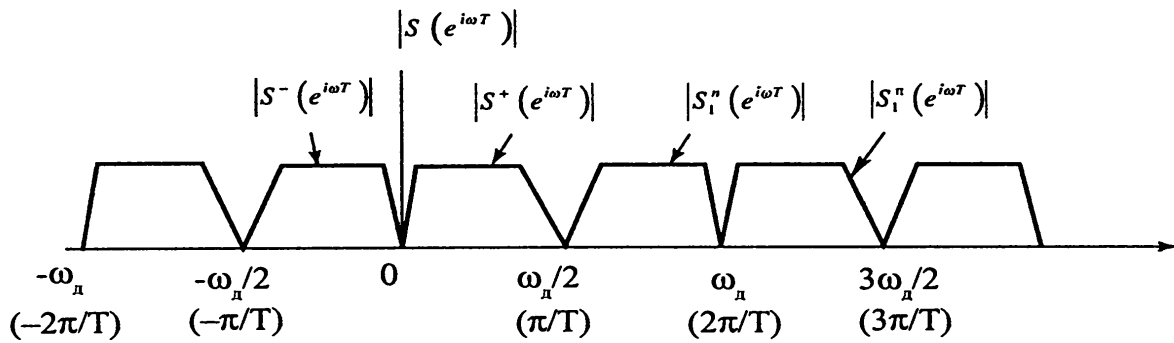


Рисунок 22 – Копирование спектра сигнала  $s(t)$  после дискретизации

Условие восстановления исходного сигнала  $s(t)$  по дискретным отсчетам сформулировано в теореме Котельникова. Так же условие может быть сформулировано следующим образом: чтобы восстановление было точным частота дискретизации  $F_d$  должна минимум в два раза превышать максимальную частоту  $f_{max}$  (частота Найквиста  $f_n$ ) в спектре исходного аналогового сигнала.

В соответствии с теоремой Котельникова, дискретизацию сигнала  $s(t)$ , наивысшей частотой в спектре которого является  $\omega_{max} = 2\pi f_{max}$ , можно представить как разложение в ряд

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT) \varphi_n(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{n}{2f_{max}}\right) \frac{\sin \omega_{max}(t - n/2f_{max})}{\omega_{max}(t - n/2f_{max})} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{n}{2f_{max}}\right) \text{sinc } \omega_{max}(t - n/2f_{max}), \quad (15)$$

$$\text{где } \varphi_n(t) = \text{sinc } \omega_{max}(t - n/2f_{max}) = \begin{cases} t = nT, & \varphi_n(nT) = 1; \\ t = kT, k \neq n & \varphi_n(nT) = 0. \end{cases}$$

Выражение (15) полностью определяет заданный сигнал  $s(t)$  в точках отсчета, так как коэффициенты ряда являются значения выборок из функции  $s(nT)$ .

После процедуры дискретизации производится квантование и кодирование сигнала, что, собственно, и является основной операцией при аналого-цифровом преобразовании. На этом этапе по заданному дискретному сигналу строится цифровой кодированный сигнал  $s_u(nT)$ . Цифровой сигнал описывается решетчатой функцией, но в данном случае эта решетчатая функция является еще и квантованной, т.е. способной принимать лишь ряд дискретных значений, которые называются уровнями квантования.

Уровни квантования образуются путем разбиения всего диапазона, в котором изменяется аналоговый сигнал, на ряд участков, каждому из которых присваивается определённый номер. Эти номера кодируются заранее выбранным кодом. Поскольку цифровые системы оперируют с двоичными числами, т. е. числами, выражающимися в виде поразрядных комбинаций всего двух цифр – «нулей» («0») и «единиц» («1»), то номера уровней квантования также кодируются двоичным кодом, а их число  $N$  выбирается равным  $2^m$ .

При однополярном сигнале все  $2^m$  уровней будут выражать положительные значения аналогового сигнала, при двуполярном – половина ( $2^{m-1}$ ) уровней будет выражать отрицательные значения сигнала, другая (также  $2^{m-1}$ ) – положительные.

### 1.5.2 Апертурное время

При работе с изменяющимися во времени сигналами возникают специфические погрешности; динамические по своей природе, для оценки которых вводят понятие апертурной неопределенности, характеризующейся обычно апертурным временем.

Апертурным временем  $t_A$  называют время, в течение которого сохраняется неопределенность между значением выборки и временем, к которому она относится. Эффект апертурной неопределенности проявляется либо как погрешность мгновенного значения сигнала при заданных моментах измерения, либо как погрешность момента времени, в который производится измерение при заданном мгновенном значении сигнала

Другими словами наличие апертурной неопределённости приводит к «дрожанию» истинных моментов времени, в которые берутся отсчеты сигнала, по отношению к равноотстоящим на оси времени моментам. В результате вместо равномерной дискретизации со строго постоянным периодом осуществляется дискретизация с флюктуирующим периодом повторения, из-за чего происходит нарушение условий теоремы Котельникова, что в свою очередь приводит к появлению апертурных погрешностей в системах цифровой обработки сигналов [8].

Если для N-разрядного АЦП с разрешением  $2^{-N}$  апертурная погрешность не превышает шага квантования, имеет место соотношение

$$2^{-N} = \omega t_A. \quad (16)$$

Таким образом, при осуществлении процесса дискретизации для исключения использования дорогостоящих быстродействующих АЦП, эффективно применение устройств выборки-хранения, имеющих малое апертурное время.

### 1.5.3 Шум квантования

Из-за дискретности представления аналоговых величин близкие по величине, но различные значения аналогового сигнала представляются одинаковым цифровым кодом, что приводит к потере части информации. Такая потеря представляет собой шум квантования. Процедура образования ошибки представлена на рисунке 23.

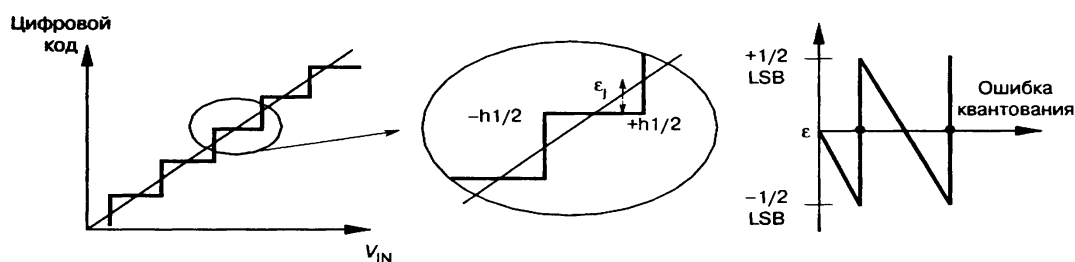


Рисунок 23 – Образование ошибки (шума) квантования

Принимая входной сигнал как случайную величину, и идеализируя характеристики АЦП, можно определить, что разность между непрерывно изменяющимся входным сигналом и его цифровым представлением имеет равномерное распределение. Она может принимать значения в диапазоне  $\pm 1/2$  LSB или  $\pm h/2$ , где  $h$  — ширина одного кванта.

Тогда нетрудно определить, что дисперсия шума квантования составит

$$D_N = h^2/12. \quad (17)$$

Тогда соотношение сигнал-шум можно определить по следующему выражению [8]:

$$\text{SNR} = 6.02N + 1.76 \text{ дБ}. \quad (18)$$

Выражение (18) показывает, что увеличение разрядности АЦП на единицу увеличивает соотношение сигнал/шум примерно на 6 дБ. Практически же погрешности линейности характеристики преобразования и шумы элементов схемы понижают эту величину.

#### 1.5.4 Статические параметры

Разрешающая способность — величина, обратная максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Разрешающая способность выражается в процентах, разрядах или децибелах и характеризует потенциальные возможности АЦП с точки зрения достижимой точности преобразования непрерывной величины в цифровой код.

Погрешность полной шкалы — относительная разность между реальным и идеальным значениями предела шкалы преобразования при отсутствии смещения нуля.

Нелинейность — максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от оптимальной. Оптимальная характеристика представляет

собой прямую линию и находится эмпирически так, чтобы минимизировать значение погрешности линейности.

Дифференциальной нелинейностью АЦП в точке  $k$  характеристики преобразования называется разность между значением кванта преобразования  $hk$  и средним значением кванта преобразования  $h$ . В спецификациях на конкретные АЦП значения дифференциальной нелинейности выражаются в долях LSB или процентах от полной шкалы.

Погрешность дифференциальной линейности определяет два важных свойства АЦП: непропадание кодов и монотонность характеристики преобразования.

#### 1.5.5 Динамические параметры

Возникновение динамических погрешностей связано с дискретизацией сигналов, изменяющихся во времени. Можно выделить следующие параметры АЦП, определяющие его динамическую точность.

Максимальная частота дискретизации (преобразования) — это наибольшая частота, с которой происходит образование выборочных значений сигнала, при которой выбранный параметр АЦП не выходит за заданные пределы. Измеряется числом выборок в секунду.

Время преобразования — это время, отсчитываемое от начала импульса дискретизации или начала преобразования до появления на выходе устойчивого кода, соответствующего данной выборке. При работе АЦП без УВХ время преобразования является апертурным временем.

Время выборки (стробирования) — время, в течение которого происходит образование одного выборочного значения. При работе без УВХ равно времени преобразования АЦП.

Представленный выше перечень параметров АЦП является основным, хотя далеко не полным. В таких условиях выбор конкретного типа АЦП по заданным характеристикам измерительной системы является весьма трудоемкой задачей. Так же изменение условий функционирования и эксплуатации измерительной



системы может привести к необходимости изменения параметров АЦП, т.е. к смене его типа. По этим причинам на данный момент широкое распространение получила реализация систем сбора данных на основе многофункциональных модулей, включающих в свой состав АЦП, в виде УСД (рисунок 2) или в виде многофункциональных плат сбора данных.

#### 1.5.6 АЦП в составе модулей или плат сбора данных

Как отмечалось ранее для эффективного функционирования автоматизированной измерительной системы необходимо использование для процедуры аналого-цифрового преобразования ряда дополнительных функциональных блоков, способных повысить и стабилизировать параметры самого АЦП. На рисунке 24 представлена подробная структурная схема, поясняющая принцип реализации аппаратной части процесса аналого-цифрового преобразования [8].

Развитие технологии изготовления АЦП, появление многоканальных АЦП, АЦП со встроенным устройством выборки—хранения, АЦП со сложной цифровой частью привело к тому, что сейчас имеются законченные однокристалльные системы аналого-цифрового преобразования, обеспечивающие преобразование в цифровой код сигналов, поступающих от многих датчиков и передачу их на вычислительную платформу.

Как следует из рисунка 24, основу системы составляет АЦП, обычно АЦП последовательного приближения.

Ради уменьшения числа корпусов ИМС, необходимых для создания системы сбора данных, в схему на рисунке 24 встроены УВХ и источник опорного напряжения (ИОН). Для подключения к нескольким источникам входных аналоговых сигналов используется аналоговый мультиплексор. Чтобы сократить частоту прерываний главного процессора некоторые системы снабжаются оперативным запоминающим устройством типа FIFO. Измерительный усилитель с программируемым коэффициентом усиления (УПК), входящий в систему, меняет свой коэффициент усиления по команде от

схемы управления. Это позволяет выровнять диапазоны аналоговых сигналов с различных входов.

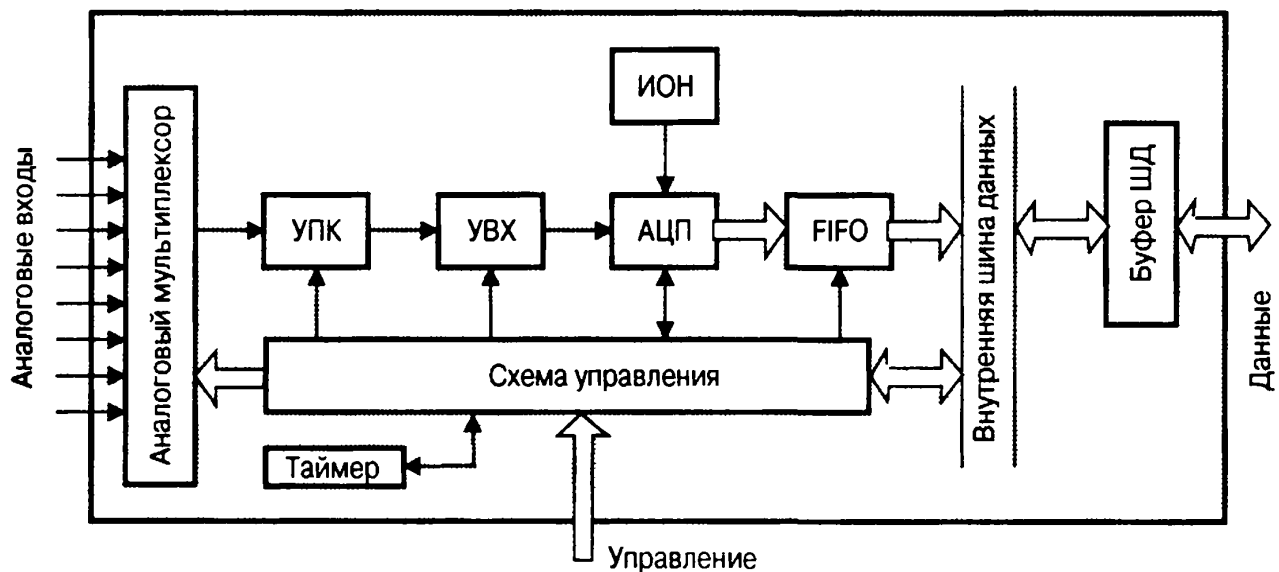


Рисунок 24 – Аппаратная реализация процесса аналого-цифрового преобразования

Так же схема управления может включать оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в которое загружается от главного процессора блок рабочих команд. Эти команды содержат сведения о том, какие операционные режимы использовать, какие из входных каналов должны быть однопроводными (несимметричными), а какие объединяться с образованием дифференциальных пар, насколько часто и в каком порядке следует производить выборку для каждого канала. Встроенный в систему цифровой таймер определяет темп преобразования АЦП.

## 1.6 Многофункциональные платы и модули сбора данных

### 1.6.1 Общая структура плат сбора данных

Как и многое аппаратное обеспечение платы сбора данных могут быть внутренними и внешними.

Внутренние устройства представляют собой плату без корпуса и вставляются в свободный слот материнской платы, то есть вовнутрь системного блока ПК, и тем самым подключаются системной шине компьютера (ISA, PCI и др.). Такие устройства принято называть платами сбора данных (ПСД).

Внешние устройства имеют корпус, находятся вне вычислительной платформы, подключаются к стандартному компьютерному интерфейсу (RS-232, USB, PCI и др.). Именно такие устройства являются модулями сбора данных, а само название подчеркивает их конструктивное законченное исполнение.

На рисунке 25 представлена упрощенная структурная схема платы или модуля сбора данных на базе интерфейса PCI.

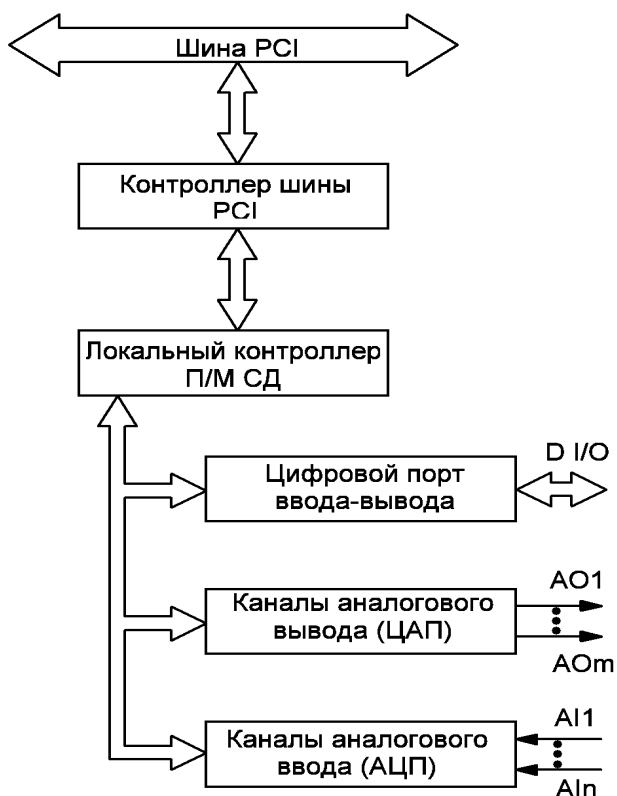


Рисунок 25 – Структурная схема платы/модуля сбора данных

Как следует из рисунка 25, ПСД содержит большое количество аналоговых входов ( $n = 16 - 32$ ), что обеспечивается использованием аналогового мультиплексора (рисунок 24).

В состав ПСД обычно входят несколько каналов аналогового вывода, с помощью которых при необходимости можно формировать два различных измерительных сигнала на выходах АО1 и АОm.

Для непрерывной генерации измерительных сигналов каналы аналогового вывода также могут оснащаться памятью с циклической организацией, в которую записываются значения отсчетов выходных сигналов. Благодаря имеющейся аппаратной поддержке программе пользователя не нужно осуществлять управление генерацией сигналов, и программа может одновременно выполнять другие действия.

С помощью цифрового порта ввода-вывода осуществляется обмен данными с внешним устройством или устройствами. Число цифровых входов-выходов DI/O в шине в различных платах составляет от 16 до 64.

Локальный контроллер осуществляет управление и синхронизацию аппаратных средств ПСД. В составе локального контроллера обязательно имеется кварцевый генератор и таймер-счетчик, позволяющие вырабатывать сигналы для задания определенной частоты дискретизации при аналоговом вводе-выводе.

### 1.6.2 Платы и модули сбора данных

Многофункциональная ПСД, персональный компьютер и программное обеспечение представляют собой набор средств, необходимых и достаточных для создания типичного виртуального прибора. ПСД выпускаются множеством отечественных и зарубежных производителей.

На сегодняшний день в области производства компьютерных приборов и систем сформировалась группа фирм-разработчиков, занимающих ведущие позиции по данному направлению. В их число входит компания National Instruments (NI), выпускаемая продукция которой отличается широкой

номенклатурой устройств сбора данных на базе технологий PCI, PCI Express, USB и т.д.

Компания NI выпускает несколько серий ПСД, наиболее распространенными и представительными из которых являются серия Е и серия М. Серия Е - более старая серия по сравнению с М-серией.

В качестве примера ПСД рассмотрим характеристики многофункциональной платы NI PCI-6024Е. Основные характеристики платы ввода/вывода приведены в таблице 2.

При невысокой стоимости устройства данной серии обеспечивают высокую функциональность и идеально подходят для приложений непрерывного сбора и анализа данных. Наличие входного диапазона  $\pm 0,05$  В обеспечивается усилением входного сигнала в 200 раз.

Для устойчивой работы программно-аппаратного обеспечения достаточно использование персонального компьютера классом не ниже Pentium IV.

Плата устанавливается в персональный компьютер на системную шину PCI. Соединение с системной шиной осуществляется с помощью стандартного разъема. Так же на плате предусмотрен разъем для присоединения многофункционального терминального блока к сигнальным линиям платы ввода-вывода с помощью кабеля типа \$H68-68-E.

Для корректной работы платы в состав поставки входит программное обеспечение: драйверы, утилита для конфигурации и примеры программирования.

ПСД серии М разработаны с использованием современных архитектурных решений и передовых технологий. Изделия серии М обладают существенно более высокими производительностью, точностью и числом каналов ввода-вывода.

Программное обеспечение NI-DAQ содержит комплекты драйверов Traditional NI-DAQ и NI-DAQmx предназначенные для конфигурации аппаратных средств фирмы NI. Traditional NI-DAQ является развитием более ранней версии NI-DAQ 6.9.x. NI-DAQmx является последней версией NI-DAQ.

Преимуществами NI-DAQmx по сравнению с предыдущими версиями драйверов NI-DAQ является повышенная производительность и многозадачность.

Таблица 2 – Характеристики платы NI PCI-6024E

Параметр	Значение
Шина	PCI
Количество аналоговых входов	16 униполярных (8 дифференциальных)
Частота оцифровки сигналов	200 кГц
Разрешение АЦП	12 бит
Входные диапазоны	от $\pm 0.05$ до $\pm 10$ В
Количество аналоговых выходов	2
Параметр	Значение
Разрешение ЦАП	12 бит
Частота работы ЦАП	10 кГц
Выходной диапазон	$\pm 10$ В
Цифровые каналы ввода/вывода	32
Счетчики, разрядность	2, 24 бит
Синхронизация	цифровая

### 1.6.3 Многофункциональные модули сбора данных

Основным преимуществом многофункциональных модулей сбора данных является их совместимость с любыми вычислительными платформами, поддерживающими интерфейс USB. Так как большая часть МСД используют именно этот протокол. Это позволяет не использовать дополнительный источник питания.

На сегодняшний день параметры и функционал ПСД и МСД практически сравнялись. Удобство и простота использования МСД с интерфейсом USB вызывает значительный интерес у пользователей и заставляет производителей постоянно совершенствовать свою продукцию.

Доступными стали высокопроизводительные многофункциональные USB устройства сбора данных, которые обладают функциональностью, эквивалентной возможностям PCI- и PXI-систем. Эти МСД имеют Plug-and-Play подключение устройств к компьютеру и позволяют минимизировать временные

затраты на конфигурирование системы, а наличие винтовых терминалов приводит к снижению ее стоимости и упрощает процесс подключения датчиков. Если использовать аппаратные и программные средства компании NI, конфигурирование и программирование ПСД и МСД полностью одинаково.

Однако существует ряд нестандартных задач со многими потоками данных, которые с помощью обычной ПСД решить нельзя. Например, это произойдет в случае, когда одновременно с непрерывным сбором данных необходимо будет осуществлять какую-то их обработку и управление датчиком, для чего требуется выводить и вводить информацию через цифровые порты платы.

Средствами измерений, обеспечивающими универсальность сбора данных и управления в реальном времени, являются интеллектуальные ПСД. Эти платы в своем составе содержат программируемый микропроцессор (или контроллер), который может работать под управлением собственной микропрограммы, разработанной под конкретную измерительную задачу.

Для интеллектуальных ПСД характерны следующие свойства:

- гибкость и универсальность при решении задач различного типа;
- низкие трудозатраты на разработку микропрограмм для процессоров с сокращенной системой команд и с простым ассемблером;
- независимость микропрограмм от версии операционной системы;
- возможность работы в реальном масштабе времени;
- разгрузка центрального процессора ПК;
- возможность высокопроизводительной обработки информации на самой плате ввода-вывода.

В качестве микропроцессора, используемого в составе интеллектуальной ПСД, часто используются цифровые сигнальные процессоры (ЦСП, DSP).

ЦСП представляют собой специализированные процессоры с RISC-архитектурой, аппаратно и программно оптимизированные на решение задач цифровой обработки сигналов (ЦОС). Они отличаются от обычных микропроцессоров своей высокой производительностью, обусловленной особенностями их архитектуры и системы команд.

## **1.7 Предварительная обработка оцифрованных сигналов**

Этап первичной обработки информации рассматривается во многих работах, например, в работе [8] авторы вкладывают в содержание этого этапа набор операций, составляющих первичную обработку. Анализируя многообразие задач первичной обработки, можно выделить следующие основные задачи:

1) контроль и повышение достоверности входной информации: отбраковка аномальных результатов измерений («ложных выбросов»), тестирование преобразователей информации, выделение линейных и нелинейных трендов, проверка случайного процесса на стационарность и т.п.;

2) сжатие информации: временная селекция (стробирование), частотная селекция (фильтрация), выделение огибающей сигнала (амплитудное, частотное и фазовое детектирование) и т.п.;

3) повышение точности измерения сигналов за счет устранения различных искажений входных сигналов: коррекция статических и динамических характеристик преобразователей информации и датчиков, нормирование входных сигналов по амплитуде и мощности и т.п.;

4) уменьшение уровня помех во входных сигналах (увеличение отношения сигнал/шум): сглаживание данных, усреднение данных, синхронное (когерентное) накопление и т.п.

Рассмотренные задачи и операции первичной обработки имеют универсальный характер и применимы в той или иной степени для сигналов разной физической природы. Например, для выбросов механизмов используют следующие основные приемы обработки: фильтрацию, нормализацию, амплитудное детектирование, стробирование, синхронное сложение и т.п.

Таким образом, в практических условиях активной работы с измеряемыми колебательными процессами технического объекта процедуре анализа и формирования признаков предшествуют процедуры предварительной обработки



сигналов, связанные с выделением информативных компонент, подавлением помех, нормированием сигналов и т. д.

В разработанных авторами приборах указанные функции реализованы аппаратно на базе программируемого логического контроллера NI CompactRIO со встроенной программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) (англ. field-programmable gate array), контроллера реального времени и модулей ввода/вывода. Функциональная гибкость обеспечивается средой разработки LabVIEW, предоставляющей возможность графически создавать приложения для контроллера реального времени и ПЛИС, входящих в состав NI CompactRIO, за минимальные сроки и без текстовых языков программирования, таких как C, C++, C#, VHDL, Verilog и др.

Архитектура FPGA обладает большой гибкостью, на ее базе можно реализовывать распараллеливание операций, что позволяет существенно повысить производительность всей систем цифровой обработки сигналов (Digital System Processing, DSP). Наиболее типичные примеры такого использования FPGA – реализация КИХ-фильтров, быстрого преобразования Фурье, цифрового преобразования с понижением частоты, блоков прямого исправления ошибок. При построении DSP-системы операции, требующие высокоскоростной обработки данных в параллельном режиме, реализуются на базе FPGA, а операции высокоскоростной последовательной обработки – с помощью контроллеров. Такое распределение ресурсов системы позволяет добиться оптимального соотношения цена-качество и снизить энергопотребление.

В случае использования FPGA ПЛИС на базе платформы NI CompactRIO отпадает необходимость в наличии опыта работы с технологиями проектирования, основанными на использовании языков VHDL и Verilog. Для этой цели используется LabVIEW – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования.

Именно наличие ПЛИС и возможность использования LabVIEW выгодно отличает NI CompactRIO от продукции конкурентов в области разработки систем автоматического управления. Характеристики системы CompactRIO отличаются

исключительно высокими показателями, позволяющими решать высокопроизводительные задачи.

Таким образом, по критериям многофункциональность, надежность, высокая производительность, открытая архитектура, компактность, механическая прочность, высокоуровневая среда графического программирования, а главное - высокоэффективное решение интеллектуальных задач в режиме реального времени для создания компьютерных приборов на основе идентификационных измерений эффективно использовать платформу NI CompactRIO.

Для решения многоканальных задач автоматизации и управления при помощи создания OEM приложений эффективно сократить финансовые расходы за счет использования интегрированной системы CompactRIO со встроенной ПЛИС FPGA и контроллером реального времени.

Обобщая круг решаемых задач, для компьютерных приборов на основе идентификационных измерений в области электроэнергетики, виброакустического анализа, идентификации и измерения низкочастотных сигналов от биообъектов, из представленной линейки модульных систем CompactRIO по соотношению цена-качество оптимальным решением является использование реконфигурируемого шасси NI cRIO-9074 на базе ПЛИС Xilinx Spartan-3 2M со встроенным контроллером реального времени 400 МГц и возможностью установки 8 модулей ввода/вывода сигналов. Характеристики NI cRIO-9074 представлены в таблице 3.

## **1.8 Методология разработки алгоритмического и программного обеспечения идентификационных измерений**

В настоящее время авторами предлагается комплекс [9] интеллектуальных технологий (методов и компьютерных средств), применение которых позволяет решать ряд прикладных задач по цифровой обработке, анализу, распознаванию и

идентификации сигналов, актуальных в области диагностики, контроля и управления.

Таблица 3 – Технические характеристики платформы CompactRIO

Параметр	Значение
Контролер реального времени	
Тактовая частота процессора	400 - 800 МГц
ОЗУ	64 - 512 (DDR2) МБ
ПЗУ	128 МБ - 4 ГБ
Последовательный интерфейс RS-232	1 - 2 шт.
Ethernet порты	(1 – 2)×10/100/1000 Мбит/с
USB-порт	Есть
Энергопотребление	до 32 Вт
Диапазон рабочих температур	от -40 до +70 °С
Реконфигурируемое шасси	
Параметр	Значение
Количество слотов	4 - 8 шт.
ПЛИС	FPGA Xilinx
Модули ввода/вывода	
Аналоговый и цифровой I/O	Есть
Тензометрия	Есть
Виброакустическая диагностика	Есть
Температурные измерения	Есть
Управление движением	Есть
Телекоммуникации	GPS, GSM, GPRS, RS-232, RS-485, CAN

Содержанием ТИИС является возможность измерения характеристик формы (РМЗ - распределение мгновенных значений) и вариабельности (РВИ - распределение временных интервалов) сигналов с помощью *идентификационной шкалы (ИШ)*. В ИШ оцифрованные отметки дополнены качественными показателями, например в виде собственных имен, обозначающих, например, текущее состояние объекта диагностики. В наиболее общем случае, собственными именами являются имена распределений вероятности, принятые в области статистических измерений, как указано в таблице 4.

С формальной точки зрения идентификационное измерение включает 2 процедуры: измерительное преобразование и считывания показаний.

Измерительное преобразование в ТИИС трактуется, как преобразование некоторого множества, например, временной характеристики  $x(t)$ , в число IdP, называемое *идентификационным параметром*. Считывание показаний – это процесс установления соответствия идентификационного числа (IdP) упорядоченному множеству эталонов (многозначной мере), т.е. интерполяция в ИШ.

Идентификационные параметры могут быть определены, как для сигнала  $x(t)$  (IdP1), так и для его производной (приращений)  $\Delta x(t)$  (IdP2). Идентификационные измерения, которые оперируют с двумя и более идентификационными параметрами, называются векторными.

В соответствии с теорией, объектами идентификационных измерений могут быть любые выборочные реализации сигналов, вне зависимости от их природы (периодические, случайные, композиционные, фрактальные), а также их характеристики:

- временная  $x(t)$  (в виде электрического сигнала или записи);
- спектральная  $X(j\omega)$  - преобразование Фурье от функции  $x(t)$ ;
- корреляционная  $K_{xx}(\tau)$  стационарного случайного процесса  $x(t)$  на конечном времени наблюдения  $(0, T)$ ;
- вероятностная (в виде гистограммы) возможные численные результаты попадания ее численной реализации в некоторый интервал  $[a, b]$ ;
- вейвлетная (в настоящее время ведутся исследования по возможности применения).

Логика идентификационных измерений поясняется рисунком 26, на котором изображены: выборочная реализация (Time Graph) исследуемого сигнала, идентификационный преобразователь (IdP-tester), идентификационная шкала (IS).

Идентификационный преобразователь (IdP-tester) характеризуется функциями преобразования [10]

$$NF = \left[ \frac{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}} \right]^2 ;$$

$$K = \frac{|\Delta \bar{X}(t)|}{|\bar{X}(t)|}$$
(19)

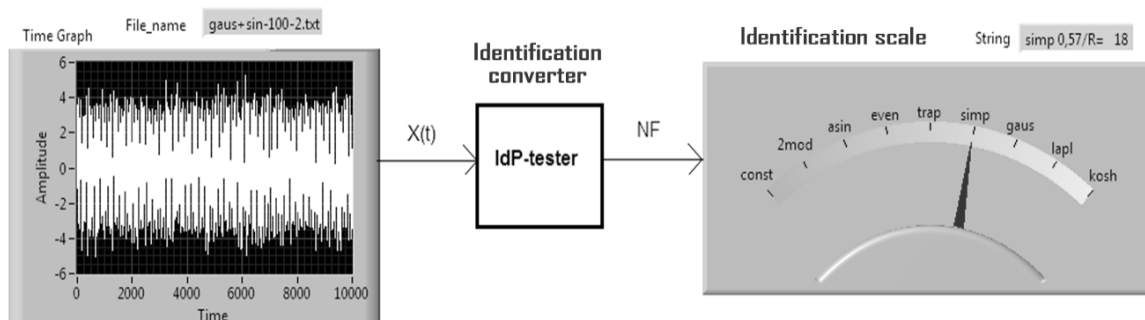


Рисунок 26 – Логика идентификационных измерений

Табличное представление ИШ, например, включает (таблица 4):

- порядковые номера (Rank) реперных точек;
- имена, компактно обозначающие симметричные распределения случайных сигналов (двумодального (2mod), арксинусного (asin), равномерного (even), трапециидального (trap), треугольного (simp), нормального (gaus), двустороннего экспоненциального (lapl) и Коши (kosh);
- численные оценки их идентификационного параметра NF.

Таблица 4 – Табличное представление идентификационной шкалы

IdP, N=10000	Type of distribution of random signals								
	const	2mod	asin	even	trap	simp	gaus	lapl	kosh
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NF	0	4	8	12	18	24	48	96	N..2N

В ИШ могут входить распределения и периодических сигналов.

Физический смысл такого представления состоит в том, что с *формой* сигнала можно работать, как с обычной физической величиной и производить с нею различные функциональные преобразования. В частности, форма РМЗ является прямым аналогом *фазы* и, поэтому, естественными единицами измерения служат радианы.

В концентрированном виде методология решения задач идентификационных измерений отражена структурной схемой, представленной на рисунке 27.

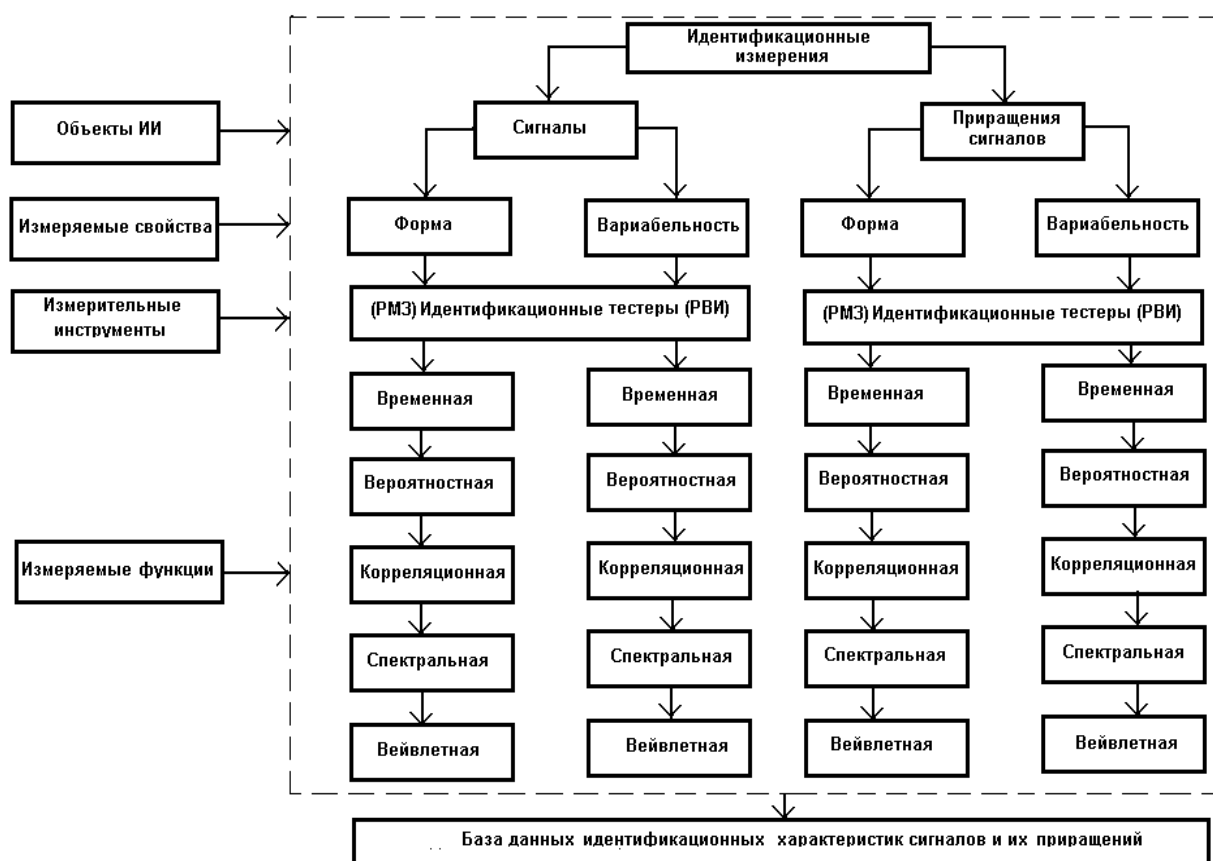


Рисунок 27 - Схема решения задач идентификационных измерений

Основная идея этой методологии, что является научной новизной алгоритмического и программного обеспечения компьютерных приборов и программного аппаратных комплексов, выражена следующими положениями.

Во-первых, анализироваться должен не только сам исходный сигнал, представленный, например, временным рядом наблюдений, но и его приращения

(скорость). Во многих случаях основная информация о свойствах процесса заключена именно в скорости изменения значений.

Во-вторых, необходимо учитывать, что свойства сигнала сконцентрированы как в распределении мгновенных значений (РМЗ, категория «форма»), так и в распределении временных интервалов (РВИ, категория «вариабельность»). Поэтому для устранения возможной неоднозначности надо измерять оба этих распределения, используя соответствующие инструменты.

В-третьих, поскольку заранее неизвестно, в каком из возможных представлений может наиболее значимо проявиться некоторая особенность сигнала, желательно измерять все стандартные функции: временную, вероятностную (например, гистограмму), корреляционную, спектральную и вейвлетную. Это также помогает устранить неоднозначность при распознавании сигналов, имеющих, например, похожие спектры, но различные автокорреляционные функции.

В-четвертых, поскольку аккумулятором результатов идентификационных измерений служит БД то, изучая ее идентификационную структуру, можно установить логические соответствия количественных и качественных свойств эталонных и тестируемых сигналов. В этом случае необходимо использовать весь арсенал реляционной алгебры, начиная от простейших операций сортировки и фильтрации записей. Следует отметить, что именно *работа со списками* составляет основное содержание обработки информации при идентификационных измерениях сигналов.

На основе указанной методологии могут быть сформированы различные методики решения задач идентификации, распознавания, контроля и диагностики. Особенности каждой методики определяются, главным образом, спецификой предметной области и конкретной постановкой задач исследований.

Методологию измерений можно использовать для создания новых средств и методов измерения формы сигналов и их характеристик, которые и были названы *идентификационными инструментами (ИИ)*.

## **Выводы по первой главе**

В результате проведенных исследований были предложены технологии создания компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов.

Особенностью предложенных приборов является их создание по принципу модульной архитектуры первичных преобразователей на базе компьютерной платформы CompactRIO с возможностью реконфигурирования системы в зависимости от решаемых задач. Данный подход дает возможность гибкой настройки параметров системы для широкого круга современных технологических процессов. Программное обеспечение, построенное на основе применения объектно-ориентированного языка LabVIEW, предоставляет возможность быстрого создания графического пользовательского интерфейса управления системой и данными.

Предложенные технические решения позволяют создавать компьютерные приборы, актуальные и востребованные в таких областях, как неразрушающий контроль и диагностика, автоматизация и управление, в биомедицинских технических системах и энергетике.



## **Глава 2.**

### **Разработка исследовательской системы**

#### **2.1 Аппаратная реализация исследовательской системы**

Авторами исследования с учетом научно-теоретических основ проектирования и конструирования аппаратной части и разработки алгоритмического и программного обеспечения компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов на основе идентификационных измерений сигналов была создана исследовательская система, соответствующая всем предъявляемым требованиям. Структурная схема системы представлена в приложении А.

В качестве контролирующего и управляющего устройства используется реконфигурируемая контрольно-измерительная система National Instruments CompactRIO.

CompactRIO представляет собой надежную и компактную промышленную систему управления и сбора данных, включающую в себя:

- контроллер реального времени на базе промышленного процессора, поддерживающего операции с плавающей точкой. В контроллере используется промышленный процессор с частотой 400 МГц, на котором выполняются приложения LabVIEW Real-Time Module с детерминированным временем исполнения операций. Огромная библиотека функций, поставляемая с LabVIEW, доступна для эффективной разработки собственных многопоточных контрольно-измерительных систем, работающих в режиме жесткого реального времени;
- реконфигурируемое шасси с встроенной ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) на два миллиона логических вентилей. Цепи ПЛИС представляют собой реконфигурируемую вычислительную машину, осуществляющую параллельную обработку данных и исполняющую приложения, созданные с помощью LabVIEW FPGA module, на аппаратном уровне микросхемы;

- большой набор модулей ввода/вывода различного типа.

На контроллере CompactRIO вместо Windows установлена операционная система реального времени. На ПЛИС операционной системы нет, так как код реализуется непосредственно на аппаратном уровне.

Контроллер реального времени обладает набором стандартных средств коммуникации с другими информационными системами. В обычном режиме взаимодействие контроллера и ПК происходит по Ethernet-соединению (10/100 Мбит/сек). При этом на ПК выполняется клиентская часть приложения LabVIEW Real-Time. Поддержка шины RS-232 (с технологией VISA), TCP/IP, UDP по Ethernet и основных сетевых служб (таких как SMTP E-mail, DataSocket...) предоставляет гораздо более широкие возможности интеграции с внешними системами. Контроллер обладает встроенными WEB и FTP серверами. WEB-сервер позволяют публиковать в сети лицевые панели приложений, исполняемых на контроллере, тем самым, реализуя человеко-машинный интерфейс, предоставляющий удаленным пользователям возможность осуществлять мониторинг и управление приложением.

Данные с модулей ввода-вывода передаются на ПЛИС в цифровом виде, т.к. формирование сигналов и аналого-цифровое преобразование происходят в самих модулях. Для передачи данных между контроллером и ПЛИС используется встроенная шина PCI. Связь контроллера с компьютером обычно осуществляется по сети Ethernet.

Каждый модуль ввода/вывода имеет прямой доступ к каналам ПЛИС и программируется с использованием простых функций ввода/вывода. Ввод/вывод сигналов с каждого модуля точно синхронизирован, за счет прямого подключения модулей к сигнальным линиям ПЛИС. Интерфейсом между ПЛИС и процессором реального времени служит шина PCI.

В цикле реального времени выполняются операции обработки данных, управления, сохранение данных на встроенной памяти контроллера.

В цикле ПЛИС реализован параллельный сбор данных с датчиков. Между циклом реального времени и основным циклом организован буферизованный обмен данными. Основной цикл выполняет следующие функции:

- Организация взаимодействия с человеко-машинными интерфейсами (с ПК по Ethernet с использованием приложения-клиента на ПК, с ПК через WEB-интерфейс);
- Ведение статистики и ее публикация в интерфейсах человек-машина, а также в файлах, доступных по FTP;
- Предоставляет возможность быстрой и эффективной модификации интерфейсной части приложения, не затрагивая управляющую часть (цикл ПЛИС и цикл реального времени).

В предлагаемой системе используются модули сбора данных:

- для снятия аналоговых токовых сигналов ( $\pm 20\text{mA}$ , 16 бит) NI 9203 (используем для подключения термосопротивления);
- для снятия аналоговых сигналов напряжения (300В, 24 бит) NI 9225 (используем для измерения высоковольтных напряжений);
- для снятия акустических вибросигналов ( $\pm 5\text{V}$ , 24 бит) NI 9234;
- для снятия кардиологических отведений – усилитель биопотенциалов (биоэнергетических сигналов).

## **2.2 Методика анализа испытательных сигналов**

Методика анализа, лежащая в основе компьютерного программного обеспечения, базируется на совместном использовании методов, основанных на абсолютных и относительных идентификационных измерениях [1,9]. Под абсолютными понимаются такие измерения входного сигнала, при которых эталон для сравнения формируется из самого сигнала, т.е. эталон оказывается «привязанным» к сигналу. При относительных идентификационных измерениях используются эталоны, независимые от входного сигнала.

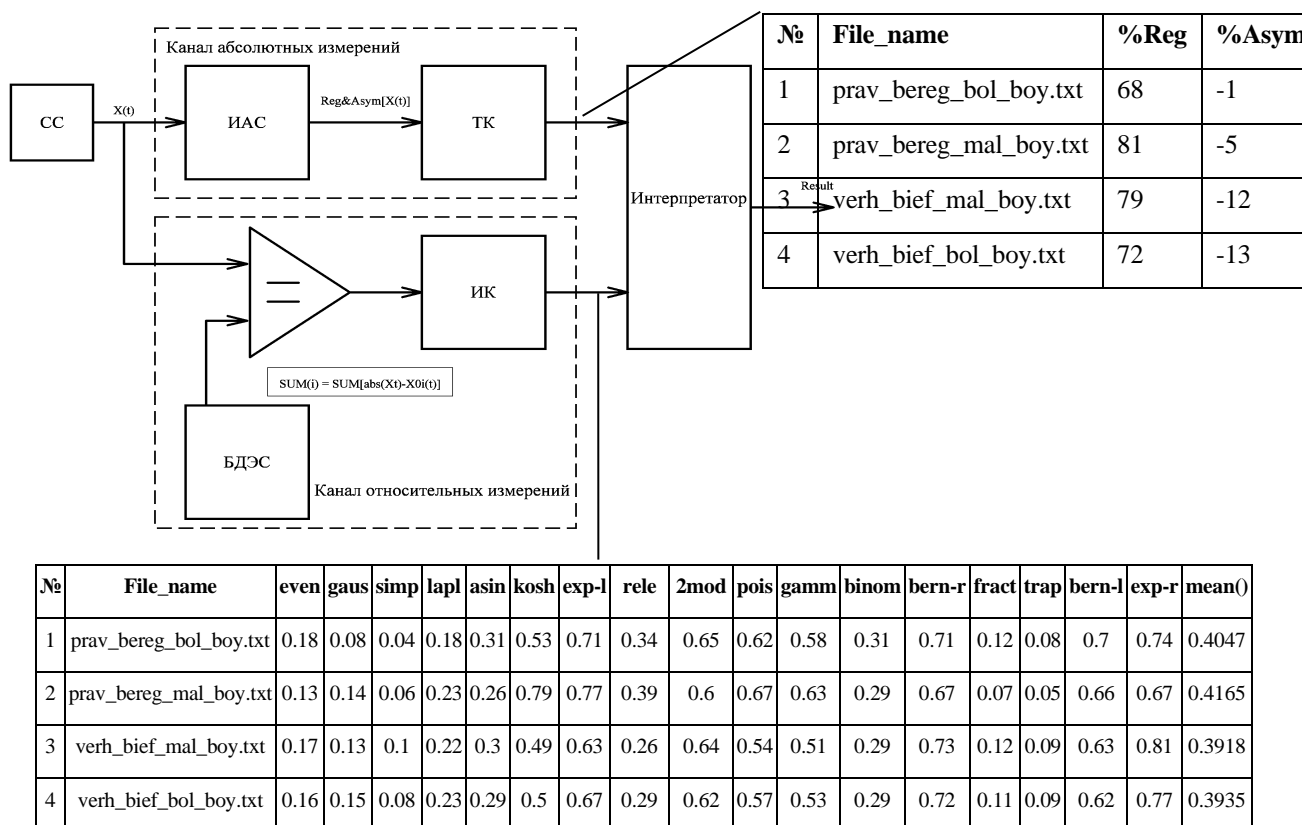
Структурная схема программного обеспечения исследовательской системы представлена на рисунке 28.

В состав схемы входят следующие блоки: считыватель сигналов (СС), идентификационный анализатор сигналов (ИАС), компаратор (К), база данных эталонных сигналов (БДЭС), табличный и иерархический классификатор (ТК и ИКл), а также интерпретатор. С помощью СС производится чтение с диска реализаций сигналов, принадлежащих объектам.

Исследуемые сигналы анализируются двумя каналами: абсолютных и относительных измерений (КАИ и КОИ). Блок ИАС измеряет несколько интегральных идентификационных параметров сигналов, из которых в дальнейшем анализе используются два: степень регулярности (%Reg) и степень асимметрии (%Asym). Эти параметры служат для построения двумерной табличной классификации (блок ТК), показанной в правой верхней части рисунка 28.

При этом степень регулярности (%Reg) характеризует относительное содержание регулярной компоненты в анализируемом сигнале, а степень асимметрии (%Asym) – смещение моды распределения от его центра.

Блоки К и БДЭС служат для измерения отклонений входных сигналов от системы из 17 эталонных сигналов с известными распределениями мгновенных значений. Чтобы правильно оценить суммарное значение отклонений, исследуемые и эталонные сигналы должны иметь одинаковое число отсчетов (одинаковые объемы выборок, N). Таблица отклонений представлена в нижней части рисунка 28, где столбец с именем Mean() отображает средние значения отклонений каждого сигнала (столбец с именем File\_name) от всех эталонов. Блок ИК производит сортировку эталонных сигналов по отклонениям для каждого из входных сигналов с тем, чтобы, затем, построить из имен эталонов классификационное дерево.



СС – Считыватель сигналов, ИАС – Идентификационный анализатор сигналов, К – Компаратор, БДЭС – База данных эталонных сигналов, ИКл – Иерархический классификатор, ТК – Табличный классификатор

Рисунок 28 - Структурная схема исследовательской системы

## 2.3 Программное обеспечение исследовательской системы

Структура программного кода исследовательской системы была выполнена в среде графического программирования LabVIEW, с помощью которой создана реляционная база данных (в среде EXCEL) результатов измерений идентификационных параметров входных сигналов. Путем сортировки и фильтрации записей в базе данных возможно распознавание и идентификация сигналов, построение линейной и древовидной классификации, связывающей имена файлов сигналов с диагностируемыми состояниями объектов.

Исследовательская система является интеллектуальным анализатором, поскольку содержит встроенную базу данных эталонов, которые представляют собой сортированные РМЗ и РВИ случайных и периодических сигналов. Система автоматически настраивается на определенный объем исследуемой выборки входного сигнала. Лицевая (пользовательская) панель компьютерной исследовательской системы представлена на рисунке 29, а структура программного кода в среде LabVIEW – на рисунке 30.

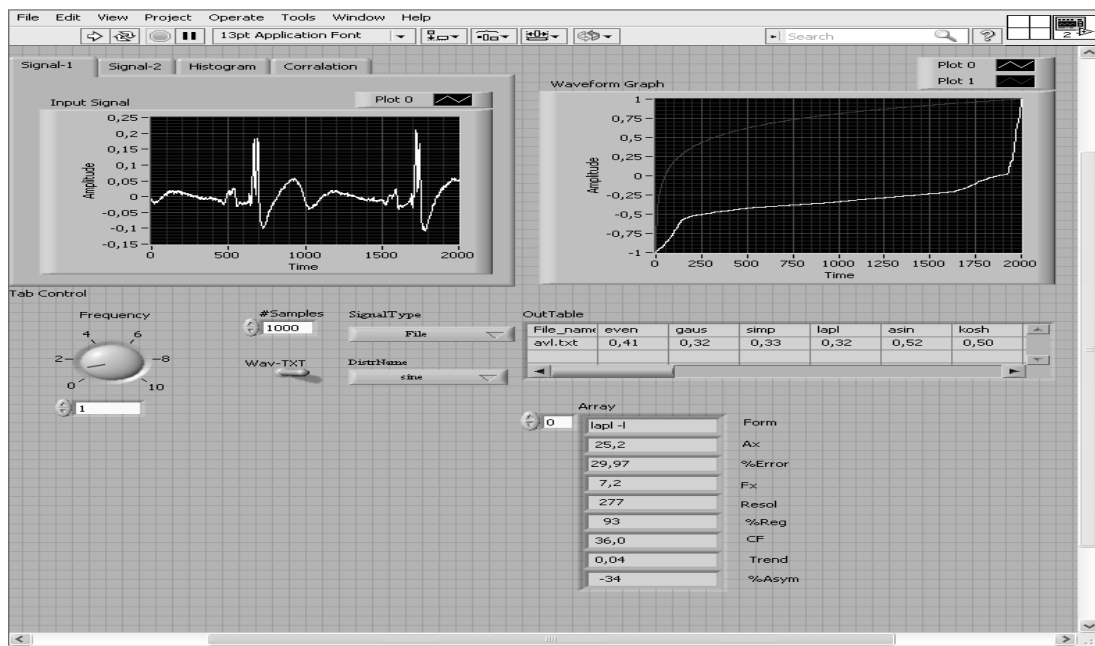


Рисунок 29 – Лицевая панель исследовательской системы

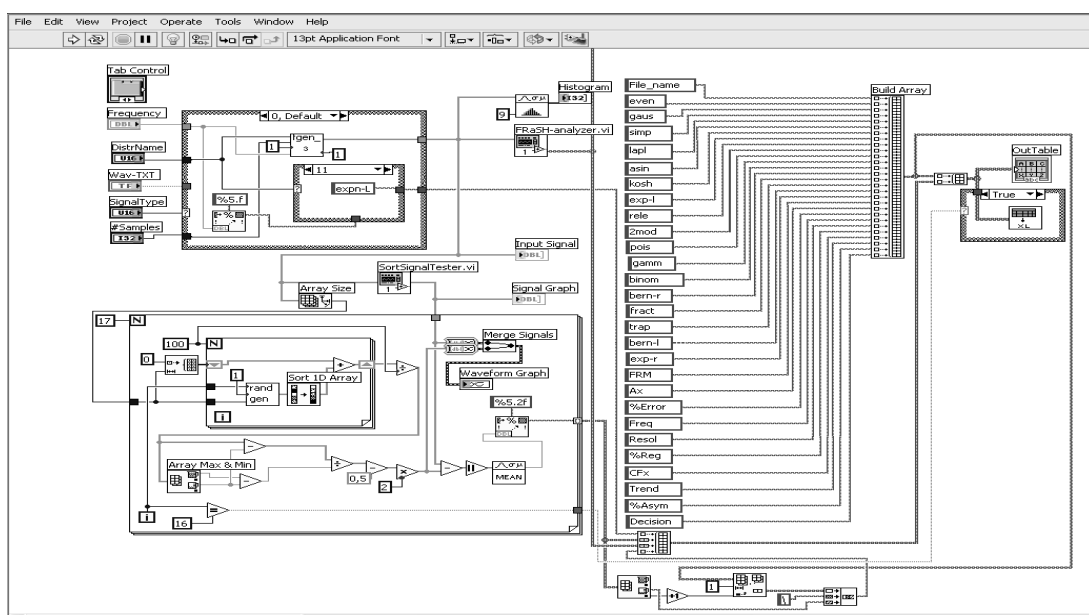


Рисунок 30 – Структура программного кода исследовательской системы

Интеллектуальная мощность системы и, соответственно, разрешающая способность иерархической классификации, зависит от количества используемых эталонов. В данном случае в базе данных хранится 17 эталонов, число которых можно увеличивать по мере роста требований к качеству распознавания. Для этого необходимо провести ряд технических мероприятий по модернизации программного обеспечения. Однако, и в таком виде, система позволяет решать многие задачи, связанные с количественной и качественной оценкой состояния сложных объектов.

Программное обеспечение исследовательской системы – это сложный комплекс идентификационных виртуальных (программных) приборов, их полный состав представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Состав библиотеки идентификационных виртуальных (программных) приборов на основе ТИИС, входящих в исследовательскую систему

Объем, Мбайт	Имя инструмента	Назначение
15,755	AutoCorrelation.vi	Построение автокорреляционной функции
27,891	Auto Power Spectrum.vi	Построение спектральной функции
29,148	2-Comparator.vi	2-х входовой идентификационный компаратор
100,561	CH-Analyzer-1.vi	Измерение и сохранение идентификационных параметров сигналов в EXCEL-таблице
18,539	concentrate_file_and_directory_path.vi	Объединение имен каталога и файла в одну запись
22,771	Extract Numbers.vi	Поиск значения по имени файла
34,806	FGen_3.vi	Генератор периодических, случайных и фрактальных сигналов
78,18	frac_gen.vi	Генератор фрактальных сигналов
34,618	FRaSH-analyzer.vi	Измерение 22 идентификационных параметров сигналов
27,345	FRaSH-Compare.vi	Сравнение 2-х сигналов по идентификационным параметрам
32,356	FRaSH-vector.vi	Универсальный вектор-тестер (модификация FRaSH-2.vi)

Продолжение таблицы 5

Объем, Мбайт	Имя инструмента	Назначение
36,564	Gaussian White Noise.vi	Генератор нормального белого шума
43,166	gencor.vi	ВП для коррекции формы стандартного генератора синусоиды в LabVIEW
166,06	IdP(F)-proba.vi	ВП для тестирования частотной характеристики вектор-тестеров
23,98	K-tester.vi	К-тестер, измеряющий вариабельность сигналов
57,31	NF-correct.vi	Устройство коррекции периодических формы сигналов
20,957	NF-tester.vi	NF-тестер, измеряющий форму распределений
25,863	Open Excel and Make Visible.vi	ВП для работы с XLS-таблицей
27,202	Open New WorkBook.vi	ВП для работы с XLS-таблицей
32,53	Open New WorkSheet.vi	ВП для работы с XLS-таблицей
79,183	randgen.vi	Комплексный генератор случайных сигналов
17,218	readfile-1.vi	ВП для чтения файлов TXT и WAV форматов
91,104	Signal Generator by Duration.vi	Генератор периодических сигналов
69,674	subdir-frash_1.vi	Измерение идентификационных параметров групп файлов сигналов
59,204	txt-wav_read.vi	ВП для чтения файлов TXT и WAV форматов
89,261	Write Table To XL.vi	ВП для работы с XLS-таблицей
29,039	X-delta.vi	ВП для формирования приращений сигналов (модуль К-тестера)
174,1	RandPerGen.llb	Библиотека генератора периодических сигналов с управляемой формой
363	Rndpergen.exe	Исполняемый файл идентификационного генератора сигналов специальной формы
580	Subdirfrash.exe	Исполняемый файл, считывающий группу файлов с диска и создающий соответствующую базу данных идентификационных параметров в EXCEL-таблице



## **Выводы по второй главе**

Создана универсальная исследовательская система, включающая инструменты и методы ТИИС и позволяющая решать задачи измерения, оценки состояния, диагностики, управления, в частности, в энергетике, вибродиагностике и электрокардиологии.

Аппаратная часть исследовательской системы реализована на основе реконфигурируемой, надежной и компактной системы управления и сбора данных в режиме реального времени CompactRIO National Instruments (NI). Применение инновационных технологий NI в перспективе существенно повысит возможности исследовательской системы: удаленный доступ, беспроводные технологии передачи информации, высокоскоростной сбор информации с большого количества датчиков, широкий диапазон параметров исследуемых сигналов.

Программное обеспечение исследовательской системы – сложный комплекс виртуальных приборов с возможностями интеллектуальной обработки периодических и случайных сигналов, управления базами данных, удобным интерфейсом пользователя.

## **Глава 3.**

### **Апробация исследовательской системы**

#### **3.1 Диагностика водородного топливного элемента**

##### **3.1.1 Объект исследования**

Топливный элемент (ТЭ) – это эффективный, надежный, долговечный и экологически чистый электрохимический источник электрической энергии. Считается, что водородные топливные элементы станут основой энергетики XXI века, поскольку в настоящее время они успешно используются в космонавтике, при теплоснабжении и электроснабжении зданий, в качестве стационарных электростанций и источников питания электронной техники. Теоретический КПД [12] ТЭ составляет ~ 83%, а для реальных систем – около 70%.

Исследования проводились совместно с заведующим кафедрой «Радиоэлектроника и информационно-измерительная техника», д.т.н., профессором Евдокимов Ю.К. Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ; д.т.н., профессором кафедры «Технология электронной аппаратуры» Омского государственного технического университета Кликушиным Ю.Н.

Наибольший интерес представляет ТЭ с протонообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) по причине технологичности, высокого КПД и возможности функционирования при низких температурах. Однако его работа определяется большой совокупностью параметров (давление, увлажненность подводимых газов, температура ячейки, электрический режим работы и т.д.), а также в значительной степени зависит от текущего состояния мембранно-электродного узла и газотранспортных каналов, существенно влияющих на КПД преобразования энергии [13]. Поэтому для повышения эффективности и надежности ТЭ с протонообменной мембраной требуется создание методов их диагностики непосредственно в процессе функционирования.

Современные методы диагностики ТЭ основаны на анализе шумов, поскольку подобные измерительные системы не вызывают возмущения ТЭ и не нарушают режима их работы [14]. Другими примерами применения электрохимических шумов являются: исследования коррозии металлических пленок и электродов [15], контроль качества выполнения пассивационных покрытий [16], оценка уровня заряда и детектирование перезарядки электрохимических батарей [17] и т.д.

В свою очередь, создание систем для шумовой диагностики ТЭ требует решения ряда специфических задач информационного характера. В частности, поскольку шум является неким сигналом, содержащим как регулярные, так и случайные компоненты, то возникает проблема: какие свойства этого сигнала надо измерять, чтобы получить наиболее информативную и адекватную оценку качества ТЭ?

Традиционно, основным путем решения указанной проблемы, является спектральный анализ, который предполагает возможность частотной фильтрации таких компонент шумового сигнала, которые, затем, можно было бы использовать в качестве диагностических признаков. Основным недостатком спектрального метода анализа является сложность выделения низкочастотных и трендовых составляющих шумового сигнала, что напрямую сказывается на достоверности оценки степени деградации ТЭ. Поэтому, актуальной становится задача поиска таких методов анализа шумовых сигналов, с помощью которых удалось бы преодолеть недостатки спектрального подхода и, таким образом, повысить надежность диагностической оценки состояния ТЭ.

В данных исследованиях анализировалась возможность применения теории идентификационных измерений сигналов (ТИИС) [1,9] для решения задачи выделения информативных параметров шума ТЭ и предложение методов для целей диагностики их состояния.

### 3.1.2 Условие эксперимента по исследованию ТЭ

Эксперимент проводился для водородного топливного элемента с протонообменной мембраной. Учеными из Франции и Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ был изготовлен мембранно-электродный узел топливного элемента методом горячего прессования ( $T=120^{\circ}\text{C}$ ,  $P=7,8\text{ МПа}$ ,  $t=130\text{ с}$ ) в лаборатории P'prime, Университет Пуатье (Франция) при проведении НИР в рамках международного российско-французского гранта РФФИ-CNRS N 07-08-92167 НЦНИ\_а при участии научной группы под руководством Евдокимова Ю.К. Каталитические слои, расположенные на протонообменной мембране *Nafion* 117, содержали 40% массовых долей Pt на углеродном носителе *Vulcan* XC-72 с платиновой нагрузкой  $0,5\text{ мг/см}^2$  и 20% массовых долей тефлона PTFE. В качестве защитного слоя была использована гидрофобизированная углеграфитовая ткань. Площадь активной поверхности квадратных электродов составляла  $5\text{ см}^2$ . Мембранно-электродный узел, используемый в эксперименте, располагался между двумя графитовыми пластинами с газотранспортными каналами, выполненными в виде однозаходного меандра. Глубина и толщина каналов составляла 1мм. Толщина медной токосборной пластины также составляла 1мм.

Для измерения электрических флуктуаций использовалась система измерения электрического сигнала ТЭ (СИЭ), структурная схема которой приведена на рисунке 31.

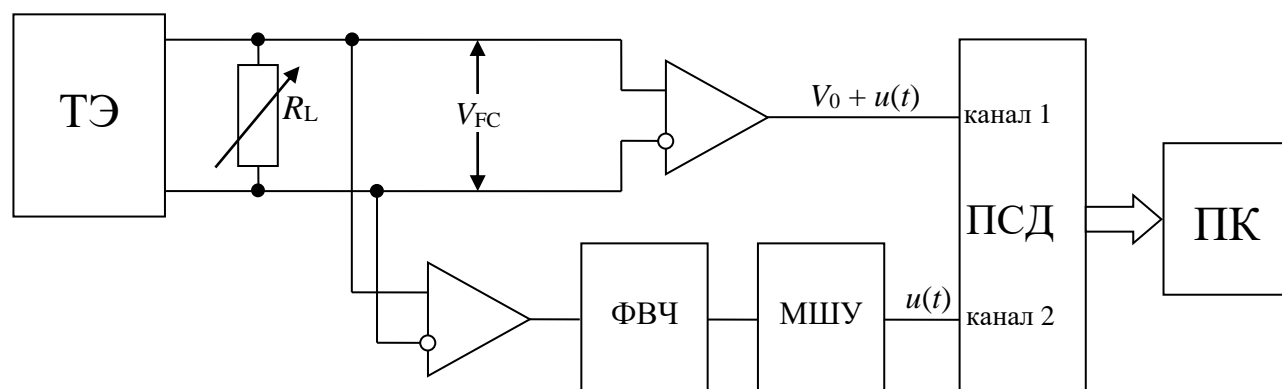


Рисунок 31 - Структурная схема системы измерения электрического шума ТЭ

Для измерения импедансных шумов и флуктуационных характеристик водородных ТЭ была разработана автоматизированная система измерения электрических флуктуаций водородного топливного элемента (FCTS – Fuel Cell Test Station), структурная схема которой приведена на рисунке 32. Разработанная система состоит из подсистемы обеспечения работы топливного элемента и системы измерения флуктуационно-шумовых сигналов и импеданса ТЭ. Подсистема обеспечения работы топливного элемента была разработана на основе установка *BANC TEST* фирмы *Fuel cell technologies, Inc.* Данная установка позволяет выбирать тип окислителя: воздух или кислород и задавать семь рабочих параметров топливного элемента: температуру ячейки топливного элемента  $T_{FC}$ , увлажненность топлива  $\eta_A$  и окислителя  $\eta_C$ , скорость подачи (объемный расход) топлива  $Q_A$  и окислителя  $Q_C$ , давление на выходе анодного  $P_A$  и катодного  $P_C$  газотранспортных каналов.

Подсистема обеспечения работы ТЭ функционирует следующим образом. Регуляторы объемного расхода (АРОР, КРОР) обеспечивают подачу водорода и кислорода в ячейку ТЭ в анодную (АСУ) и катодную (КСУ) системы увлажнения или непосредственно к газотранспортным каналам ТЭ в зависимости от положения переключателей выбор режима увлажнения (АВРУ, КВРУ). Увлажненность топлива  $\eta_A$  и окислителя  $\eta_C$  регулируется изменением температур анодной и катодной систем увлажнения  $T_{HA}$  и  $T_{HC}$  соответственно. На выходе анодного и катодного газотранспотных каналов установлены регуляторы давления (АРД, КРД), задающие рабочее давление в системе. Температура ячейки ТЭ задается системой регулировки температуры (РТ).

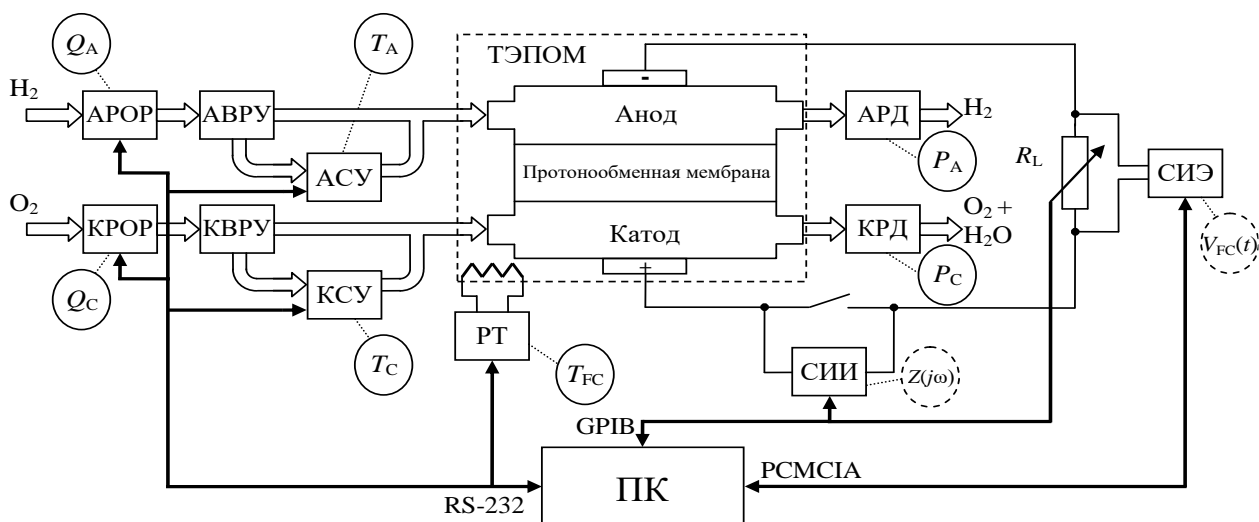


Рисунок 32 - Структурная схема автоматизированной системы диагностики топливного элемента

Температура ячейки ТЭ и температура системы регулирования влажности газов поддерживается контроллером температуры (РТ) CN76122 Т/С, имеющим погрешность установки температуры  $\pm 0,25$  °С. Реагирующие газы увлажняются путем пропускания через внешний резервуар с водой. Регулировка температуры воды позволяет управлять их влажностью. Давление газов внутри ТЭ задается регуляторами давления, имеющими относительную погрешность менее 2%. Установка FCTS работает под контролем компьютеризированной системы управления и измерения. Программное обеспечение данной системы реализовано в среде LabVIEW 8.5 фирмы National Instruments. Компьютеризированная система связана с анодным (АРОР) и катодным (КРОР) контроллерами объемного расхода газов, установленными перед увлажнителем и позволяющими задавать скорость массового расхода с погрешностью менее 1 % от номинального значения.

Рабочие параметры топливного элемента во время эксперимента:

$T_{FC} = 50^{\circ}\text{C}$  (темпера;  $T_{HA} = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{HC} = \text{dry}$  (без увлажнения);  
 $Q_A = 300$  мл/мин;  $Q_C = 600$  мл/мин;  $P_A = P_C = 200$  кПа.

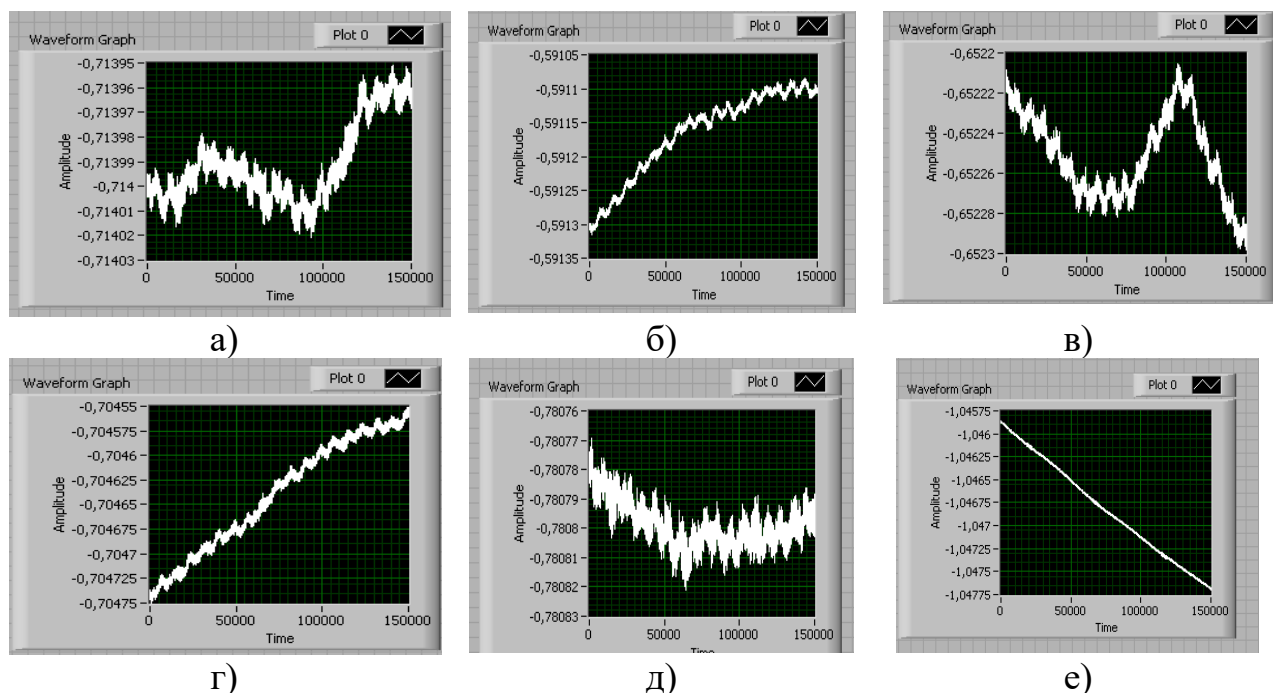
Авторам работы в рамках творческого сотрудничества было предложена следующая задача: выявить информативные параметры импедансных шумов и

флуктуационных характеристик на основе применения ТИИС и с применением исследовательской системы создать методики оценки состояния для системы диагностики топливного элемента.

Исследуемыми во время эксперимента были приняты состояния топливного элемента при изменении нагрузки: 0.4Ом, 1Ом, 2.4Ом, 4.4Ом, 10.4Ом и холостой ход (ОС); которые впоследствии использовались в названии файлов. Как следует из проведенных исследований, изменение нагрузки приводит к существенному изменению тока топливного элемента и режима работы.

### 3.1.3 Результаты эксперимента

С применением исследовательской системы были воспроизведены формы сигналов импедансных шумов и флуктуационных характеристик, их диаграммы представлены на рисунке 33.



Сопротивления нагрузки соответственно : а) R1=4.4Ом, б) R1=0.4Ом, в) R1=1.1Ом, г) R1=2.4Ом, д) R1=10.4Ом, е) R1=ОС

Рисунок 33 – Сигналы импедансных шумов и флуктуационных характеристик ТЭ.

В результате исследований были предложены следующие методики оценки состояния топливного элемента, зависящие от конкретной формулировки задачи диагностики. Наиболее общий характер имеют следующие методики.

Методика № 1 В соответствии с этой методикой диагностические признаки формируются непосредственно из анализа численных оценок идентификационных параметров сигналов. Методика реализуется в 2 этапа.

На первом этапе формируются эталонные сигналы, характеризующие различные состояния диагностируемого объекта (этап обучения). Это могут быть сигналы, соответствующие, по мнению экспертов, определенным качественным состояниям ТЭ. Для этих сигналов (и их производных) измеряются идентификационные параметры, например, NF1 и NF2. Создается база данных (БД) (например, в среде EXCEL, таблица 6), объединяющая имена эталонных сигналов (FileName), наименования анализируемых характеристик (колонок Graph: временная – Time, вероятностная – Histogram), значения идентификационных параметров формы сигналов (NF1) и формы приращений (NF2), а также вариабельности (K). В графе Chart помещаются качественные характеристики, назначенные экспертами.

Таблица 6 является реляционной БД, в которой полями служат столбцы, а записями – строки. Путем введения опции «Автофильтр», можно сортировать записи БД, устанавливать интервалы анализа и, таким образом, обнаруживать скрытые закономерности в ее структуре. В частности, можно синтезировать алгоритм, который только по минимальным и максимальным значениям трех параметров (NF1, NF2, K) устанавливает путь доступа к любой записи и, следовательно, к любой качественной характеристике. Условия, фильтрующие качественные характеристики ТЭ, представлены в таблице 7. Естественно, что наряду с минимаксными оценками для фильтрации записей можно использовать интервальные значения.



Таблица 6 - База данных идентификационных параметров ТЭ

FileName	Graph	NF1	NF2	K	Chart
R1_OC.txt	Time	12,0383	240,1867	0,0011	Холостой ход
R1_2.4.txt	Time	12,3319	132,9297	0,0075	Оптимальное сопротивление
R1_0.4.txt	Time	13,5609	194,924	0,0061	Очень малое сопротивление
R1_4.4.txt	Time	18,52	124,4674	0,0321	Большое сопротивление
R1_1.txt	Time	19,7392	177,3398	0,0198	Малое сопротивление
R1_10.4.txt	Time	47,2656	178,8409	0,0578	Очень большое сопротивление
R1_0.4.txt	Hist	8,05696	8,400593	0,636	Очень малое сопротивление
R1_10.4.txt	Hist	8,00263	9,967668	0,877	Очень большое сопротивление
R1_4.4.txt	Hist	6,79407	7,52353	1,1072	Большое сопротивление
R1_1.txt	Hist	8,80568	10,43063	1,109	Малое сопротивление
R1_OC.txt	Hist	7,76907	5,301039	1,3941	Холостой ход
R1_2.4.txt	Hist	10,6105	9,619171	1,4429	Оптимальное сопротивление

Таблица 7 - Условия, фильтрующие качественные характеристики ТЭ

FileName	Chart	Условия	
		Time	Hist
R1_OC.txt	Холостой ход	NF1=min; NF2=max; K=min	NF2=min
R1_2.4.txt	Оптимальное сопротивление		NF1=max; K=max
R1_0.4.txt	Очень малое сопротивление		K=min
R1_4.4.txt	Большое сопротивление	NF2=min	NF1=min
R1_1.txt	Малое сопротивление	NF1=max; K=max	NF2=max
R1_10.4.txt	Очень большое сопротивление		

Условия, фильтрующие качественные характеристики ТЭ, записываются в виде алгоритма в память анализирующей части системы измерения.

На втором этапе (этапе измерения) анализируется входной сигнал с неизвестной качественной характеристикой. При этом измеряются те же идентификационные параметры (NF1, NF2, K), используя которые по записанному алгоритму определяется путь доступа к сигналу. Если конечной точкой этого пути служит один из вариантов качественных характеристик (Chart, таблица 7), то данная характеристика принимается за конечный результат анализа. Для исключения возможных ошибок, полученный результат всегда согласовывается с мнением экспертов данной предметной области. Если же сочетание идентификационных параметров анализируемого сигнала не приводят к одному из выходов алгоритма фильтрации, то требуется либо увеличить количество эталонов БД, либо увеличить размерность измерения идентификационных параметров введением дополнительных характеристик (например, ввести измерение автокорреляционных функций).

Методика № 2 Формирует алгоритм непосредственного сравнения эталонных сигналов с анализируемым по значениям отсчетов. В этом случае количество отсчетов в сравниваемых сигналах должно быть одинаковым, а сигналы – нормированы по амплитуде.

Важным достоинством данной методики является то, что в качестве эталонных могут быть использованы любые сигналы, не обязательно принадлежащие предметной области анализируемых сигналов. Так, например, в таблице 8 представлены результаты сравнения исследуемых сигналов типа R1\_XX.txt с набором из 16 случайных сигналов – эталонов, имеющих, разные РМЗ, в краткой форме указанные в имени распределения.

Таблица 8 - Результаты сравнения исследуемых сигналов (R1\_XX.txt) с эталонными

Ethalons	File_name					
	R1_2.4.txt	R1_0.4.txt	R1_1.txt	R1_4.4.txt	R1_10.4.txt	R1_OC.txt
2mod	31,9	38,7	43,1	46,9	61,3	33
asin	13,7	28,4	23,6	31	46,9	12,3
bern-l	47,2	65,5	49,4	38,5	55,2	38,5
bern-r	35,5	27,8	51,7	65,3	76,4	42,5
binom	28	34,4	34,4	35,7	50,7	24,6
even	10,7	29,5	12,3	24,2	38,7	3,5
exp-l	106,9	161,3	89,3	60,1	65,6	79,2
exp-r	67,4	40,9	90,3	130,7	133,6	90,4
gamm	98,7	151,1	83,6	53,1	60,2	72,2
gaus	43,9	53,2	31,7	46,3	32,9	42
kosh	100	100,1	100,1	100,1	100	100
lapl	65,1	68,5	57,3	68,5	55,4	64,8
pois	93,6	141,9	81,4	52,7	59,9	69,9
rele	68,7	107,8	59,2	31,2	39,4	48,7
simp	22,2	36,3	8,6	26,3	29,5	19,9
trap	15,3	33,1	3,1	22,4	31,1	12,9
Fx	9,6	7	19,4	30	33,4	1,3
Ax	7,8	8,7	10,2	10,7	17,3	8
<i>Примечание:</i> Отклонения сигналов и эталонов указаны в %.						

В частности, 2mod – двумодальное; asin – арксинусное; bern-l – Бернулли, левое; bern-r – Бернулли, правое; binom – биномиальное; even – равномерное; exp-l – экспоненциальное, левое; exp-r – экспоненциальное, правое; gamm – гамма; gaus – нормальное; kosh – Коши; lapl – двустороннее экспоненциальное; pois – Пуассона; rele – Рэлея; simp – треугольное; trap – трапецеидальное, распределения.

Символами Fx (Гц) и Ax (рад) обозначены, соответственно, характеристическая частота и параметр формы исследуемых сигналов [1,9].

На базе данной методики могут быть построены различные алгоритмы сравнения исследуемых сигналов уже между собой.

Так, например, один из вариантов анализа представлен в таблице 9 и использует закономерности кластерного группирования исследуемых сигналов, следующие из данных таблицы 8.

Таблица 9 – Закономерности кластерного группирования

Имя кластера	Состав кластера
asin	R1_OC.txt/ $\delta=12,3\%$ ; R1_0.4.txt/ $\delta=28,4\%$
even	R1_2.4.txt/ $\delta=10,7\%$
trap	R1_1.txt/ $\delta=3,1\%$ ; R1_4.4.txt/ $\delta=22,4\%$ ; R1_10.4.txt/ $\delta=31,1\%$

По результатам кластерного анализа можно сделать вывод о том, что сопротивление  $R = 2,4$  Ом является, в некотором смысле, *критическим* (граничным), поскольку разделяет остальные сигналы на два противоположных кластера – с вогнутым (asin) и выпуклым (trap) распределениями.

Возможно, это указывает на два обстоятельства. Во-первых, свойства ТЭ весьма чувствительны к сопротивлению нагрузки. Во-вторых, свойства ТЭ нелинейно зависят от сопротивления нагрузки.

Другой вариант анализа состоит в том, чтобы сравнить исследуемые сигналы по спискам эталонов, упорядоченных по отклонению (таблица 10). В этом случае появляется возможность оценить силу связи между исследуемыми сигналами в форме симметричной матрицы, коэффициенты которой представляют собой относительное число совпадений имен эталонов, находящихся в одинаковых позициях в списках (таблица 11).

При анализе входного, неизвестного сигнала матрица (табл.6) расширится на одну строку и один столбец.

Содержательная интерпретация коэффициентов связи принадлежит экспертам, которые могут по результатам анализа не только диагностировать состояние ТЭ, но и сформулировать требования к технологии их изготовления и использования.

Таблица 10 - Упорядоченные по отклонению списки имен эталонов исследуемых сигналов

R1_2.4.txt	R1_0.4.txt	R1_1.txt	R1_4.4.txt	R1_10.4.txt	R1_OC.txt
even	bern-r	trap	trap	simp	even
asin	asin	simp	even	trap	asin
trap	even	even	simp	gaus	trap
simp	trap	asin	asin	even	simp
binom	binom	gaus	rele	rele	binom
2mod	simp	binom	binom	asin	2mod
bern-r	2mod	2mod	bern-l	binom	bern-l
gaus	exp-r	bern-l	gaus	bern-l	gaus
bern-l	gaus	bern-r	2mod	lapl	bern-r
lapl	bern-l	lapl	pois	pois	rele
exp-r	lapl	rele	gamm	gamm	lapl
rele	kosh	pois	exp-l	2mod	pois
pois	rele	gamm	bern-r	exp-l	gamm
gamm	pois	exp-l	lapl	bern-r	exp-l
kosh	gamm	exp-r	kosh	kosh	exp-r
exp-l	exp-l	kosh	exp-r	exp-r	kosh

Таблица 11 - Матрица коэффициентов связи между исследуемыми сигналами

Название	R1_2.4.txt	R1_0.4.txt	R1_1.txt	R1_4.4.txt	R1_10.4.txt	R1_OC.txt
R1_2.4.txt	1	0,125	0,0625	0,125	0,0625	0,4375
R1_0.4.txt	0,125	1	0,125	0	0	0,1875
R1_1.txt	0,0625	0,125	1	0,1875	0,0625	0,375
R1_4.4.txt	0,125	0	0,1875	1	0,3125	0,125
R1_10.4.txt	0,0625	0	0,0625	0,3125	1	0
R1_OC.txt	0,4375	0,1875	0,375	0,125	0	1

Можно сказать, что Методика №2 использует классификационные свойства семейства эталонных распределений.

Методика № 3 Сочетает измерение идентификационных параметров сигналов и их классификацию. Рассмотрим пример, используя данные измерения характеристической частоты ( $F_x$ ) и параметра формы ( $A_x$ ) исследуемых сигналов из таблицы 8.

Разобьем диапазоны изменения идентификационных параметров на интервалы, задав, тем самым, количество классов группирования. В частности, при построении таблицы 12 было сформировано 6 классов по параметру формы и 7 классов по характеристической частоте, что потенциально обеспечивает  $M = 42$  класса группирования. Достоинством данного представления является то, что детализацией анализа можно управлять, применяя операции объединения или разбиения ячеек.

Таблица 12 - Классификация сигналов по параметру формы и характеристической частоте

		Диапазон параметра формы $A_x$					
		7	9	11	13	15	17
		R1_O C					
Диапазон хар-кой частоты $F_x$	1						
	7		R1_0. 4 R1_2. 4				
	13						
	19			R1_1			
	25						
	31			R1_4. 4			
	37						R1_10. 4

Качественная интерпретация полученных результатов принадлежит экспертам. Однако, если принять, что наилучшие условия работы ТЭ обеспечиваются в режиме холостого хода ( $R1_{OC}$ ), то наихудшие – в режиме  $R1_{10.4}$ . Определенные вопросы возникают при рассмотрении поведения ТЭ в

диапазоне от 0,4 до 2,4 Ом, в котором происходит нарушение упорядоченности в закономерности «больше сопротивление – хуже режим».

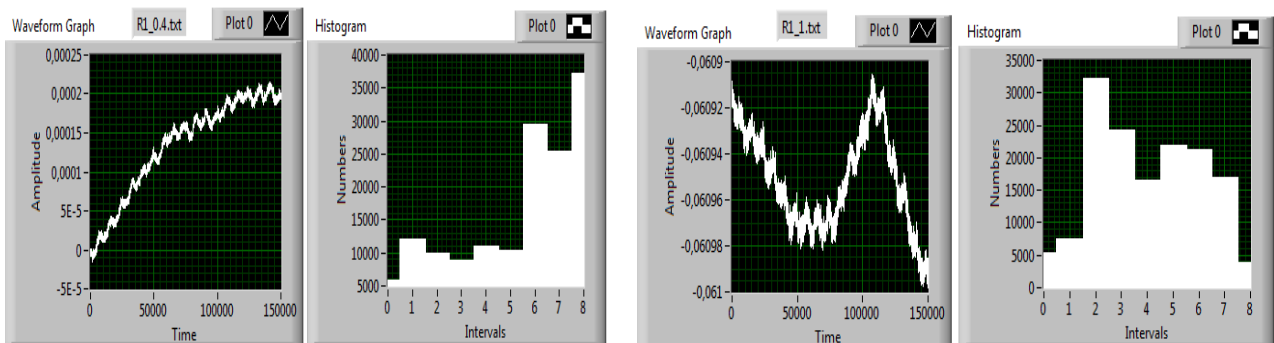
Методика № 4 Ориентирована на построение иерархических структур (классификационных деревьев). Использование деревьев классификации не слишком распространено в вероятностно-статистическом распознавании образов [10], однако они довольно широко используются в таких прикладных областях, как медицинская и техническая диагностика, программирование (анализ структуры данных), биология (классификация) и психология (теория принятия решений). Деревья классификации идеально приспособлены для графического представления, и поэтому сделанные на их основе выводы гораздо легче интерпретировать, чем, если бы они были представлены только в числовой форме.

Идея использования результатов идентификационных измерений для построения классификационных деревьев была высказана и реализована в работе [20] и более детально рассмотрена в работах [21, 22]. Данная идея основана на логике идентификационных измерений (рисунок 26), которая, используя упорядоченную систему эталонов, в качестве результатов предлагает рассматривать связь между именами этих эталонов. Поскольку имена эталонов отображают качественные характеристики объектов анализа, то, тем самым визуализируются связи между различными свойствами сигналов.

Рассмотрим задачу анализа в следующей постановке. Имеется группа из 6 сигналов, определяющих шумовые свойства и флуктуационные характеристики ТЭ при различных сопротивлениях нагрузки. Проведены идентификационные измерения (параметра формы NF1) временных характеристик этих сигналов (рисунок 33), вероятностных характеристик в виде гистограмм на рисунке 34. Результаты идентификационных измерений диагностических сигналов представлены в таблице 6.

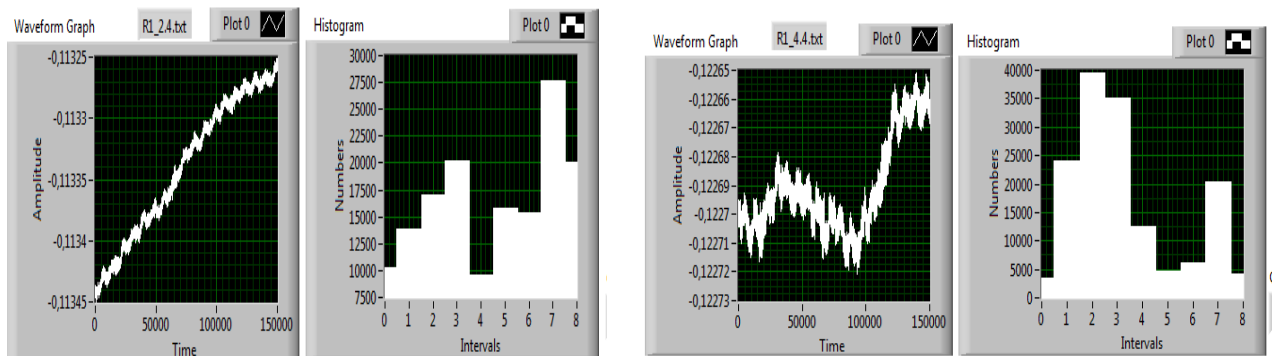
Задача состоит в том, чтобы построить совместное дерево сигналов и определить количественно связи между сигналами. Возможно, что в результате

такого анализа удастся определить оптимальный режим работы ТЭ по сопротивлению нагрузки.



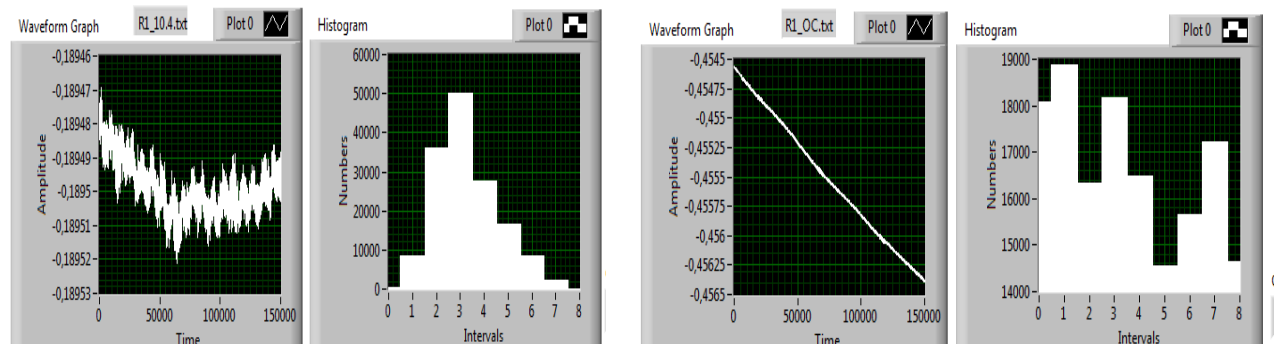
а)

б)



в)

г)



файлы а) R1\_04.txt, б) R1\_1.txt, в) R1\_2,4.txt, г) R1\_4,4.txt, д) R1\_10,4.txt, е)  
R1\_OC.txt

Рисунок 34 - Визуальные образы временной (Waveform Graph) и вероятностной (Histogram) характеристик сигналов

Алгоритм построения классификационного дерева представлен на рисунке 35. В качестве начальных условий примем *упорядоченную* последовательность имен эталонов (const-2mod-asin-even-trap-simp-gaus-lapl-kosh) ИШ в качестве



прямой шкалы (Direct Scale, DS). Соответственно, обратную последовательность имен эталонов ИШ (kosh-lapl-gaus-simp-trap-even-asin-2mod-const) будем называть обратной шкалой (Reverse Scale, RS). Понятно, что все сигналы, имеющие значения идентификационных параметров, отличающихся от граничных ( $0 \leq NF_x \leq N$ ), будут иметь другую – *неупорядоченную* последовательность имен эталонов. Назовем такую, неупорядоченную последовательность измерительной шкалой (Measurement Scale).

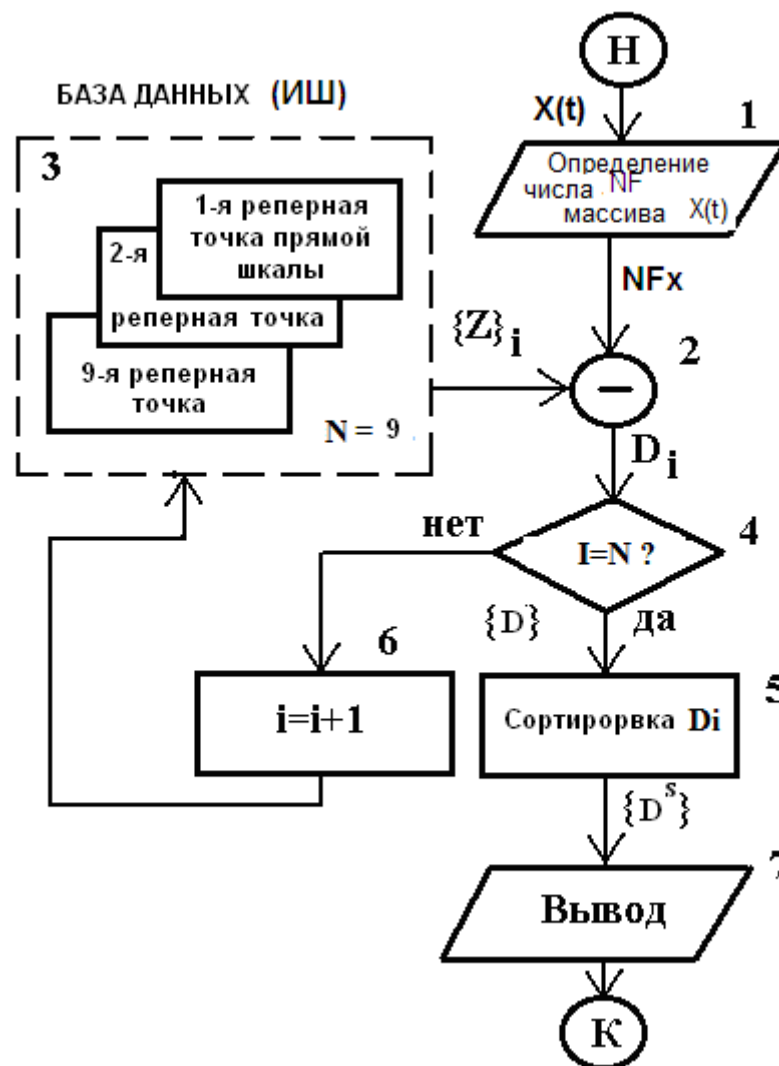


Рисунок 35 - Алгоритм построения классификационного дерева

По результатам последовательного идентификационного измерения  $NF_x$  для каждого сигнала, запускается процедура поточечного вычисления разностей  $D_i$

$$D_i = |NF_X - NF_i^{\mathfrak{A}}|. \quad (20)$$

где  $NF_i^{\mathfrak{A}}$  – значения идентификационных параметров ИШ (объекты-эталоны) для случайных сигналов.

Полученные разности сортируются для получения позиционного кода по критерию  $D_i = \min$  в виде оптимизационной процедуры

$$ПК(j) = \bigcap_j \bigcup_i (i / \text{rank}(D_i = \min) = j) \quad (21)$$

или

$$\begin{aligned} &\text{Если } D_i = \min, \text{ то } \text{rank}(D_i) = 1 \text{ — старший разряд,} \\ &\text{Если } D_i = \max, \text{ то } \text{rank}(D_i) = N \text{ — младший разряд.} \end{aligned}$$

Идея формирования количественной оценки связи между шкалами (DS-MS-RS) проиллюстрирована на рисунке 36. В данном случае используется оценка в виде относительного рангового расстояния ( $-1 \leq M \leq +1$ ).

Позиционный (Position Code, ПК) и лингвистический (Lingvo Code, ЛК) 9-ти (по числу эталонов ИШ) коды являются основными компонентами структуры (рисунок 36). ПК перечисляет порядковые номера (ранги) эталонов ИШ, выстроенные в зависимости от значения идентификационного параметра (NF). ЛК представляет список имен эталонов ПК. Расстояние между отдельными шкалами определяется как сумма модулей разности порядковых номеров, находящихся в одинаковой позиции.

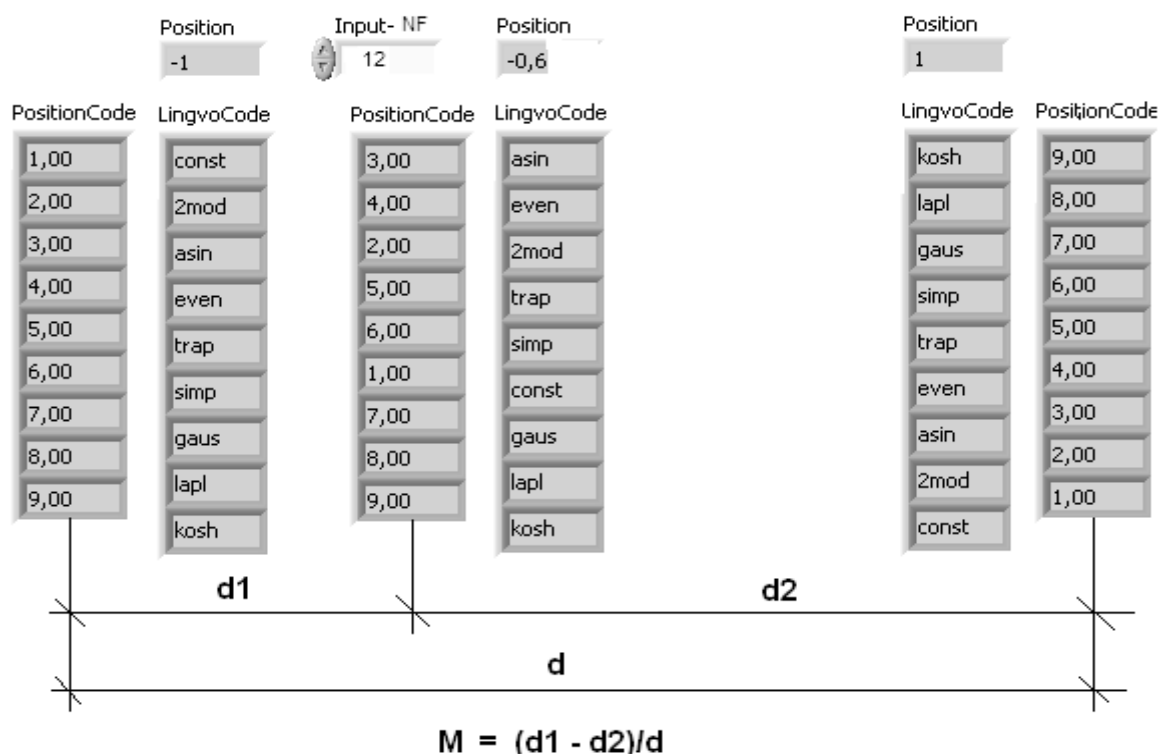


Рисунок 36 - Иллюстрация алгоритма оценки относительного рангового расстояния между шкалами

В таблице 13 даны результаты вычислений позиционных и лингвистических кодов анализируемых сигналов, по которым построено классификационное дерево (рисунок 37).

Построение дерева ведется по принципу «от общего к частному», начиная с последнего 9-го разряда ПК, который является общим для всех сигналов. Переходя последовательно к младшим разрядам ПК отмечаем узлы ветвления. Первое ветвление происходит в 7-ом разряде ПК, где 5 сигналов имеют имя «gaus», а сигнал R1\_10.4 – имя «const».

Таблица 13 - Результаты вычислений позиционных и лингвистических кодов сигналов

Позиционные коды, отклонения, последовательности имен эталонов  
ИШ

R1_OC	4	3	5	2	6	1	7	8	9
M=-0,6	0,04	4,04	5,96	8,04	11,96	12,04	47,96	107,96	2987,96
	even	asin	trap	2mod	simp	const	gaus	lapl	kosh
R1_2.4	4	3	5	2	6	1	7	8	9
M=-0,6	0,33	4,33	5,67	8,33	11,67	12,33	47,67	107,67	2987,67
	even	asin	trap	2mod	simp	const	gaus	lapl	kosh
R1_0.4	4	5	3	2	6	1	7	8	9
M=-0,6	1,56	4,44	5,56	9,56	10,44	13,56	46,44	106,44	2986,44
	even	trap	asin	2mod	simp	const	gaus	lapl	kosh
R1_4.4	5	6	4	3	2	1	7	8	9
M=-0,45	0,52	5,48	6,52	10,52	14,52	18,52	41,48	101,48	2981,48
	trap	simp	even	asin	2mod	const	gaus	lapl	kosh
R1_1	5	6	4	3	2	1	7	8	9
M=-0,45	1,74	4,26	7,74	11,74	15,74	19,74	40,26	100,26	2980,26
	trap	simp	even	asin	2mod	const	gaus	lapl	kosh
R1_10.4	7	6	5	4	3	2	1	8	9
M=-0,1	12,7	23,3	29,3	35,3	39,3	43,3	47,3	72,7	2952,7
	gaus	simp	trap	even	asin	2mod	const	lapl	kosh

Корнем дерева являются наиболее общие разряды (kosh, lapl). Имена сигналов представляют собой конечные ветви. Связи между ветвями количественно оцениваются относительным числом совпавших имен эталонов, находящихся в одинаковых разрядах (оценка дерева «по вертикали»). Соответствующая квадратная матрица коэффициентов связи, представлена в таблице 14, позволяет кластеризовать сигналы так, как показано в таблице 15.

Таблица 14 - Матрица коэффициентов связи ветвей классификационного дерева

	R1_0.4	R1_1	R1_2.4	R1_4.4	R1_10.4	R1_OC	Mean
R1_0.4	1,00	0,44	0,78	0,44	0,22	0,78	0,61
R1_1	0,44	1,00	0,44	1,00	0,33	0,44	0,61
R1_2.4	0,78	0,44	1,00	0,44	0,33	1,00	0,67
R1_4.4	0,44	1,00	0,44	1,00	0,33	0,44	0,61
R1_10.4	0,22	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,43
R1_OC	0,78	0,44	1,00	0,44	0,33	1,00	0,67

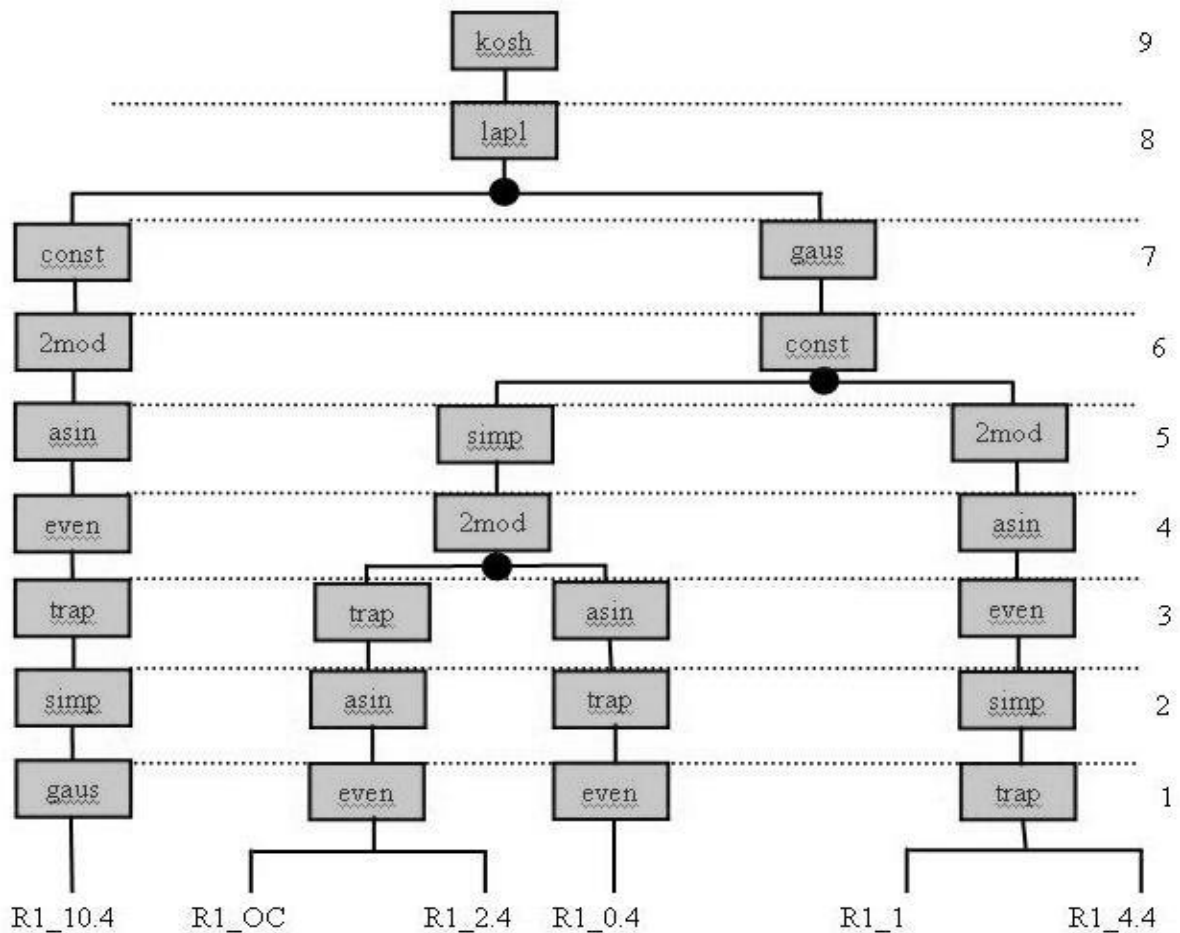


Рисунок 37 - Совместное дерево шумовых сигналов ТЭ

«По горизонтали» сложность дерева оценивается с помощью относительного рангового расстояния (показатель М, рисунок 36, таблица 13).

Таблица 15 - Кластерная характеристика сигналов

Параметры кластера	Состав кластера и его параметры
$k=0,67; M=-0,6$	R1_OC; R1_2.4
$k=0,61; M=-0,6$	R1_0.4
$k=0,61; M=-0,45$	R1_1; R1_4.4
$k=0,43; M=-0,1$	R1_10.4

Таким образом, данная методика не только визуализирует скрытые закономерности в структуре сигналов, но также позволяет строить полностью измеримые иерархические структуры.

Методика № 5 Поскольку анализируемые сигналы весьма похожи на фрактальные, то имеет смысл оценивать для них специальные, фрактальные показатели. Традиционно, в качестве таких показателей используются показатель Херста [24] и корреляционная размерность [15]. Недостатком этих показателей является малая статистическая устойчивость, усложняющая оценку степени достоверности измерений свойств сигналов.

В данном случае, в качестве альтернативы, предлагается использовать алгоритмы оценки таких свойств сигналов, как регулярность-хаотичность и трендовость-колебательность [1,9].

Результаты измерения этих свойств представлены в таблице 16. Классификация сигналов по соответствующим параметрам (степень регулярности, % и относительная сила тренда без учета его направления) отражена в таблице 17.

Таблица 16 - Показатели регулярности-хаотичности (Reg, %) и трендовости-колебательности (Trend) анализируемых сигналов

File_name	Reg, %	Trend
R1_0.4.txt	99	0,95
R1_1.txt	98	-0,12
R1_10.4.txt	95	-0,45
R1_2.4.txt	99	0,98
R1_4.4.txt	97	0,57
R1_OC.txt	100	-1

*Примечание:* 1) оценка Reg,% округлена до целых значений, 2) знак тренда указывает его направление (-) убывающий, (+) возрастающий, 3) если тренд  $\approx 0$ , то процесс считается колебательным.

Вопрос о содержательной интерпретации полученных результатов относится к компетенции экспертов соответствующей предметной области.

Таблица 17 - Классификация сигналов по степени регулярности и силе тренда

Сила тренда	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Степень регул.%						
95			R1_10.4			
96						
97				R1_4.4		
98		R1_1				
99						R1_2.4; R1_0.4
100						R1_OC

### *Выводы по результатам исследований*

1 Рассмотрено применение теории идентификационных измерений сигналов (ТИИС) для оценки состояния топливного элемента по электрическим шумовым сигналам, содержащим стационарные и нестационарные составляющие. Установлено, что методики количественных и качественных измерений формы сигналов, как физической величины, в структуре глобальных эталонов позволяют адекватно идентифицировать и оценивать качество режимов работы топливного элемента.

2 В соответствии с ТИИС, если сочетание идентификационных параметров анализируемого сигнала не приводят к оценке состояния, то требуется либо увеличить количество эталонов БД, либо увеличить размерность измерения идентификационных параметров введением дополнительных характеристик. Установлено, что для диагностики работы топливного элемента при изменении сопротивления нагрузки необходимо и достаточно измерять временную и вероятностную характеристики электрических флуктуаций и шума.

3 Для шумовых сигналов топливного элемента, содержащих диагностические признаки и имеющих сложную временную, амплитудную и топологическую структуры предложено использовать алгоритмы оценки таких свойств сигналов как регулярность-хаотичность и трендовость-колебательность.

4 Содержательная интерпретация коэффициентов связи и установленные визуальные скрытые закономерности в измеримой иерархической структуре сигналов позволят экспертам формулировать требования к технологии изготовления и использования топливного элемента. Результаты исследований могут быть использованы также для решения задач шумовой диагностики технологических процессов и технических систем, в медицинской диагностике и электрокардиологических исследованиях.

### **3.2 Диагностика гидроагрегата ГЭС**

Цель: установление возможности использования исследовательской системы для решения задач оценки состояния подшипниковых узлов и диагностики по вибрационным сигналам гидроагрегатов одной из ГЭС Сибирского региона, что существенно повысит эффективность проведения профилактических и ремонтных работ и продлит надежность функционирования оборудования.

3.2.1 Описание объекта исследования и результаты аналитических исследований по вибродиагностике

Данная работа проводилась в порядке творческого сотрудничества между Северо-Казахстанским государственным университетом им. М.Козыбаева, ООО «Диамех2000» и Омским государственным техническим университетом (ОмГТУ). ООО «Диамех2000» в настоящее время является ведущим российским производителем промышленного балансировочного оборудования и виброизмерительной аппаратуры.



От ООО «Диамех2000» в исследованиях принимали участие заместитель главного инженера, член Экспертного совета по вибрации РАО ЕЭС, к.т.н. Трунин Е.С.; от ОмГТУ - д.т.н., профессор кафедры «Технология электронной аппаратуры» Кликушин Ю.Н.

Технические характеристики объекта исследования представлены в таблице 18.

Информационно-измерительная система «АЛМАЗ-7010-ГЭС» используется в оперативном режиме для контроля состояний по параметрам абсолютных вибраций опорных конструкций (направляющих подшипников), крышки турбины, спинки статора, корпуса статора, а также для контроля относительной вибрации (биения) валопровода- ротора генератора и турбины в подшипниках.

В систему входят следующие элементы:

- датчик фазовой отметки (отметчик оборотов), на схеме № 24;
- датчик абсолютных виброперемещений верхнего генераторного подшипника, №№ 1,2;
- акселерометр ВБ, радиально;
- акселерометр ПБ, радиально;
- датчик относительных виброперемещений вала в районе верхнего генераторного подшипника, №№10,11;
- универсальный датчик приближения ВБ;
- универсальный датчик приближения ПБ;
- датчик абсолютных виброперемещений активного железа статора, №№ 18,19;
- датчик абсолютных виброперемещений нижнего генераторного подшипника, №№ 3,4;
- датчик относительных виброперемещений вала в районе нижнего генераторного подшипника, №№12,13;
- датчик абсолютных виброперемещений опоры подпятника, №5
- акселерометр ВБ, вертикально;

Таблица 18 – Технические характеристики объекта исследования

Гидрогенератор типа	СВИ 1160/180-72
Подпятник двухрядный	24 пары ЭМП сегментов
Направляющие подшипники баббитовые в	12 сегментов в каждом
Завод-изготовитель	УЭТМ г.Екатеринбург
– мощность номинальная полная	103 МВА
– мощность номинальная активная	82,8 МВт
Рабочий диапазон нагрузок	(20 – 82,8) МВт
Номинальное напряжение	15,45 кВ
Общая масса генератора	1100т
Масса ротора	600т
Масса вала	60т
Тип турбины (поворото-лопастная)	ПЛ – 577-ВБ-720
Завод-изготовитель	ЛМЗ, г.Санкт-Петербург
Мощность	90 МВт
Рабочие напоры	
наибольший	32м
– расчетный по мощности	29м
Турбинный подшипник резиновый	12 сегментов
Число лопастей рабочего колеса	7
Рабочий диапазон нагрузок	(20 – 82,8) МВт
Число лопаток направляющего аппарата	32
Частота вращения ротора	83,3 об/мин – (о частота

- датчик относительных вертикальных виброперемещений диска подпятника, №№ 14,15;
- датчик абсолютных виброперемещений турбинного подшипника, №№ 6,7,8,9;
- акселерометр ВБ, радиально (корпус);
- акселерометр ВБ, вертикально (крышка);
- акселерометр ПБ, радиально (корпус);
- акселерометр ПБ, вертикально (крышка);
- датчик относительных виброперемещений вала в районе турбинного подшипника, №№16,17;

– система измерения воздушного зазора главного генератора, №№ 20,21,22,23;

- датчик приближения (ДВЗ) 4 точки;
- стойка;
- процессорные модули (крейты) – по числу каналов;
- компьютер (устанавливаемый в стойке);
- программные продукты, в том числе «АЛМАЗ-МОНИТОР».

Комбинированные датчики воздушного зазора позволяют при работе (в динамике) определять отклонения полюсов ротора генератора от концентричности («механическая» форма ротора), датчики определения искажения магнитного поля ротора - (магнитная «форма ротора»).

Измерения проводятся непрерывно на разных режимах, в случае превышения уставок срабатывает сигнализация предупреждения и, при необходимости автоматический останов гидроагрегата.

Схема расположения датчиков в соответствии с техническим заданием представлена на рисунке 38.

Программное обеспечение информационно-измерительной системы из-за множества каналов включает сложную и объемную базу данных (параметров вибраций) и сигналов (с составляющими спектра) и не предусматривает автоматической классификации вибросигналов, что затрудняет принимать объективные решения о состоянии гидроагрегата.

Следовательно, система нуждается в технологиях распознавания большого количества испытательных сигналов, систематизации базы данных диагностических вибросигналов для облегчения работе эксперта. Очень удобной в данном случае является анализ сигналов с предоставлением эксперту лингвистических характеристик (описания дефектов, рекомендации по ремонту, качественных характеристик состояния объекта и т.д.).

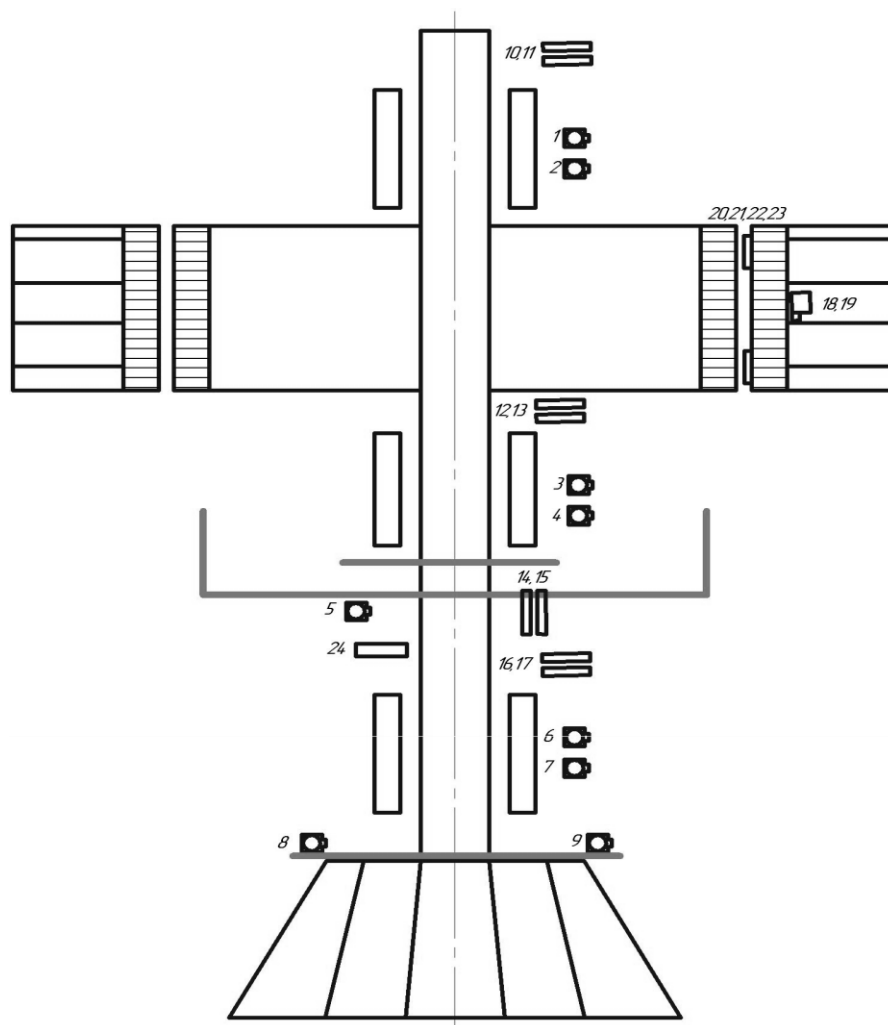


Рисунок 38 - Схема расположения датчиков в соответствии с техническим заданием

Данным требованиям может соответствовать информационно-измерительная система «АЛМАЗ-7010-ГЭС», работающая совместно с разработанной исследовательской системой на основе идентификационных измерений.

В настоящее время известно более двадцати технологий вибродиагностики технических систем, однако наиболее эффективными из них являются основанные на методах: спектрального анализа [26,27], анализа специальных диагностических параметров [28,29,30], на основе применения вейвлет-анализа [31] и нейронных сетей [32].

Общей особенностью указанных методов является то, что они, в той или иной степени, решают задачу классификации - разделение группы объектов на

некоторые части – подгруппы (кластеры, таксоны), внутри которых объекты имеют общие (в определенном смысле) свойства. В познавательном отношении сложность процедуры классификации состоит в том, что, с одной стороны, необходимо объекты разделить на отдельные отличающиеся кластеры, а, с другой стороны, надо сделать так, чтобы в один и тот же кластер попали сигналы, имеющие нечто общее. Данное противоречие приводит к тому, что классификация становится оптимизационной процедурой и ее "правильность" во многом зависит от принятых пользователем критериев оптимизации. Более того, если учесть, что классификационные задачи обладают высокой степенью априорной неопределенности, становится понятным, почему решение подобных задач не может быть однозначным.

Возможным решением задачи классификации могло бы стать предложение – связать форму распределения мгновенных значений информативного сигнала с текущим состоянием объекта диагностики [1,9]. Пока вариации моментов (например, математического ожидания, дисперсии, эксцесса и др.) не изменяют форму распределения, идентифицируемую, например, как нормальную, состояние объекта считается постоянным и равным лингвистическому терму «НОРМ». Переход объекта из одного состояния (например, НОРМ) в другое - индицируется изменением имени (например, СИМП = треугольное) распределения мгновенных значений сигнала. Таким образом, происходит автоматическая классификация, при которой число классов группирования зависит от количества эталонных распределений, используемых системой распознавания в качестве реперных точек. При этом, внутри класса, объекты упорядочиваются по значению соответствующего идентификационного параметра. Подобный подход в настоящее время развивается в рамках теории идентификационных измерений сигналов (ТИИС).

Совместные исследования проводились в два этапа, что позволило предложить два варианта технологических решений.

### 3.2.2 Первый вариант технологических решений вибродиагностики гидроагрегата

На 1-м этапе анализировались реальные изменения параметров с датчиков зазора между валом и опорой при малом и большом боях (биениях) вала. Соответствующие вибросигналы представлены на рисунке 39.

Датчики расположены под 90 градусов в плоскости, перпендикулярной валу в районе нижней крестовины генераторного подшипника гидроагрегата. Датчик №1 располагается на стороне «Верхнего бьефа» - ВБ (место высокого уровня воды), датчик №2 устанавливается со стороны «Правого берега реки» - ПБ.

1 В результате проведенных исследований было установлено, что для распознавания объектов диагностики (ПБ(бб), ПБ(мб), ВБ(бб), ВБ(мб)) путем идентификационных измерений необходимо и достаточно оценивать распределения мгновенных значений (РМЗ) временных и автокорреляционных функций вибросигналов, представляющих собой отклонения от текущего среднего значения.

Примеры временной и корреляционной функций сигналов, характерных для объекта диагностики ВБ(бб), представлены на рисунке 40.

2 Путем идентификации временных и корреляционных функций сигналов удалось разделить объекты диагностики на 4 класса, т.е. представить в виде идентификационной шкалы или идентификационной таблицы 19.

Идентификация исследуемых вибросигналов осуществлялась путем интерполяции - присвоения функциям имен эталонов внутренней базы данных по принципу минимума отклонения между значениями идентификационных параметров сигнала и эталона.

3 На основе разработанной идентификационной таблицы 19 был сформирован алгоритм автоматической классификации вибросигналов объектов диагностики (рисунок 41). В структуре алгоритма учтено то обстоятельство, что каждый объект характеризуется набором из двух логически связанных лингвистических термов, например, “simp-rele” (ВБ(мб)). Свободные выходы

(Резерв) позволяют выделить дополнительные ситуации, описания которых отсутствуют в идентификационной таблице. Перспектива дальнейших исследований связана с расширением номенклатуры контролируемых узлов гидроагрегата.

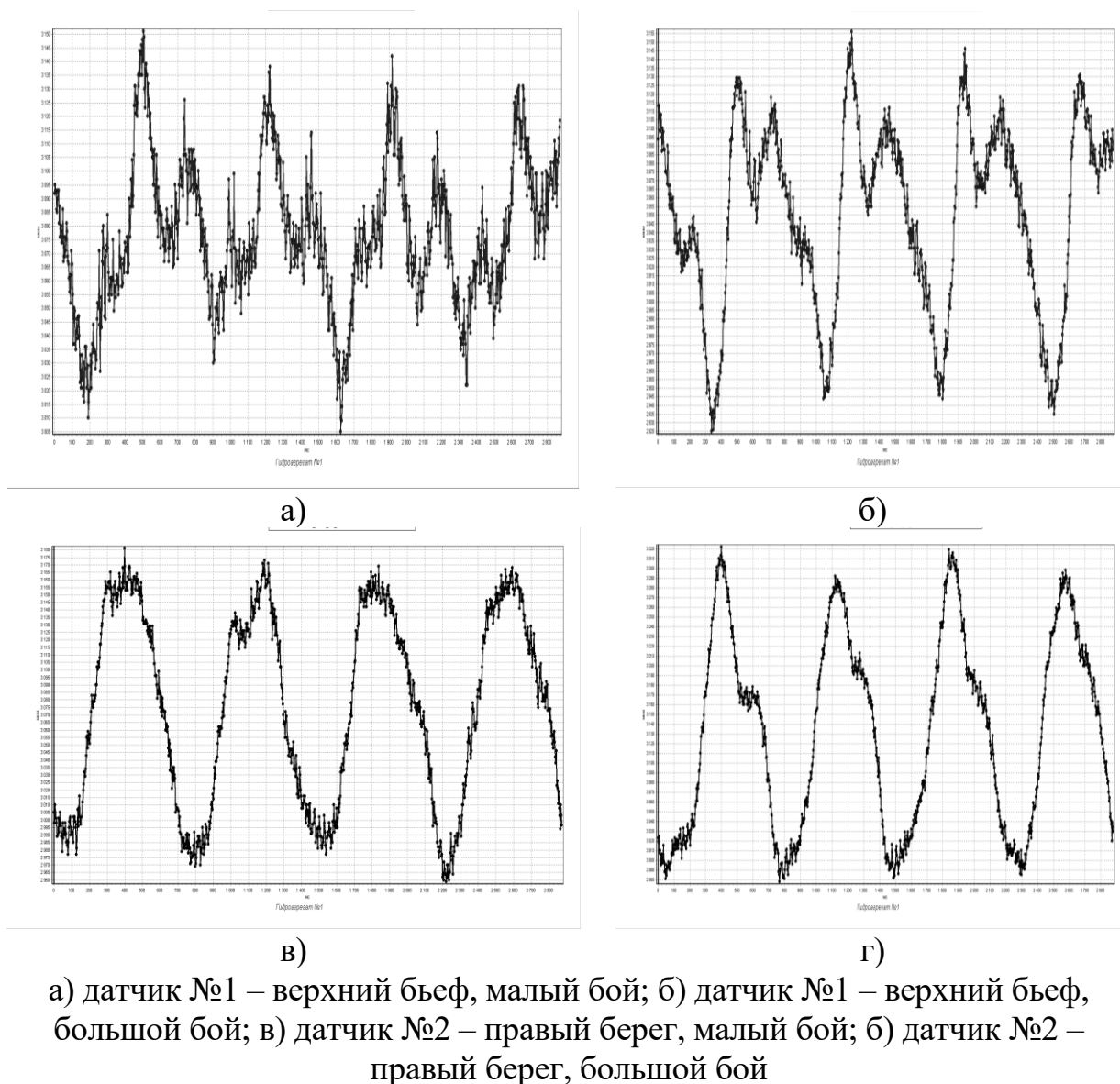
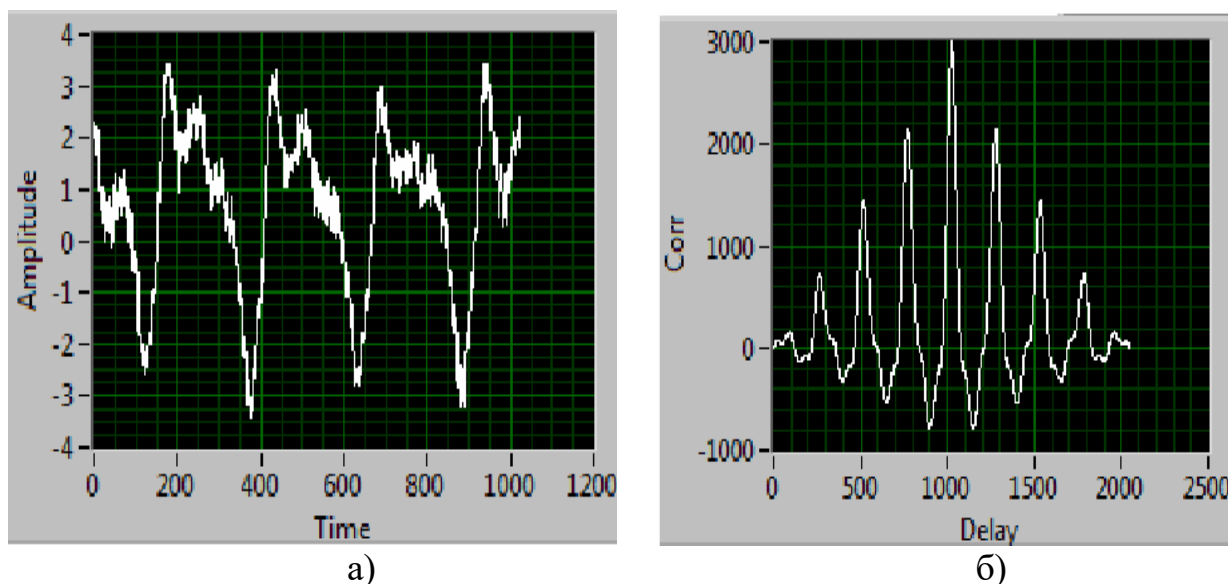


Рисунок 39 – Сигналы изменения зазора в районе нижней крестовины (НК)

### Выводы по результатам исследований

Рассмотренные идентификационные инструменты и методика их использования позволяют решать задачу распознавания и оценки состояний сложных объектов с автоматической выдачей пользователю лингвистических описаний в терминах, принятых экспертами данной предметной области.



а) временная, б) автокорреляционная

Рисунок 40 – Функции вибросигналов отклонений для объекта диагностики ВБ(бб)

Таблица 19 – Идентификационная таблица

Имя РМЗ временной функции сигнала	Имя РМЗ корреляционной функции сигнала	Имя – состояние объекта диагностики
simp-r	Pois	ВБ(бб)
simp	Rele	ВБ(мб)
even	simp-l	ПБ(бб)
even-r	simp-l	ПБ(мб)

В таблице 19: EVEN – равномерное распределение, SIMP – треугольное распределение; POIS – распределение Пуассона, RELE – распределение Рэля. Индекс (\_l) означает левую асимметричность распределения, индекс (\_r) означает правую асимметричность распределения. В данном случае понятие



асимметричности учитывает скошенность и смещенность РМЗ от центра гистограммы.

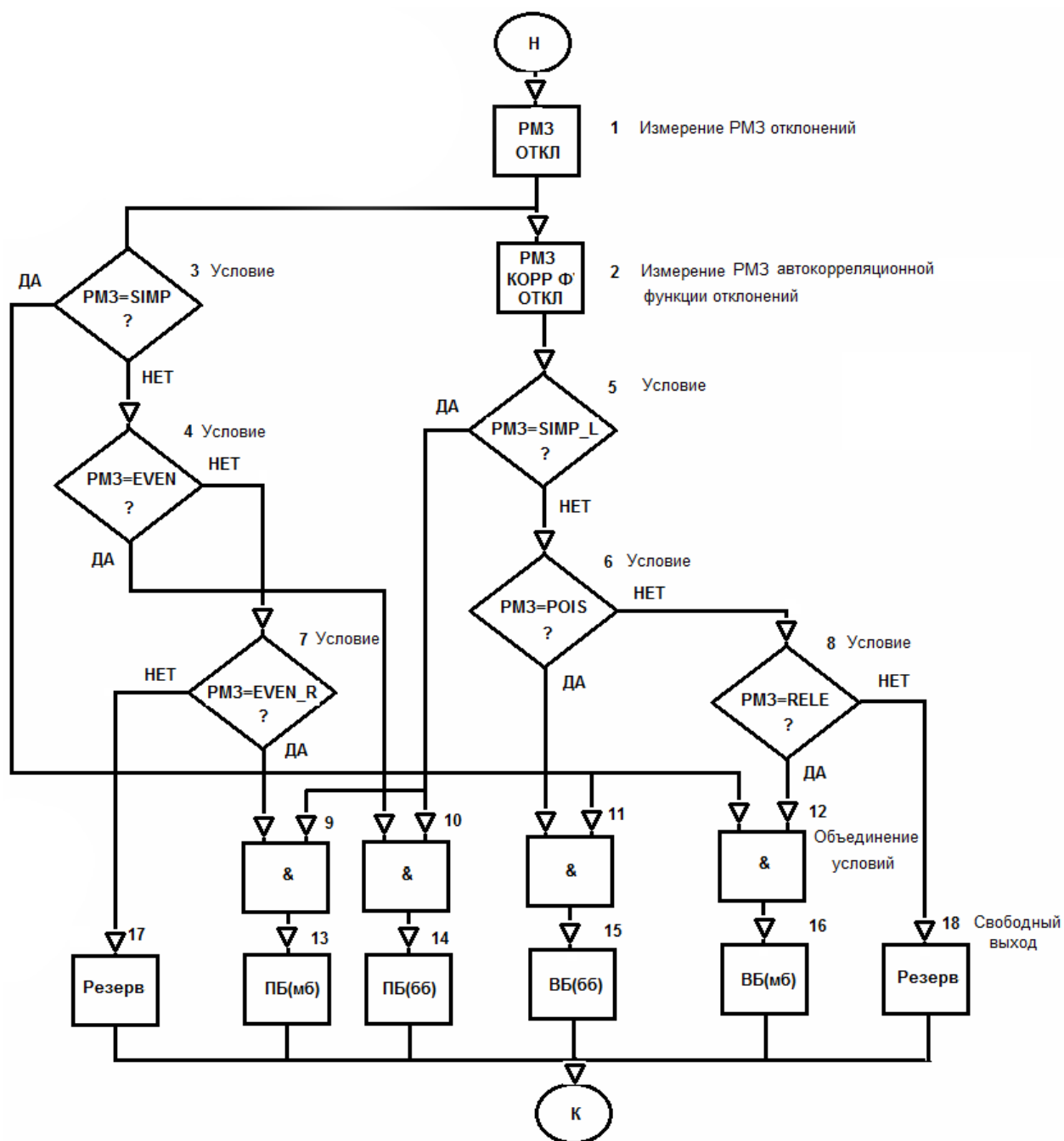
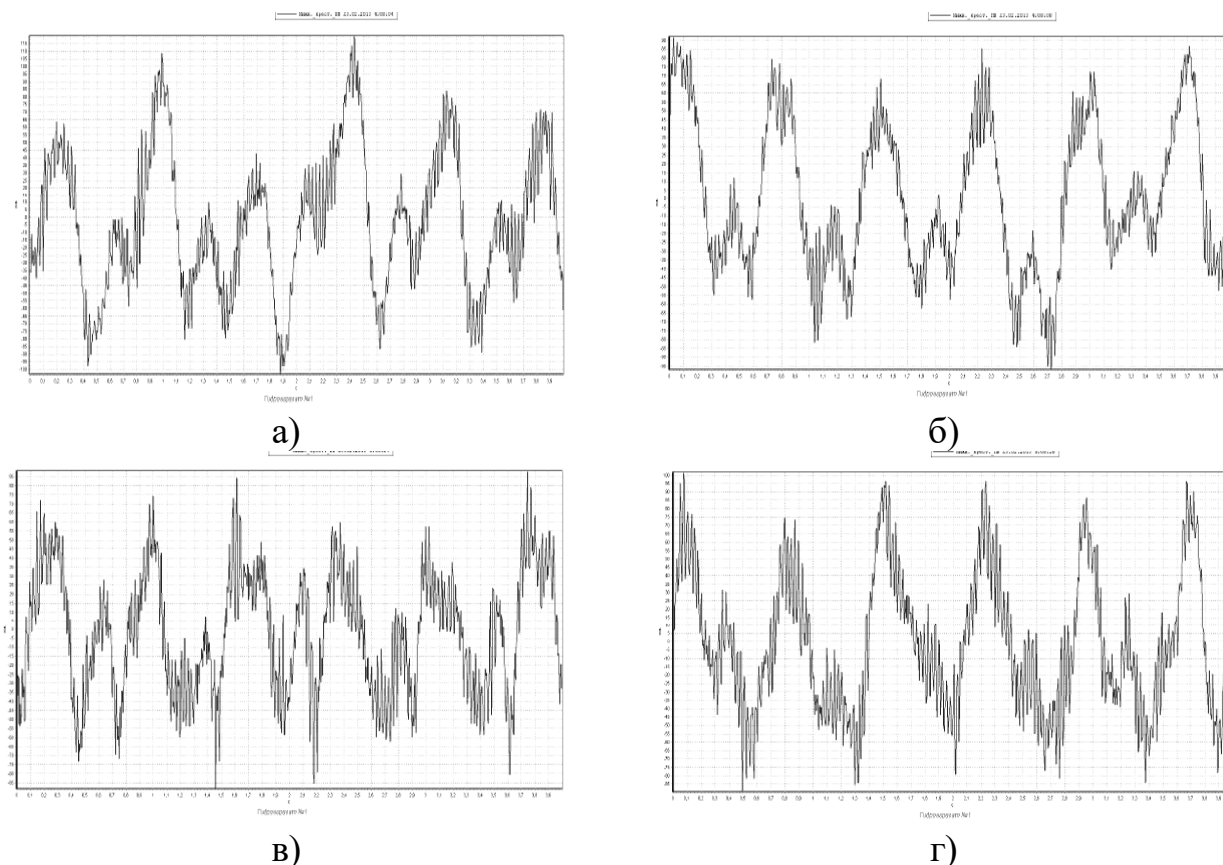


Рисунок 41 – Структурная схема алгоритма идентификации сигналов отклонений для объектов диагностики

### 3.2.3 Второй вариант технологических решений вибродиагностики гидроагрегата

Целью работы явилось исследование с применением инструментов ТИИС вибросигналов, представленных на рисунок 42, с датчиков биения вала в районе НГП – нижнего генераторного подшипника (уровень середины высоты гидроагрегата), и создание высокоэффективных методов распознавания и диагностики их состояния.



а) датчик №1 – верхний бьеф, малый бой; б) датчик №2 – правый берег, малый бой; в) датчик №1 – верхний бьеф, большой бой; б) датчик №2 – правый берег, большой бой

Рисунок 42 – Вибросигнал НГП

Бой вала контролируется в сечении подшипника двумя индукционными датчиками, расположенными под 90 градусов в плоскости, перпендикулярной валу. Датчик №1 располагается на стороне «Верхнего бьефа» - ВБ (место высокого уровня воды), датчик №2 устанавливается со стороны «Правого берега реки» - ПБ (место низкого уровня воды). Вибросигналы, представленные на

рисунке 42, соответствуют двум состояниям: при малом и большом боях (биениях) вала [33].

По результатам сортировки эталонных сигналов по отклонениям для каждого из входных сигналов были построены из имен эталонов классификационное дерево, представленное на рисунке 43.

Классификационное дерево не только визуализирует скрытые закономерности структуры связи между анализируемыми сигналами, но также позволяет оценить эти связи количественно – путем подсчета относительного числа совпадений имен эталонов, находящихся в одинаковой позиции сравниваемых ветвей дерева. Подобные оценки сведены в матрице связей между сигналами, помещенной в нижней части рисунка 43. В правой верхней части рисунка 43 изображено классификационное дерево, состоящее из корня (ROOT) и двух стволов. Связь корня и стволов показана двойной линией. Связи между именами эталонов (по вертикали) внутри стволов и ветвей показаны жирной линией. Связи между именами эталонов (по горизонтали) в соседних ветвях отображены пунктиром.

Первый (левый) ствол (имя начального эталона - kosh) имеет одну ветвь, заканчивающуюся номером #2 сигнала с именем prav\_bereg\_mal\_boy.txt. Вторым ствол содержит 3 ветви сигналов #3, #4, #1 (verh\_bief\_mal\_boy.txt, verh\_bief\_bol\_boy.txt, prav\_bereg\_bol\_boy.txt). В левой части рисунка 43 показаны эпюры сигналов и их гистограммы.

Таблица двумерной классификации (нижняя таблица рисунка 43) построена путем разбиения диапазонов измерения идентификационных параметров ( $65 < \%Reg < 85$ , и  $0 < \%Asym < 15$ ) на поддиапазоны. В соответствующих ячейках этой таблицы помещены имена анализируемых сигналов, взаимное расположение которых позволяет дать им качественную характеристику.



2 В соответствии с ТИИС, если сочетания идентификационных параметров анализируемого сигнала не приводят к оценке состояния, то требуется либо увеличить количество эталонов БД, либо увеличить размерность измерения идентификационных параметров введением дополнительных характеристик. Установлено, что для диагностики состояния гидроагрегата необходимо и достаточно измерять временную и вероятностную характеристики в структуре 17 глобальных эталонов сигнала.

3 Классификационное дерево визуализирует скрытые закономерности структуры связи между анализируемыми вибросигналами. Кроме того, установлено, что иерархическая классификация предоставляет дополнительные качественные данные – по структуре связей (вид дерева и порядок чередования имен эталонов в ветвях) и количественные данные – по силе связей между сигналами (матрица коэффициентов связи).

4 Рассмотренные идентификационные инструменты и методика их использования позволяют решать задачу распознавания и оценки состояний сложных гидроэнергетических объектов с автоматической выдачей пользователю лингвистических описаний в терминах, принятых экспертами данной предметной области. Перспектива дальнейших исследований связана с созданием программной части автоматизированной интеллектуальной системы технической диагностики.

### **3.3 Предварительная диагностика состояния сердечно-сосудистой системы человека**

Цель: Поиск возможности применения инструментов теории идентификационных измерений сигналов для решения задачи предварительной диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека на основании анализа электрокардиограмм.

Предложить методики, основанные на позиционном кодировании комплекса характеристик и кластерном группировании электрокардиографических сигналов в структуре глобальных эталонов, а так же использовании зависимости состояния сердечно-сосудистой системы с интегральными коэффициентами связи.

### 3.3.1 Аналитические исследования в области патологии сердечно-сосудистой системы

В современном обществе патологии сердечно-сосудистой системы (ССС) человека занимают лидирующие позиции по темпам роста, уровню распространенности, степени инвалидизации и смертности. Данный факт требует поиска новых эффективных методов автоматизированной оценки состояния ССС, способных осуществлять информационную поддержку диагностических решений врача в условиях все возрастающего объема физиологических данных, а в ряде случаев производить предварительную автоматическую диагностику.

Очевидно, что основой автоматизированных исследований ССС должен выступать метод, максимально апробированный в клинических условиях, обладающий наибольшей информативностью, доступный и недорогой в использовании. Таким методом на сегодняшний день является анализ электрокардиограммы (ЭКГ), представляющей собой запись наблюдаемых на поверхности тела проекций объемных электрических процессов, происходящих в сердце в виде электрокардиосигналов (ЭКС). ЭКГ несёт информацию как о текущем состоянии ССС, так и о патологических изменениях в самом сердце.

Структура и форма ЭКГ может изменяться под воздействием многочисленных факторов, связанных с функционированием ССС. Многообразие нормальных и аномальных изменений форм волн и структуры ЭКС стало причиной отсутствия на данный момент универсального метода анализа сигнала для его последующей классификации. Рассмотрим основные существующие методы.

Наиболее распространенным методом анализа ЭКГ является детерминистический. В основу алгоритмического обеспечения этого метода [34] положено детерминистическое описание кардиосигналов, формализующее тактику врача-кардиолога и моделирующее его деятельность. Врач-кардиолог при анализе ЭКГ использует методы структурного распознавания, выделяя при этом алгебраические и логические признаки структуры ЭКГ. При этом априорное описание классов содержит как алгебраические критерии, так и критерии, отражающие взаимосвязь (отношения) отдельных признаков. При этом в зависимости от результатов сравнения полученного решения с некоторыми установленными заранее границами, либо измеряется очередной признак ЭКГ, либо прекращается дальнейший анализ ЭКГ и формируется набор непротиворечивых заключений по ЭКГ.

Другим общепризнанным методом анализа ЭКГ является метод спектрального анализа [35]. Сущность метода заключается в использовании в качестве обобщенных диагностических признаков ЭКГ ее спектральных характеристик.

Несмотря на ряд преимуществ, частотный метод не нашел широкого применения при традиционных исследованиях и анализе ЭКГ, в виду трудностей связанных с идентификацией морфологических элементов по частотным спектрам. Однако развитие и широкое использование в последние годы холтеровских систем показало преимущества использования частотных методов при анализе длительных записей ЭКГ [36,37].

Следующий метод автоматизированного анализа ЭКГ основан на расчете коэффициента корреляции между обнаруженным морфологическим элементом ЭКГ [38]  $x(k)$  и его образцом  $y(k)$ . В качестве образца может выступать соответствующий морфологический элемент для заданного типа ЭКГ или его математическая модель.

Группа методов интеллектуальной обработки информации объединяет методы обучения и функционирования экспертных систем [39] и методы нейрокомпьютерных технологий [40].

В итоге, выбор определенного метода анализа ЭКС должен основываться, исходя из условия его рациональности и эффективности. Дать оценку результативности применения выбранного метода для решения конкретных диагностических задач может его предварительная апробация с использованием средств математического моделирования.

Известно, что ЭКГ сигнал является квазипериодическим и нестационарным. Он обладает высокой степенью изменчивости, зависящей от большого количества факторов (состояние сердца и сосудов, возраст, используемое исследовательское оборудование и т.д.). ЭКГ сигнал характеризуется малой амплитудой (до единиц мВ) и подвержен воздействию помех различной природы. К ним относится сетевая наводка; электромиографическая помеха; дрейф изоэлектрической линии вследствие дыхания; контактный шум электродов; собственные шумы электронных приборов и др.

В связи с этим, для распознавания ЭКГ с целью предварительной диагностики и выделения диагностически значимых признаков, необходимо построение высокоэффективных интеллектуальных систем, способных принимать верные решения в условиях специфичности получаемых данных. Таких систем, дающих однозначное решение указанной проблемы распознавания, при большом количестве существующих и разрабатываемых, на сегодняшний день не существует.

На пути поиска решения задачи автоматизированного распознавания ЭКГ на основе ТИИС возникла необходимость формирования развернутой базы анализируемых записей, удовлетворяющих следующим требованиям:

- набор исследуемых записей должен отражать многообразие форм сигналов с высокой степенью реалистичности;
- в состав набора записей должны входить редко наблюдаемые сигналы, но обладающие клинической значимостью;
- вошедшие в состав набора сигналы должны быть проаннотированы квалифицированными специалистами в области электрокардиографии.



Таким требованиям в большей мере соответствует база записей ЭКГ организации «PhysioNet» [41]. Среди баз записей ЭКГ «PhysioNet» в работе использовались:

1. MIT-BIH. База данных аритмий Массачусетского технологического института и больницы «Beth Israel» (The Massachusetts Institute of Technology - Beth Israel Hospital Arrhythmia Database).

2. AAMI-EC13: 10 коротких записей для тестирования различных устройств измерения частоты сердечных сокращений (ANSI/AAMI EC13 Test Waveforms);

3. PTB: База данных Национального института метрологии Германии, содержащая ЭКГ в норме и при патологиях (Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), the National Metrology Institute of Germany).

Указанные базы записей содержат оцифрованные ЭКГ, регистрируемые минимум с 12-ти отведений: трех стандартных, трех усиленных и шести грудных.

В работе авторы использовали данные от 12 отведений, так как в клинической электрокардиографии это количество электрокардиографических отведений получило наибольшее распространение. Электрокардиографические отклонения в каждом из этих отведений отражают суммарную электродвижущую силу всего сердца, т. е. являются результатом одновременного воздействия на данное отведение изменяющегося электрического потенциала в левых и правых отделах сердца, в передней и задней стенке желудочков, в верхушке и основании сердца и т. д.

Рассмотрим основные принципы получения сигнала ЭКГ для его последующего анализа.

С поверхности тела человека ЭКС снимают при помощи системы отведений. Под отведением понимают зону контакта биообъекта с электродом, ответственную за протекание биохимических процессов в измерительной цепи, электродное контактное вещество, собственно электрод и отводящие провода. Изменения разности потенциалов на поверхности тела, возникающие во время

работы сердца, записываются с помощью различных систем отведений ЭКГ. Каждое отведение регистрирует разность потенциалов, существующую между двумя определенными точками электрического поля сердца, в которых установлены электроды. Таким образом, различные электрокардиографические отведения отличаются между собой прежде всего участками тела, от которых отводится разность потенциалов.

Для получения приемлемых результатов исследования состояния сердечной деятельности необходима регистрация ЭКГ пациента с 12-ти отведений: трех стандартных, трех усиленных и шести грудных [36-40]. Менее полная картина заболевания вырисовывается при рассмотрении лечащим врачом снятых одновременно трех, четырех, шести и восьми отведений.

Стандартные двухполюсные отведения, предложенные в 1913 г. Эйнтховеном (Einthoven), фиксируют разность потенциалов между двумя точками электрического поля, удаленными от сердца и расположенными во фронтальной плоскости — на конечностях. Три двухполюсных отведения от конечностей образуются при следующем положении электродов:

- i: левая рука (+) и правая рука (–);
- ii: левая нога (+) и правая рука (–);
- iii: левая нога (+) и левая рука (–).

Соответствующие электроды помещают на левом и правом запястьях и над левой лодыжкой. Каждое из этих отведений записывает разность потенциалов между двумя соответствующими конечностями.

Усиленные однополюсные отведения от конечностей были предложены Гольдбергером (Goldberger) в 1942 г. Они регистрируют разность потенциалов между одной из конечностей, на которой установлен активный положительный электрод данного отведения (правая рука, левая рука или левая нога), и средним потенциалом двух других конечностей. Таким образом, в качестве отрицательного электрода в этих отведениях используют так называемый объединенный электрод Гольдбергера, который образуется при соединении

через дополнительное сопротивление двух конечностей. Три однополюсных отведения от конечностей образуются при следующем положении электродов:

avr: правая рука.(+) и СТg (-);

avl: левая рука (+) и СТg (-);

avf: левая нога (+) и СТg (-).

Обозначение усиленных отведений от конечностей происходит от первых букв английских слов: «a» - augmented (усиленный); «v» - voltage (потенциал); «r» - right (правый); «l» - left (левый); «f» - foot (нога), «СТg» - объединенный электрод Гольдбергера.

Грудные однополюсные отведения, предложенные Вильсоном (Wilson) в 1934 г., регистрируют разность потенциалов между активным положительным электродом, установленным в определенных точках на поверхности грудной клетки, и отрицательным объединенным электродом Вильсона. Последний образуется при соединении через дополнительные сопротивления трех конечностей (правой руки, левой руки и левой ноги), объединенный потенциал которых близок к нулю (около 0,2 мВ). Шесть грудных отведений образуются при следующем положении электродов:

v1: 4-й межреберный промежуток справа от грудины (+) и СТw (-);

v2: 4-й межреберный промежуток слева от грудины (+) и СТw (-);

v3: средняя линия между электродами v1 и v4 (+) и СТw (-);

v4: 5-й межреберный промежуток по среднеключичной линии (+) и СТw (-);

v5: передняя подмышечная линия на уровне электрода v4 (+) и СТw (-);

v6: средняя подмышечная линия на уровне электрода v4 (+) и СТw (-).

Здесь «v1» – «v6» - соответствующие грудные электроды, а «СТw» объединенный электрод Вильсона.

Однако большое многообразие и изменчивость формы ЭКГ потребовало дополнительной разработки модели сигнала, основанной на параметрическом описании ЭКГ и ее отдельных элементов. Применение данного подхода позволяет исключить из процесса моделирования данные о физиологии сердца и

сосредоточить внимание на синтезе ЭКГ необходимой формы и морфологии, что сократит число параметров модели и упростит используемый алгоритм.

В результате авторами разработана модель ЭКГ следующей структуры. Исходными данными для моделирования являются координаты характерных точек ЭКГ в виде матрицы  $A = (a_{ij})$ , представляющей собой набор амплитуд элементов ЭКГ (положение характерных точек относительно изоэлектрической линии), а так же матрицы  $D = (d_{ij})$ , определяющей положение характерных точек во времени. Здесь  $j = 1, 2, \dots, n$  – это порядковый номер соответствующей точки определенного морфологического элемента в кардиологическом комплексе, а  $i = 1, 2, \dots, m$  – номер отведения

Каждый элемент ЭКГ в зависимости от формы формируется из кусочно-заданных функций вида [42]:

$$w_{ij}(t) = \begin{cases} 0, t \in (-\infty; 0); \\ G_{ij} \cos \omega_{ij} t + C_{ij}, t \in [0; (d_{i(j+1)} - d_{ij})]; \\ 0, t \in [d_{i(j+1)}; +\infty). \end{cases} \quad (22)$$

В выражении (1)  $G_{ij} = (a_{ij} - a_{i(j+1)})/2$ ,  $C_{ij} = (a_{ij} + a_{i(j+1)})/2$ ,  $\omega_{ij} = 2\pi f_{ij}$ , где  $f_{ij} = 1/2(d_{i(j+1)} - d_{ij})$ .

В результате образуется набор функций со структурой (22). Их можно представить в виде матрицы  $w = (w_{ij})$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$ , а  $j = 1, 2, \dots, n - 1$ .

Тогда с учетом аддитивных помех и искажений, возникающих в процессе регистрации сигналов, модель ЭКГ может быть представлена в виде:

$$S_i(kT) = \sum_{r=1}^{N_{RR}} \sum_{j=1}^{n-1} w_{ij}(kT - d_{ij} - \tau_r) + \sum_l \varepsilon_l(kT), \quad (23)$$

где  $S_i(kT)$  – синтезированная ЭКГ в  $i$ -том отведении;  $N_{RR}$  – число сердечных сокращений;  $w_{ij}(kT)$  – функция дискретного времени вида (22);  $k = 1, 2, \dots, M$  – индекс отсчетов,  $T = 1/f_s$  – период дискретизации,  $f_s$  – частота дискретизации;  $d_{ij}$  –

соответствующий элемент матрицы  $D_{m \times n}$ ;  $\tau_r$  – модельный ряд значений, основанный на продолжительности R-R интервалов между последовательно зарегистрированными сердечными циклами, и определяющий момент появления очередного кардиокомплекса;  $\varepsilon_l(kT)$  – вид помехи.

Пример моделирования кардиокомплекса для  $i$ -ого отведения согласно выражению (23) при отсутствии помех и искажений изображен на рисунке 44.

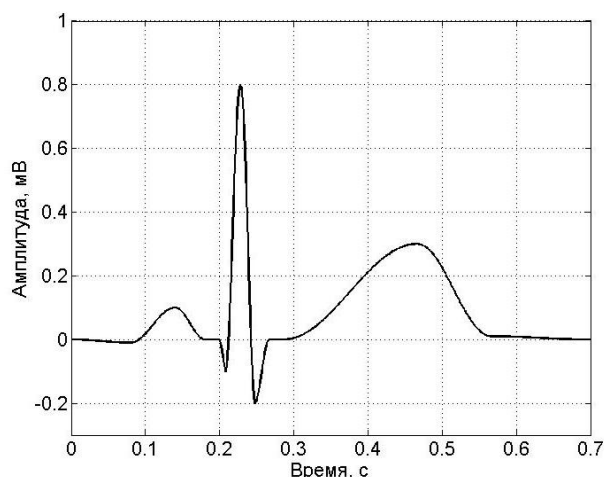


Рисунок 44 – Результат моделирования кардиологического комплекса в  $i$ -ом отведении

Подобная имитация ЭКГ способна сэкономить время и устранить трудности, сопутствующие инвазивным и неинвазивным методам регистрации реальных сигналов, предоставить возможность получения нормальной и патологической формы ЭКГ без использования электрокардиографа, получить морфологические элементы электрокардиограммы практически любой амплитуды и длительности.

Используя разработанную модель, авторы смогли дополнить базу анализированных сигналов синтетическими ЭКГ, лишенными воздействия всяческих внешних искажений и помех, а так же построить сигналы с сопутствующими помехами различной комбинации и степени интенсивности.

Таким образом, на первом этапе исследований авторы подготовили базу записей ЭКГ, удовлетворяющую задачам исследования и требованиям ТИИС, основные положения которой представлены в следующем разделе.

### 3.3.2 Методика и инструменты исследования

Структурная схема исследовательской системы (рис. 45) состоит из считывателя сигналов (SR), идентификационного анализатора сигналов (ISA), компаратора (C), базы данных эталонных сигналов (DBSS), табличного (TC) и иерархического классификаторов (HC), а также интерпретатора.

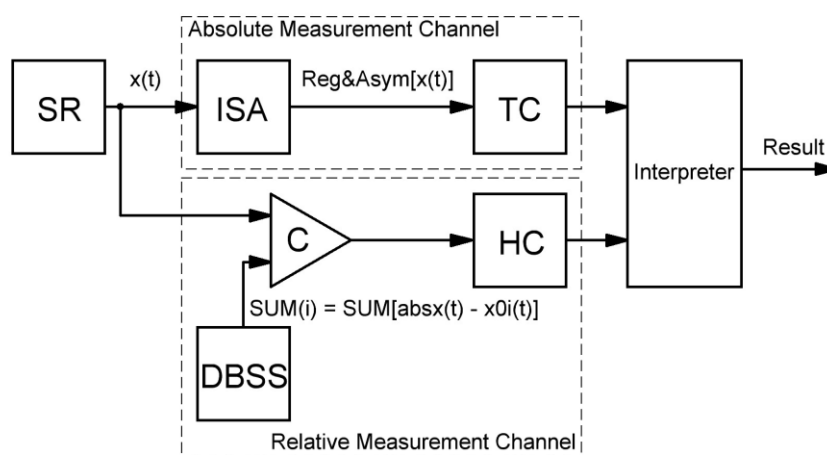


Рисунок 45 – Структурная схема исследовательской системы

С помощью SR производится чтение с диска реализаций ЭКГ. Исследуемые сигналы анализируются двумя каналами: абсолютных (AMC) и относительных (RMC) измерений. Блок ISA измеряет несколько интегральных идентификационных параметров сигналов, из которых в дальнейшем анализе используются два: степень регулярности (%Reg) и степень асимметрии (%Asym). Эти параметры служат для построения двумерной табличной классификации (блок TC).

Блоки компаратора C и DBSS служат для измерения отклонений входных сигналов от системы из 16 эталонных сигналов с известными распределениями мгновенных значений. Чтобы правильно оценить суммарное значение

отклонений, исследуемые и эталонные сигналы должны иметь одинаковое число отсчетов (одинаковые объемы выборок,  $N$ ). Блок НС производит сортировку эталонных сигналов по отклонениям для каждого из входных сигналов.

Структура программного кода исследовательской системы, выполненная в среде графического программирования NI LabVIEW [43], изображена на рис. 46. Данная структура формирует реляционную базу данных результатов измерений идентификационных параметров входных сигналов. Путем сортировки и фильтрации записей базы строятся (в среде MS EXCEL) линейная и древовидная классификации.

Система является интеллектуальным анализатором, поскольку содержит встроенную базу данных эталонов, которые представляют собой сортированные распределения мгновенных значений случайных сигналов и которые настраиваются на определенный объем исследуемой выборки входного сигнала. Интеллектуальная мощность системы и, соответственно, разрешающая способность иерархической классификации, зависит от количества используемых эталонов.

При проводимых исследованиях в базе данных хранились 16 эталонов, число которых можно увеличивать по мере роста требований к качеству распознавания. Для этого необходимо провести ряд технических мероприятий по модернизации программного обеспечения. Однако, и в таком виде, система позволяет решать многие задачи, связанные с количественной и качественной оценкой ЭКГ.

Приняты следующие обозначения распределения мгновенных значений использованных эталонов: 2mod – двумодальное; asin – арксинусное; bern-l – Бернулли, левое; bern-r – Бернулли, правое; binom – биномиальное; even – равномерное; exp-l – экспоненциальное, левое; exp-r – экспоненциальное, правое; gamm – гамма; gaus – нормальное; kosh – Коши; lapl – двустороннее экспоненциальное; pois – Пуассона; rele – Рэлея; simp – треугольное; trap – трапецидальное распределения [22].

Исследовательская система оперирует с записями ЭКГ, удовлетворяющим следующим условиям:

- 1) ЭКГ получена синхронно в 12 стандартных каналах с частотой дискретизации 1000 Гц, разрядностью АЦП 16 бит, коэффициентом усиления 2000;
- 2) ЭКГ сигнал подвергается предварительной фильтрации для устранения высокочастотных артефактов и смещения изоэлектрической линии, а так же центрировался.

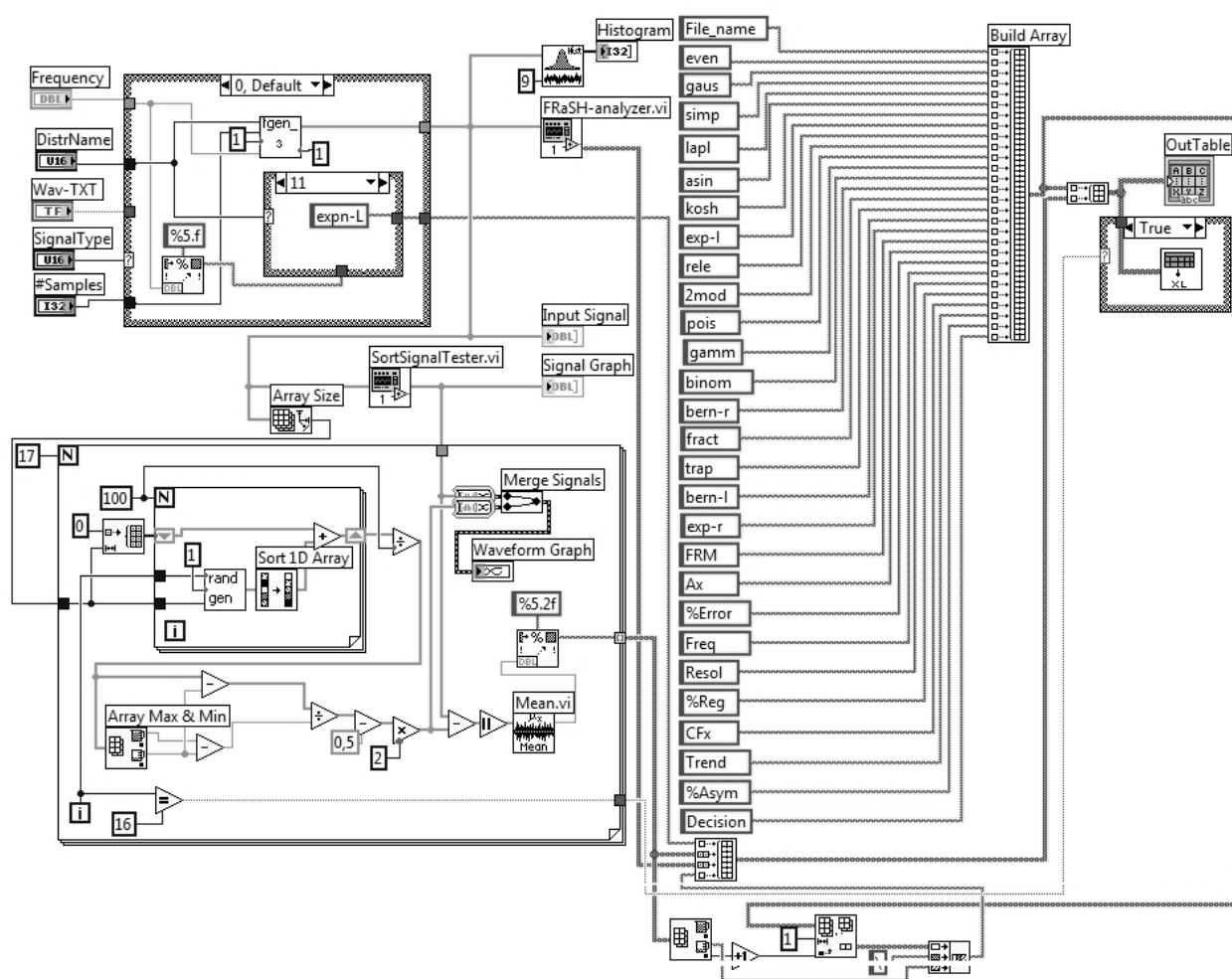


Рисунок 46 – Структура программного кода исследовательской системы

Пример записей ЭКГ представлен на рис. 47.

Основываясь на преимущественных возможностях инструментов ТИИС, авторами были разработаны и исследованы следующие методики



автоматизированного анализа и распознавания ЭКГ, имеющие наиболее общий характер.

### Методика № 1

В соответствие с этой методикой диагностические признаки формируются непосредственно из анализа численных оценок идентификационных параметров характеристик сигналов. Методика реализуется в 2 этапа.

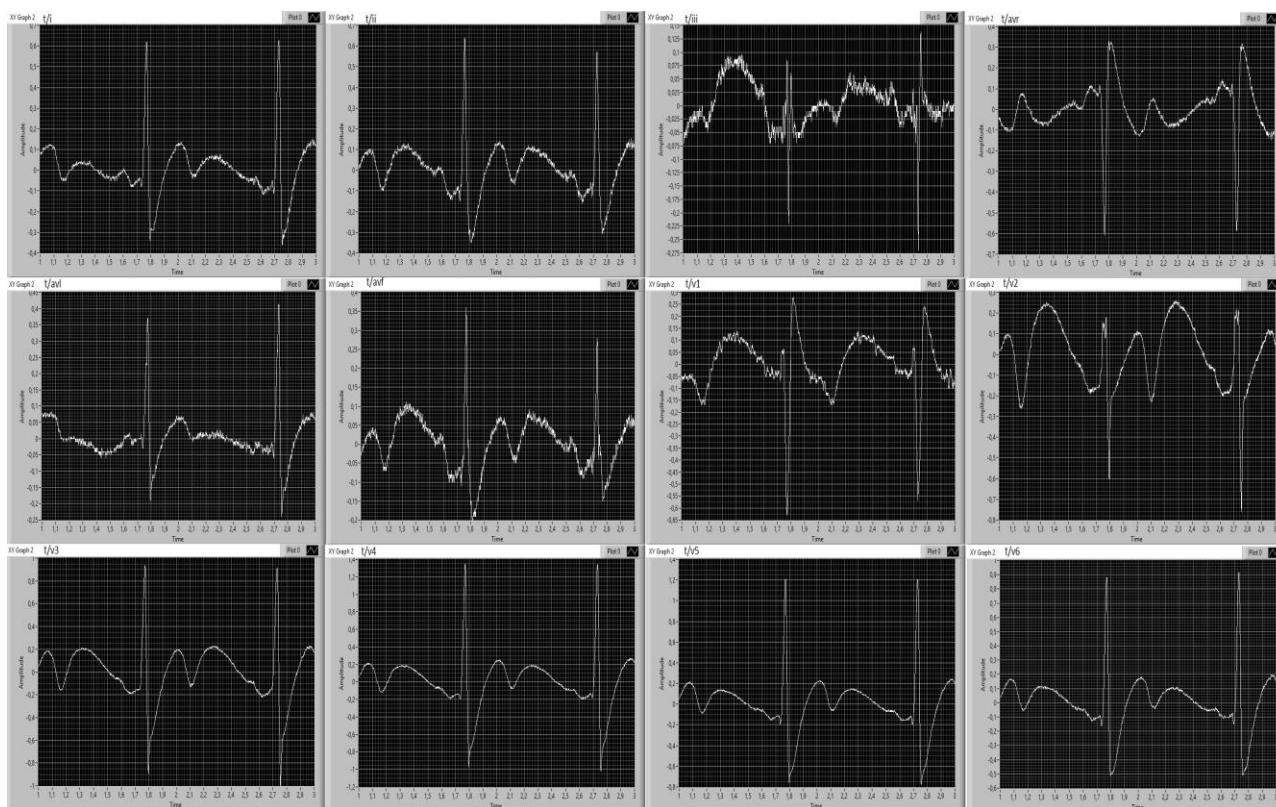


Рисунок 47 – ЭКГ мужчины в возрасте 51 года

На первом этапе проводятся идентификационные измерения эталонных сигналов (и их производных), характеризующих различные заболевания человека (этап обучения) с формированием параметров IdP: NF1, NF2 и K. Т.е. создается база данных (например, в среде MS EXCEL, таблица 19), объединяющая имена эталонных сигналов (FileName), наименования анализируемых характеристик (временная – Time, корреляционная – Corr, вероятностная – Histogram, спектральная – Spec), значения идентификационных

параметров формы сигналов (NF1) и формы приращений (NF2), определяемые выражением (6), а также вариабельности (K)

$$K = \frac{\overline{|\Delta X(t)|}}{\overline{|X(t)|}}, \quad (24)$$

где  $\overline{\Delta X(t)}$  – среднеарифметическое значение приращения сигнала. В графе Chart помещаются качественные характеристики – заболевания, назначенные экспертами.

Таблица 19 является реляционной базой данных. Путем введения опции «Автофильтр», можно сортировать записи базы, устанавливать интервалы анализа и, таким образом, обнаруживать скрытые закономерности в ее структуре.

На втором этапе (этапе измерения) анализируется входной сигнал с неизвестной качественной характеристикой. При этом измеряются те же идентификационные параметры (NF1, NF2, K), используя которые по записанному алгоритму определяется путь доступа к эталонному ЭКГ. Если конечной точкой этого пути служит один из вариантов качественных характеристик (Chart, таблица 19), то данная характеристика принимается за конечный результат анализа и устанавливается предварительный диагноз. Именно здесь оказывается полезным использование синтезированных ЭКГ (23), свойственных тому или иному заболеванию в качестве эталонного образца.

Таблица 19 – База данных идентификационных параметров ЭКГ при заболевании инфаркт миокарда

№	IdP	File Name	Time	Corr	Hist	Spec	Chart
1	NF1	avf	35	56	6	371	Myocardial infarction, Male_51
		avl	90	93	8	298	
		avr	61	100	8	230	
		i	64	104	6	256	
		ii	53	86	8	183	
		iii	63	42	7	454	
		v1	52	91	6	560	
		v2	33	48	7	353	
		v3	65	85	8	216	
		v4	66	94	7	219	
		v5	64	99	9	195	
		v6	57	94	9	186	
	NF2	avf	167	131	9	2089	
		avl	214	219	10	1290	
		avr	133	239	11	425	
		i	168	241	13	759	
		ii	165	217	8	663	
		iii	192	146	11	2801	
		v1	111	228	12	1343	
		v2	174	105	9	1503	
		v3	127	239	8	581	
		v4	129	260	14	577	
		v5	137	259	12	503	
		v6	136	251	9	490	
	K	avf	0,06	0,01	0,68	0,49	
		avl	0,07	0,02	0,97	0,56	
		avr	0,06	0,03	0,92	0,62	
		i	0,06	0,03	0,78	0,64	
		ii	0,06	0,02	0,78	0,57	
		iii	0,07	0,01	0,81	0,37	
		v1	0,06	0,03	0,70	0,68	
		v2	0,04	0,01	0,52	0,57	
		v3	0,04	0,03	0,89	0,63	
		v4	0,04	0,03	0,82	0,62	
		v5	0,04	0,03	1,06	0,62	
		v6	0,04	0,03	0,96	0,61	

Для исключения возможных ошибок, полученный результат всегда согласовывается с мнением экспертов – практикующих врачей-кардиологов. Если же сочетание идентификационных параметров анализируемого сигнала не приводят к одному из выходов алгоритма фильтрации, то требуется либо увеличить количество эталонов базы данных, либо увеличить размерность измерения идентификационных параметров введением дополнительных характеристик (например, ввести измерение вейвлетных функций [44]).

Используя данную методику можно заключить, что отдельное заболевание ССС по каждому отведению можно представить в виде цифрового кода PC:

$$PC = \{PC1, PC2, PC3, PC4\},$$

где

$$PC1 = \{NF1_{Time}, NF2_{Time}, K_{Time}\};$$

$$PC2 = \{NF1_{Corr}, NF2_{Corr}, K_{Corr}\};$$

$$PC3 = \{NF1_{Hist}, NF2_{Hist}, K_{Hist}\};$$

$$PC4 = \{NF1_{Spec}, NF2_{Spec}, K_{Spec}\}.$$

Индексы Time, Corr, Hist, Spec в соответствии с табл. 19 указывают на принадлежность идентификационных параметров соответствующей характеристике сигнала ЭКГ.

Цифровое кодирование позволяет синтезировать алгоритм предварительной диагностики заболеваний ССС по точечным оценкам идентификационных параметров характеристик ЭКГ.

## *Методика № 2*

Данная методика формирует алгоритм непосредственного сравнения эталонных сигналов с анализируемым по значениям отсчетов и интервальным значениям идентификационных параметров. В этом случае количество отсчетов в сравниваемых сигналах должно быть одинаковым.

Важным достоинством данной методики является то, что в качестве эталонных могут быть использованы любые сигналы, не обязательно принадлежащие к предметной области исследований. Так, например, в таблице

20 представлены результаты сравнения исследуемых ЭКГ, характерных для заболевания Myocardial infarction (Male\_51) с набором из 16 случайных сигналов – эталонов, имеющих разные распределения мгновенных значений, в краткой форме указанные в имени распределения.

Таблица 20 – Результаты сравнения ЭКГ, характерных для заболевания Myocardial infarction (Male\_51), с эталонными сигналами

Etalons	Name											
	avf	avl	avr	iii	ii	i	v6	v5	v4	v3	v2	v1
2mod	70	84	82	78	78	84	81	83	83	81	70	79
asin	38	49	50	48	46	52	49	50	49	46	44	51
bern-l	66	84	96	69	70	72	74	76	78	82	92	97
bern-r	84	87	72	94	92	98	92	93	90	84	57	66
binom	40	40	50	49	47	52	47	47	44	38	49	54
even	28	36	39	37	35	41	36	37	36	33	39	42
exp-l	52	74	100	48	46	46	50	52	58	70	103	102
exp-r	96	75	42	103	104	105	98	97	90	78	34	36
gamm	40	62	94	35	34	34	37	40	46	58	102	99
gaus	23	10	33	27	29	29	25	25	18	8	39	38
kosh	53	50	70	54	35	69	40	22	20	18	100	33
lapl	24	3	31	29	31	31	27	25	19	6	36	38
pois	43	65	98	38	37	36	41	43	49	61	106	100
rele	15	38	71	13	14	14	18	19	24	34	78	75
simp	23	20	32	29	29	31	26	26	22	17	39	37
trap	23	25	33	30	29	33	29	29	26	23	39	37
Fx	43	24	25	34	31	23	19	16	16	17	31	31
Ax	14	27	24	20	19	26	23	25	25	22,9	14	20,5

В табл. 20 отклонения ЭКГ и эталонов указаны в %; символами Fx (Гц) и Ax (рад) обозначены, соответственно, характеристическая частота и параметр формы сигналов.

На базе данной методики могут быть построены различные алгоритмы сравнения исследуемых ЭКГ уже между собой. Так, например, один из вариантов анализа (таблица 21) использует закономерности кластерного группирования исследуемых сигналов, характерных для состояний ССС.

Таблица 21 – Вариант анализа ЭКГ на основе закономерностей кластерного группирования

Имя кластера	№ п/п	Etalons	Состав кластера
Myocardial infarction, Male_51	1	rele	avf/ $\delta$ =15%; iii/ $\delta$ =13%; ii/ $\delta$ =14%; i/ $\delta$ =14%; v6/ $\delta$ =18%; v5/ $\delta$ =19%
	2	lapl	avl/ $\delta$ =3%; avr/ $\delta$ =31%; v3/ $\delta$ =6%
	3	gaus	v4/ $\delta$ =18%
	4	exp-r	v2/ $\delta$ =34%
	5	kosh	v1/ $\delta$ =33%
Healthy control, Male_55	1	rele	avl/ $\delta$ =13%;%; i/ $\delta$ =14%; v5/ $\delta$ =20%; v6/ $\delta$ =17%
	2	lapl	avf/ $\delta$ =30%; avr/ $\delta$ =9%; v4/ $\delta$ =12%; v1/ $\delta$ =30%; ii/ $\delta$ =19%
	3	exp-r	iii/ $\delta$ =19%; v2/ $\delta$ =27%; v3/ $\delta$ =30%
Cardiomyopathy, Male_57	1	lapl	avf/ $\delta$ =3%; avl/ $\delta$ =10%; i/ $\delta$ =6%; ii/ $\delta$ =5%; iii/ $\delta$ =9%; v1/ $\delta$ =7%; v4/ $\delta$ =21%
	2	gaus	avr/ $\delta$ =9%; v6/ $\delta$ =14%
	4	kosh	v5/ $\delta$ =14%; v3/ $\delta$ =19%; v2/ $\delta$ =30%
Myocardial infarction, Female_58	1	rele	avf/ $\delta$ =14%; iii/ $\delta$ =9%; ii/ $\delta$ =16%;
	2	lapl	v3/ $\delta$ =8%; v5/ $\delta$ =9%; i/ $\delta$ =11%; v4/ $\delta$ =10%;
	3	gaus	avl/ $\delta$ =7%; v6/ $\delta$ =18%
	4	kosh	avr/ $\delta$ =23%; v2/ $\delta$ =23%; v1/ $\delta$ =33%;
Healthy control, Female_52	1	rele	avf/ $\delta$ =12%; ii/ $\delta$ =15%; iii/ $\delta$ =11%1
	2	lapl	i/ $\delta$ =17%; v3/ $\delta$ =8%; v4/ $\delta$ =6%; v6/ $\delta$ =12%
	3	gaus	avr/ $\delta$ =20%; v1/ $\delta$ =19%
	4	exp-r	avl/ $\delta$ =26%
	5	kosh	V5/ $\delta$ =18%; v2/ $\delta$ =18%
Cardiomyopathy, Female_64	1	gaus	avr/ $\delta$ =9%; v5/ $\delta$ =6%; v6/ $\delta$ =8%; v1/ $\delta$ =18%; v4/ $\delta$ =27%
	2	simp	avf/ $\delta$ =18%; avl/ $\delta$ =17%; i/ $\delta$ =12%; ii/ $\delta$ =18%; iii/ $\delta$ =18%; v3/ $\delta$ =33%; v2/ $\delta$ =32%

Из таблицы 21 следует, что состояния ССС однозначно могут представляться в виде сгруппированных кластеров ЭКГ в структуре глобальных эталонов - сигналов с заданными распределениями мгновенных значений.

Кластеры могут быть представлены, например, в виде лингвистического кода  $LC = \{LC1, \dots, LCI, \dots, LC12\}$ , где  $LCI$  – лингвистическая характеристика эталонного распределения, близкого к исследуемой ЭКГ одного из двенадцати отведений кардиографа. В частности, для заболевания Myocardial infarction (Male\_51) в соответствии с табл. 3 лингвистический код будет иметь следующий вид:  $LC = \{rele/15, lapl/3, lapl/31, rele/13, rele/14, rele/14, rele/18, rele/19, gaus/18, lapl/6, exp-r/34, kosh/33\}$ .

Особенностью данного подхода является то, что для описания кластера потребовалось небольшое количество эталонов, в частности для рассматриваемых заболеваний - пять: rele, lapl, gaus, exp-r, simp.

Данный подход позволяет предложить алгоритм диагностики, основанный на формировании кластера ЭКГ исследуемых сигналов и сравнении со сгруппированными кластерами ЭКГ известных состояний ССС. В качестве сравнительных признаков используются: число эталонов в кластере, соответствие ЭКГ канала эталону, численные значения отклонений.

### *Методика № 3*

Другой вариант анализа состоит в том, чтобы сравнить исследуемые ЭКГ по спискам эталонов, упорядоченных по отклонению.

Рассмотрим представленные в таблице 24 упорядоченные по отклонению списки имен эталонов исследуемых ЭКГ, характерных для заболевания Myocardial infarction (Male\_51).

Таблица 24 – Упорядоченные по отклонению списки имен эталонов исследуемых ЭКГ для заболевания Myocardial infarction, Male\_51

№	avf	avl	avr	iii	ii	i	v6	v5	v4	v3	v2	v1
1	rele	lapl	lapl	rele	rele	rele	rele	rele	gaus	lapl	exp-r	kosh
2	gaus	gaus	simp	gaus	gaus	gaus	gaus	kosh	lapl	gaus	lapl	exp-r
3	simp	simp	gaus	simp	simp	simp	simp	gaus	kosh	simp	even	simp
4	trap	trap	trap	lapl	trap	lapl	lapl	lapl	simp	kosh	gaus	trap
5	lapl	even	even	trap	lapl	trap	trap	simp	rele	trap	simp	gaus
6	even	rele	exp-r	gamm	gamm	gamm	even	trap	trap	even	trap	lapl
7	asin	binom	asin	even	even	pois	gamm	even	even	rele	asin	even
8	binom	asin	binom	pois	kosh	even	kosh	gamm	binom	binom	binom	asin
9	gamm	kosh	kosh	asin	pois	exp-l	pois	pois	gamm	asin	bern-r	binom
10	pois	gamm	rele	exp-l	asin	asin	binom	binom	asin	gamm	2mod	bern-r
11	exp-l	pois	bern-r	binom	exp-l	binom	asin	asin	pois	pois	rele	rele
12	kosh	exp-l	2mod	kosh	binom	kosh	exp-l	exp-l	exp-l	exp-l	bern-l	2mod
13	bern-l	exp-r	gamm	bern-l	bern-l	bern-l	bern-l	bern-l	bern-l	exp-r	gamm	bern-l
14	2mod	2mod	bern-l	2mod	2mod	2mod	2mod	2mod	2mod	2mod	pois	gamm
15	bern-r	bern-l	pois	bern-r	bern-r	bern-r	bern-r	bern-r	bern-r	bern-l	exp-l	pois
16	exp-r	bern-r	exp-l	exp-r	exp-r	exp-r	exp-r	exp-r	exp-r	bern-r	kosh	exp-l

Упорядочивание по отклонению имен эталонов, позволяет оценить силу связи между исследуемыми сигналами в форме симметричной матрицы, коэффициенты которой представляют собой относительное число совпадений имен эталонов, находящихся в одинаковых позициях в списках. Значения коэффициентов связи, в виде матрицы, для упорядоченного списка имен эталонов ЭКГ для заболевания Myocardial infarction (Male\_51) представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Матрица коэффициентов связи между исследуемыми ЭКГ для заболевания Myocardial infarction (Male\_51)

№	avf	avl	avr	iii	ii	i	v6	v5	v4	v3	v2	v1
avf	1	0,25	0,1875	0,5	0,625	0,5	0,5	0,3125	0,375	0,375	0,125	0,1875
avl	0,25	1	0,25	0,1875	0,25	0,1875	0,25	0,125	0,1875	0,625	0	0,1875
avr	0,1875	0,25	1	0	0,0625	0	0	0,0625	0,0625	0,125	0,1875	0,25
iii	0,5	0,1875	0	1	0,5625	0,75	0,5625	0,375	0,3125	0,3125	0	0,1875
ii	0,625	0,25	0,0625	0,5625	1	0,5625	0,5625	0,4375	0,375	0,1875	0	0,25
i	0,5	0,1875	0	0,75	0,5625	1	0,5625	0,375	0,3125	0,25	0	0,125
v6	0,5	0,25	0	0,5625	0,5625	0,5625	1	0,625	0,3125	0,375	0	0,125
v5	0,3125	0,125	0,0625	0,375	0,4375	0,375	0,625	1	0,4375	0,125	0,125	0,125
v4	0,375	0,1875	0,0625	0,3125	0,375	0,3125	0,3125	0,4375	1	0,25	0,1875	0,125
v3	0,375	0,625	0,125	0,3125	0,1875	0,25	0,375	0,125	0,25	1	0,0625	0,0625
v2	0,125	0	0,1875	0	0	0	0	0,125	0,1875	0,0625	1	0,0625
v1	0,1875	0,1875	0,25	0,1875	0,25	0,125	0,125	0,125	0,125	0,0625	0,0625	1
Σ	4,9375	3,5	1,9375	4,75	4,875	4,625	4,75	4,125	3,9375	3,75	1,75	2,6875



В таблице 26 в нижней строке представлены значения сумм коэффициентов связи по каждому отведению, при суммировании которых получается значение интегрального коэффициента ( $M$ ) связи ЭКГ для 12 каналов. Для заболевания Myocardial infarction (Male\_51)  $M = 45,625$ .

Аналогичным путем с применением идентификационных измерений были определены значения интегральных коэффициентов для вышеупомянутых состояний ССС (таблица 27).

Таблица 27 – Значения интегральных коэффициентов

Заболевания ССС	Healthy control, Female_52	Healthy control, Male_55	Myocardial infarction, Female_58	Myocardial infarction, Male_51	Cardiomyopathy, Female_64	Cardiomyopathy, Male_57
	1	2	3	4	5	6
Интегральный коэффициент связи	35,5	36,625	37,75	45,625	46,5	50,25

Представленная в таблице 27 матрица, позволяет синтезировать алгоритм диагностики состояния ССС. В его основу ложатся процедуры сравнения и интерполяции полученного в результате идентификационных измерений интегрального коэффициента связи ЭКГ для 12 отведений с классифицированными сигналами.

Информативность матрицы будет повышаться не только за счет добавления информации о других состояниях ССС, но и за счет работы с ней эксперта-кардиолога.

### *Выводы по результатам исследований*

В ходе поиска решения задачи автоматизированной диагностики состояния ССС человека по записям ЭКГ авторами реализована исследовательская система, позволяющая работать с экспериментальными данными в среде программирования NI LabVIEW, осуществлять их предварительную обработку в соответствии с требованиями ТИИС.

Анализ полученных в ходе проводимых исследований результатов свидетельствует о следующем. Полученные с применением исследовательской системы и идеализированные ЭКГ являются квазипериодическими и нестационарными сигналами, а их идентификационные измерения показывают большой разброс идентификационных параметров даже в рамках отдельных заболеваний или в пределах нормы. Применение ТИИС дает возможность систематизации сигналов, позволившее предложить методики идентификационных измерений и анализа форм ЭКГ и алгоритмы предварительной диагностики состояния ССС.

Особенностями первой методики является одновременный анализ и позиционное кодирование временных, спектральных, корреляционных и вероятностных характеристик ЭКГ сигнала, т.е. учет в базе данных диагностических значимых признаков, проявляющихся при различных вариантах анализа.

Вторая методика позволяет предложить алгоритм диагностики, основанный на формировании кластера исследуемых сигналов и сравнении их с сгруппированными кластерами ЭКГ состояний ССС в структуре глобальных эталонов - сигналов с заданными распределениями мгновенных значений.

Особенностью третьей методики является определение зависимости состояния ССС от интегральных коэффициентов для 12 отведений ЭКГ, определенных с применением ТИИС и упорядоченных по отклонению списков имен эталонов.

Предполагается, что при накоплении достаточного количества в базе данных идентификационных параметров ЭКГ появится больше возможностей для отыскания скрытых закономерностей в структуре классификационных признаков диагностируемых заболеваний.

Таким образом, в условиях многообразия технического оборудования, применяемого в области кардиологических исследований, а также при возрастающем объеме диагностической информации, для предварительной диагностики состояния ССС человека предлагается реализовывать

электрокардиографы в виде экспертных систем с развернутой базой данных кодов, кластеров и интегральных коэффициентов связи ЭКГ, полученных на основе идентификационных измерений.

## Заключение

В результате проведенных исследований были предложены инновационные технологии создания компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов, актуальные и востребованные в таких областях, как неразрушающий контроль и диагностика, автоматизация и управления, биомедицинские технические системы и энергетика.

Особенностью предложенных приборов является их создание по принципу модульной архитектуры первичных преобразователей на базе компьютерной платформы CompactRIO с возможностью реконфигурирования системы. Данный подход дает возможность гибкой настройки параметров системы для широкого круга решаемых задач. Программное обеспечение - сложный комплекс виртуальных приборов с возможностями интеллектуальной обработки периодических и случайных сигналов, построенных на основе применения объектно-ориентированного языка LabVIEW и предоставляющих возможность быстрого создания графического пользовательского интерфейса управления системой и данными.

Авторами создана универсальная исследовательская система, включающая инструменты и методы ТИИС и позволяющая решать широкий круг задач измерения, оценки состояния, диагностики, управления. Система позволяет решать задачу распознавания и оценки состояний сложных объектов с автоматической выдачей пользователю лингвистических описаний в терминах, принятых экспертами данной предметной области.

Дальнейшее применение инновационных технологий NI в перспективе существенно повысит возможности исследовательской системы: удаленный доступ, беспроводные технологии передачи информации, высокоскоростной сбор информации с большого количества датчиков, широкий диапазон параметров исследуемых сигналов.

Рассмотрено применение ТИИС для оценки состояния топливного элемента по электрическим шумовым сигналам, содержащим стационарные и

нестационарные составляющие. Установлено, что методики количественных и качественных измерений формы сигналов, как физической величины, в структуре глобальных эталонов позволяют адекватно идентифицировать и оценивать качество режимов работы топливного элемента.

Для шумовых сигналов топливного элемента, содержащих диагностические признаки и имеющих сложную временную, амплитудную и топологическую структуры предложено использовать алгоритмы оценки таких свойств сигналов как регулярность-хаотичность и трендовость-колебательность.

Предложены технологии оценки состояния и диагностики узлов гидроагрегата одной из ГЭС Сибирского региона на основе идентификационных измерений распределений мгновенных значений временных и автокорреляционных характеристик вибросигналов, содержащих стационарные и нестационарные составляющие. С применением предложенных технологий возможно разделение объектов диагностики на 4 класса, т.е. представить в виде идентификационной шкалы или идентификационной таблицы. На их основе был сформирован алгоритм автоматической классификации вибросигналов объектов диагностики, в структуре которого учтены обстоятельства применения лингвистических термов и выделения дополнительных ситуаций. Перспектива дальнейших исследований связана с расширением номенклатуры контролируемых узлов гидроагрегата с увеличением количества эталонов БД, и размерность измерения идентификационных параметров введением дополнительных характеристик.

Авторами предлагается использовать классификационные деревья для визуализации скрытых закономерностей структур связи между анализируемыми диагностическими сигналами: качественные данные – структура связей, а количественные данные – сила (коэффициенты) связей.

Проведены исследования по предварительной диагностике пациентов с кардиологическими патологиями. С применением исследовательской системы были получены образы ЭКС в среде LabVIEW для 6 групп пациентов без паталогий и с выявленными заболеваниями. Особенности полученных

кардиограмм являются фрагментарное изображение 2-х кардиокомплексов с измененным масштабом вдоль изоэлектрической линии для возможности проводить их интеллектуальную обработку.

В результате исследований с применением программного обеспечения исследовательской системы были получены лингвистические коды *LC* ЭКС, свойственные для вышеуказанным заболеваниям. Их анализ свидетельствует о большом разнообразии форм даже в рамках отдельных заболеваний, что подтверждает несовершенство традиционных методов распознавания ЭКС для автоматизированной предварительной диагностики.

Создание эффективных кардиографов с автоматизированной предварительной диагностикой связано с созданием экспертных систем с развернутой базой данных эталонов кардиосигналов в виде закодированной информации на основе идентификационных измерений. В данном случае, алгоритм постановки предварительного диагноза будет основан на поразрядном сравнении кодов характеристик исследуемого сигнала с эталонными кодами ЭКС.

Авторами проекта была разработана математическая модель ЭКС, на которой была поробованна применимость кодирования кардиосигналов на основе ТИИС.

Последующие исследования по созданию интеллектуальных электрокардиографов с предварительной диагностикой патологий на основе ТИИС имеют перспективу и связаны со сбором данных с помощью исследовательской системы кардиосигналов, наращивания базы данных позиционными и лингвистическими кодами при различных патологиях и комбинациях для различных возрастных групп.

## Список использованных источников

- 1 Кликушин Ю.Н., Кошеков К.Т. Теоретические основы идентификационных измерений и преобразований сигналов // Монография. – Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 171 с.
- 2 ГОСТ Р 8.596-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
- 3 Тесленко В.А. Датчики в системах сбора данных и управления// Журнал «ПиКАД» №2, 2004 г.
- 4 К. Клаассен Основы измерений. Датчики и электронные приборы: Учебное пособие/К. Клаассен, 3-е изд. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008 – 352 с.
- 5 А. Гарманов Принципы обеспечения совместимости измерительных приборов// Журнал «Современные технологии автоматизации» № 1, 4, 2004 г.
- 6 Батоврин Б.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В. Автоматизация измерений и испытаний. Учебное пособие – М.: Можайский полиграфический комбинат, 2011 г. – 128с.
- 7 Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. – СПб.: Корона принт; М.: «Альекс-А», 2003. – 224 с.
- 8 Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додека XXI», 2005. – 528 с.
- 9 Кошеков К.Т. и др. Промежуточный отчет по теме «Разработка компьютерных приборов и программно-аппаратных комплексов на основе теории идентификационных измерений и преобразований информационных сигналов и процессов для решения задач измерения, контроля, диагностики, испытаний и управления». – Петропавловск: СКГУ им. М.Козыбаева, 2012. - 165 с.

10 Ward, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. – 1963. – Vol. 58, № 236.

11 Кликушин Ю.Н., Кошеков К.Т. Классификатор сигналов.// Интернет издание «Журнал Радиоэлектроники». - М.: Изд-во ИПЭ РАН, № 10 (октябрь), 2010. <http://jre.cplire.ru>

12 Barbir F. PEM Fuel Cells. Theory and Practice, – Elsever, 2005, 443 p.

13 Kadjo J.-J.A., Evdokimov Yu.K., Grigoriev S.A., Fateev V.N. et al. PEM FUEL CELL study by multidisciplinary approach // Minsk International Colloquium on Physics of Shock Waves, Combustion, Detonation and Non-Equilibrium Processes, MIC 2005, Minsk, 12 – 17 Nov. 2005, pp. 40-41.

14 Bograchev D., Martemianov S. Thermo-electrical instabilities arising in protonexchange membrane of fuel cell // Int. J. Heat Mass Transfer, 2011, V.54, Issue 11, 1, pp.4965-4971.

15 Евдокимов Ю.К., Денисов Е.С., Мартемьянов С.А. Электрический шум водородного топливного элемента и исследование его диагностических свойств //Нелинейный мир. 2009. Т.7, №9, С.706-713.

16 Евдокимов Ю.К., Денисов Д.С. Построение систем контроля и диагностики водородного топливного элемента на основе наблюдения его электрических флуктуаций и шумов // Вестник Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева. № 1(61), 2011, С.47-54.

17 Vitor V. Lopes, Carmen M. Rangel, Augusto Q. Novais. Modelling and identification of the dominant phenomena in hydrogen fuel-cells by the application of DRT Analysis // Computer Aided Chemical Engineering, Volume 32, 2013, Pages 283-288.

18 Денисов Е.С. Нелинейная и линейная электрические модели водородного топливного элемента и идентификация его параметров // Нелинейный мир, 2008, т.6, №8, с. 483-488.

19 S. Giurgea, R. Tirnovan, D. Hissel, R. Outbib. An analysis of fluidic voltage statistical correlation for a diagnosis of PEM fuel cell flooding //



International Journal of Hydrogen Energy, Volume 38, Issue 11, 15 April 2013, Pages 4689-4696.

20 Kanevskii L.S., Grafov B.M., Astaf'ev M.G. Dynamics of electrochemical noise of the lithium electrode in aprotic organic electrolytes // Russian Journal of Electrochemistry, 2005, v. 41, №10, pp. 1226-1233.

21 Liu L. Pitting mechanism on an austenite stainless steel nanocrystalline coating investigate by electrochemical noise and in-situ AFM analysis // Electrochimica Acta, 2008, v. 54, №2, pp. 768-780.

22 Martinet S., Durand R., Ozil P. et al. Application of electrochemical noise analysis to the study of batteries: state-of-charge determination and overcharge detection // Journal of power sources, 1999, v. 83, №1-2, pp. 93-99.

23 F. Sergi, G. Brunaccini, A. Stassi, A. Di Blasi, G. Dispenza, A.S. Aricò, M. Ferraro, V. Antonucci. PEM fuel cells analysis for grid connected applications // International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 17, August 2011, Pages 10908-10916.

24 K. Pukėnas. Nonlinear Detection of Weak Pseudoperiodic Signals hidden under the Noise Floor // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2010. – No. 4(100). – P. 77–80.

25 Jiří Přibíl, Anna Přibilová, Ivan Frollo. Analysis of spectral properties of acoustic noise produced during magnetic resonance imaging // Applied Acoustics, Volume 73, Issue 8, August 2012, Pages 687-697.

26 Antunovic R. Role and importance vibrodiagnostics in maintenance technical system // 15th International research-expert conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”. Prague, 12-18 september 2011, p. 309-312.

27 Русов В. А. Спектральная вибродиагностика./В. А. Русов . – Пермь: вып. №1, 1996. – 176 с.

28 Смирнов В. И. Методы и средства функциональной диагностики и контроля технологических процессов на основе электромагнитных датчиков Монография /В. И. Смирнов. – Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 190 с.

29 Antoni J. Blind separation of vibration components: Principles and demonstrations. // Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, v.19, p. 1166–1180.

30 Jablonski A., Barszcz T., Antoni J. Comparison of vibration signal separation techniques for rotating machinery // 6th international conference “Acoustical and vibratory surveillance methods and diagnostic techniques”. Compiègne, 25–26 october, 2011, p. 3-10.

31 Добеши И. Десять лекций по вейвлетам /И. Добеши. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 464с.

32 Применение искусственных нейронных сетей для создания экспертной системы диагностирования технологического оборудования. (Сборник статей «Энергосбережение, автоматизация в промышленности, интеллектуальные здания и АСУТП», опуб. 06.04.2007) [Электронный ресурс] /А. В. Семенченко. <http://d.17-71.com/2007/04/06/primenenieiskusstve>.

33 Трунин Е.С., Скворцов О.Б. Эксплуатационный контроль технического состояния гидроагрегатов/Ежемесячный производственно-технический журнал "Электрические станции". - Изд-во "Энергопрогресс" 2010. - №6. – С. 38-45.

34 Васин Ю.Г., Громов В.П. Классификация электрокардиографических образов по полным машинным описаниям электрокардиограмм. // Мед. техника. – 1979. - № 2. – С. 9 – 14.

35 Ананьев Л.М., Шлотгауэр В.А. О возможности диагностической классификации электрокардиограмм по их спектральным характеристикам. // Мед. техника. – 1979. - № 2. – С. 5 – 9.

36 Heart rate variability. Standards of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use // Circulation. - 1996. 93 (5). - P. 1043 – 1065.

37 Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. – М.: Радиотехника, 2000. - 415 с.

38 Дабровски А., Дабровски Б., Пиотрович Р. Суточное мониторирование ЭКГ: (Перевод: Корнеев Н.В., Грабко Н.Н., Башникова С.Д.) – М.: Медпрактика, 2000. – 208 с.

- 39 Макаров Л.М. Холтеровское мониторирование (Руководство для врачей по использованию метода у детей и лиц молодого возраста). – М.: изд.-во Медпрактика, 2000, - с. 216.
- 40 Анализ сердечного ритма / Под ред. Д. Жемайтите, Л. Тельксниса. - Вильнюс: Мокслас, 1982. - 130 с.
- 41 Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng C-K, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. Circulation 101(23):e215-e220 [Circulation Electronic Pages; <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>]; 2000 (June 13).
- 42 Савостин А.А. Моделирование электрокардиосигнала при многоканальной регистрации поверхностных потенциалов. «Поиск – Ізденіс»: Серия естественно-технических наук. - Алматы, № 2, 2010, С. 221 – 225.
- 43 LabVIEW User Manual // National Instruments Corporate. April 2003 Edition.
- 44 S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press. 1997.

## Приложение А. Структурная схема исследовательской системы

