

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
Новосибирский государственный технический университет

*На правах рукописи*



**МАРЧЕНКО ИЛЬЯ ОЛЕГОВИЧ**

**СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Специальность

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в  
промышленности)

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук,  
доцент В. Л. Полубинский

НОВОСИБИРСК – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Обзор и анализ состояния исследований по интеллектуальным датчикам .....	13
1.1 Определение интеллектуального датчика.....	13
1.2 Анализ семейства стандартов IEEE 1451 .....	17
1.3 Анализ интеллектуальных функций в датчиках .....	28
1.3.1 Обзор существующих решений.....	28
1.3.2 Классификация функций интеллектуальных датчиков .....	40
Глава 2 Исследование датчиков: зависимости и уравнения.....	48
2.1 Многофункциональные датчики и датчики со сложными зависимостями .	48
2.1.1 Определение многофункционального датчика.....	48
2.1.2 Исследование зависимостей на примере газовых датчиков.....	50
2.1.3 Влияющие факторы датчиков.....	57
2.2 Уравнение и алгоритм интеллектуального датчика.....	61
2.2.1 Обобщённое уравнение интеллектуального датчика.....	61
2.2.2 Обобщённый алгоритм интеллектуального датчика.....	67
Глава 3 Многофункциональный реконфигурируемый интеллектуальный датчик .....	72
3.1 Определение многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика.....	72
3.2 Структура МРИД .....	73
3.2.1 Схема МРИД.....	74
3.2.2 Исходные требования к основным составляющим МРИД.....	76
3.3 Аппаратная часть МРИД .....	77
3.4 Программная часть МРИД.....	88
3.4.1 Организация программы МРИД.....	88
3.4.2 Алгоритмическое обеспечение МРИД .....	89
3.5 Конфигурирование МРИД .....	95

Глава 4 Система проектирования МРИД.....	103
4.1 Блок-схема системы проектирования МРИД.....	103
4.2 Разработка программной части системы проектирования .....	104
4.2.1 Построение пользовательского интерфейса .....	104
4.2.2 Реализация протокола обмена .....	112
4.2.3 Реализация конфигурирования МРИД .....	125
4.3 Информационная часть системы проектирования .....	132
Глава 5 Результаты использования системы проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков .....	141
5.1 Оценка коррекций составляющих обобщённого уравнения МРИД.....	141
5.1.1 Оценка погрешности вычислений обобщённым уравнением .....	141
5.1.2 Оценка коррекции влияющего фактора.....	144
5.1.3 Оценка влияния временного дрейфа.....	147
5.1.4 Оценка коррекции калибровочных характеристик .....	149
5.2 Применение компонентов МРИД в учебном и производственном процессах .....	150
5.2.1 Система мониторинга параметров окружающей среды .....	150
5.2.2 Лабораторный стенд .....	154
Заключение .....	159
Список литературы .....	160
Приложение А. Таблица разновидностей датчиков по стандарту IEEE 1451.4 .	171
Приложение Б. Пример электронной таблицы акселерометра .....	173
Приложение В. Стандартные шаблоны датчиков TEDS.....	174
Приложение Г. Калибровочные данные TEDS .....	176
Приложение Д. Принципиальные схемы прототипа МРИД .....	177
Приложение Е. Схемы разводки печатных плат прототипа МРИД .....	179
Приложение Ж. Акт внедрения .....	181

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

Экспериментальные исследования некоторого объекта или явления, испытания промышленных изделий, управление механизмами или процессами немыслимы без измерений физических величин, характеризующих состояние объекта. Поэтому в состав любой измерительной, испытательной или управляющей системы в качестве важнейших компонентов входят первичные измерительные преобразователи – датчики. Основной функцией датчиков является преобразование значений разнообразных физических величин в электрическую – напряжение, силу тока, частотно-временной параметр электрического сигнала [1].

В перечне проблем, которые необходимо решать при разработке и применении измерительных систем, одной из самых важных является то, что необходимо измерять не одну, а различные физические величины – например, давление, вибрации, скорость вращения, деформации и многое другое, использовать различные по принципу действия, характеристикам и конструктивному исполнению датчики.

Анализ проблем получения информации с помощью датчиков, проводившийся специалистами в течение многих лет, показал, что решать эти проблемы необходимо в комплексе, с учетом особенностей интеграции датчиков в системы, с учетом перспектив развития микроэлектроники, схемотехники, микропроцессорной техники и других факторов [2]. А это возможно, если датчики будут выполнять не только свою основную функцию – преобразование физических величин, но и ряд функций, которые реализуются последующими узлами измерительной системы, а также некоторые специальные функции [3].

Эти идеи многофункциональности датчиков изучались Цапенко М.П., Алейниковым А.Ф., Гридчиным В.А. Также подходы к решению этой проблемы можно найти, например, в работах Тайманова Р.Е. и Сапожниковой К.В. [4],

посвящённых концепции интеллектуального датчика как датчика с метрологическим самоконтролем.

Подобные датчики получили название интеллектуальных (Smart Sensor), и в их состав, кроме собственно чувствительного элемента, могут входить: соответствующая измерительная схема, аналоговые преобразователи (усилитель, фильтр и т.п.), аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор (для цифровой обработки, например, линеаризации, диагностики), контроллер промышленной сети [2].

В работе Рейзмана, Островского и других [5] предлагается подход, основанный на использовании языка функциональных блок-диаграмм (ФБД МЭК 1131-3), однако, не учитывается расширенный функционал интеллектуальных датчиков и выполнение нескольких измерительных функций с коррекцией показаний.

За рубежом также проводились исследования в данном направлении. Результатом является принятие семейства стандартов IEEE 1451 [6-10].

Этим семейством стандартов описывается организация хранения данных конкретного датчика и протоколы обмена датчика с внешними системами. Имеются публикации о разработке датчиков с коррекцией показаний. Однако вопросам создания и функционирования многофункциональных датчиков с несколькими преобразователями, способными выполнять разные алгоритмы обработки, уделяется значительно меньше внимания.

Следовательно, центральной задачей является разработка технологий и алгоритмов проектирования и функционирования многофункциональных интеллектуальных датчиков, позволяющих создавать гибкие, использующие разнообразные первичные преобразователи, интеллектуальные датчики со сложным функционалом.

### **Цель работы**

Целью настоящей диссертационной работы является разработка и исследование новых принципов построения информационно-измерительных систем и создания многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных

датчиков, позволяющих упростить и облегчить разработку информационно-измерительных систем.

### **Основные задачи**

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Анализ семейства стандартов интеллектуальных датчиков IEEE 1451 и разработка схемы проектирования датчиков с электронными таблицами.
2. Исследование зависимостей результатов измерений первичных преобразователей от влияющих параметров и создания математической модели для разных видов датчиков.
3. Анализ требований к многофункциональному реконфигурируемому интеллектуальному датчику.
4. Разработка и исследование обобщённого алгоритма функционирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков.
5. Разработка системы проектирования интеллектуальных датчиков и оценка основных параметров алгоритмов, заложенных в созданную систему.

### **Научная новизна**

1. Предложен новый класс интеллектуальных датчиков – многофункциональные реконфигурируемые интеллектуальные датчики, алгоритм работы которых учитывает влияющие факторы (например, состояние окружающей среды) и другие, указанные при проектировании изделия, величины.
2. Разработана и исследована математическая модель реконфигурируемого датчика – обобщённое уравнение, учитывающее измерительные характеристики преобразователей и влияние внешних факторов на результат измерения, являющееся основой для полного цифрового паспорта датчика, хранящего все характеристики (включая зависимости от влияющих факторов) в цифровом виде.
3. С учётом обобщённого уравнения разработан, исследован и экспериментально обоснован алгоритм функционирования интеллектуального датчика, использующий цифровое описание, как основной зависимости преобразователей, так и зависимостей от влияющих факторов.

4. Предложена система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков, позволяющая разрабатывать датчики заданием параметров на основе графического интерфейса пользователя, без использования программирования.

### **Практическая ценность**

Разработанная система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков позволяет сконфигурировать многофункциональный датчик, предназначенный для работы в разных условиях и способный выполнять различный набор измерительных задач.

Ряд разработок, в частности – практикум «Интеллектуальные датчики с электронными таблицами» – внесён в официальный каталог корпорации National Instruments и рекомендован для использования в разработках компании.

Разработаны программно-аппаратные комплексы для обучения принципам построения интеллектуальных датчиков: «Интеллектуальные датчики с электронными таблицами», «Мониторинг параметров окружающей среды». Они используются в обучении студентов направлений и специальностей «Приборостроение», «Биомедицинская инженерия», «Биотехнические системы и технологии», «Информационные системы и технологии» в НГТУ, а также в других университетах страны.

### **Методы исследования**

В диссертационной работе использовались теория систем, теория графов, теория множеств, теория функций нескольких переменных, физическое моделирование. В экспериментальной части применялись методы структурного и объектно-ориентированного программирования.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Многофункциональный реконфигурируемый интеллектуальный датчик (МРИД).
2. Алгоритм работы МРИД на основе обобщённого уравнения, позволяющий унифицированным образом учитывать характеристики преобразователей и влияние внешних факторов на результат измерения.

3. Система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков.

4. Результаты исследований погрешностей вычислений обобщённого уравнения и коррекций влияющих факторов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

В работе рассматривается создание системы проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков, которые могут обладать гибким набором функциональных возможностей, и работающих с учётом набора влияющих факторов. Поэтому для работы будут справедливы пункты из областей исследования, в соответствии с паспортом специальности:

- методы и системы программного и информационного обеспечения процессов отработки и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем;

- исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений.

В целом работа соответствует направлению «Создание и совершенствование сложных информационно-измерительных и управляющих систем, комплексов их контроля и испытания»

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях:

- International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering “SIBIRCON 2008” (Новосибирск, 2008);
- Международная научная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2010, АПЭП-2014 (Новосибирск, 2010, 2014);



- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука Технологии Инновации» (Новосибирск, 2005);
- Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments (Москва, 2006, 2007, 2008);
- Научно-техническая конференция «Виртуальные и интеллектуальные системы» ВИС-2007, ВИС-2013 (Барнаул, 2007, 2013);
- Межвузовская научная студенческая конференция МНСК-2005, МНСК-2006 «Интеллектуальный потенциал Сибири» (Новосибирск, 2005, 2006).

### **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы – 181 страница, включая 89 рисунков и 34 таблицы. В список литературы включено 91 наименование.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, представлены цели и задачи исследования, раскрывается актуальность исследования, новизна полученных результатов, практическая значимость. Приводится перечень вопросов, выносимых на защиту.

В **первой главе** проводится анализ существующего состояния дел в области интеллектуальных измерительных систем. Затрагиваются вопросы определения интеллектуальных измерительных систем, проводится анализ семейства стандартов IEEE 1451. Рассматриваются определения многофункционального датчика.

Во **второй главе** даётся определение многофункционального интеллектуального датчика, изучаются сложные зависимости датчиков, формулируется обобщённое уравнение интеллектуального датчика и обобщённый алгоритм на основе этого уравнения.

С учётом предложенной автором работы классификации функций многофункциональных интеллектуальных датчиков, предлагается определение, основанное на функциональном подходе.

Многофункциональный интеллектуальный датчик — интеллектуальный датчик, содержащий один или несколько первичных преобразователей, выполняющий основную измерительную и дополнительные функции: анализа (прогнозирования) и управления.

Каждый датчик в своей реальной эксплуатации подвергается действию влияющих факторов. Результаты измерений, таким образом, могут зависеть от значений конкретных влияющих величин. Для простого датчика с единственным первичным преобразователем задача отслеживания влияния факторов представляется затруднительной. На практике, всё большее распространение получают датчики с несколькими первичными преобразователями, для которых уже вполне возможно отслеживание влияния других величин на основной результат измерения.

Для описания всего многообразия уравнений автором предложено их систематизировать и записать в виде общего уравнения.

Полученное обобщённое уравнение интеллектуального датчика представляет собой уравнение преобразования, в котором учтены величины влияющих факторов, временного дрейфа, а также калибровочные данные преобразователей.

В **третьей главе** предлагается аппаратная реализация реконфигурируемого многофункционального интеллектуального датчика, позволяющая реализовать обобщённый алгоритм работы с любыми первичными преобразователями, и система разработки таких датчиков.

Автором предлагается унифицированная реконфигурируемая платформа для создания датчиков.

Реконфигурируемый интеллектуальный датчик — интеллектуальный датчик, который может быть легко переконфигурирован для использования с другими первичными преобразователями и в других условиях применения без изменений на аппаратном уровне.

Экземпляр многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика, сконфигурированного под свои конкретные условия и назначения

применения, является целью проектирования в предлагаемой **системе разработки интеллектуальных датчиков**. Система состоит из нескольких подсистем, составляющих в своей совокупности комплекс средств аппаратного, программного, методического и организационного характера. Многофункциональный реконфигурируемый интеллектуальный датчик также является одной из составляющих этой системы.

В **четвёртой главе** предлагается система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков. Подробно рассматриваются структурные и пользовательские аспекты программного обеспечения для конфигурирования реконфигурируемых интеллектуальных датчиков. Решаются вопросы реализации пользовательского интерфейса, реализации протокола обмена с устройством реконфигурируемого интеллектуального датчика, реализации информационной части системы проектирования.

Система проектирования предназначена для более быстрого, более лёгкого и более успешного конфигурирования параметров датчиков с помощью графического интерфейса. Задачи, решаемые системой проектирования:

- 1) задание основных параметров проектируемого датчика
- 2) определение функциональности датчика
- 3) хранение ранее заданных конфигураций для последующего использования
- 4) удобное задание характеристик преобразователей и их хранение

В **пятой главе** проведён анализ результатов применения системы проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков, приведены результаты предварительной оценки эффективности использования МРИД.

Также был проведён анализ средств проектирования интеллектуальных датчиков и систем на их основе, по результатам которого было решено спроектировать многофункциональный программно-аппаратный комплекс "Интеллектуальные датчики с электронными таблицами". Данный комплекс

предназначен для проектирования интеллектуальных датчиков TEDS, выполненных в соответствии со стандартом IEEE 1451.4, изучения программных средств проектирования – библиотеки функций TEDS LabVIEW и специальных утилит, обучения принципам проектирования каналов измерения в системах автоматизации экспериментальных исследований, испытаний и управления с использованием интеллектуальных датчиков.

Разработанный программно-аппаратный комплекс используется для обучения студентов старших курсов технических специальностей проектированию интеллектуальных датчиков с электронными таблицами и измерительных систем на основе них.

## **ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ДАТЧИКАМ**

### **1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

В настоящее время словосочетание «интеллектуальных датчик» прочно вошло в лексикон не только разработчиков информационно-измерительных систем, но и простых потребителей. Однако далеко не все правильно понимают его значение. Связано это с тем, что и сами разработчики подобных устройств расходятся во мнениях относительно его значения, и каждый вкладывает в него свой особый смысл. Поэтому введение определения интеллектуального датчика является первоочередной задачей данной работы.

Семейство ГОСТ 8.673-2009, ГОСТ Р 8.734-2011, ГОСТ Р 8.825-2013 [11-13] определяет интеллектуальный датчик как «Адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля». В свою очередь, в ГОСТ термин «Адаптивный датчик» формулируется как «Датчик, параметры и/или алгоритмы которого в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов содержащихся в нём преобразователей», а термин «метрологический самоконтроль» раскрывается как «Автоматическая проверка метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации, осуществляемая с использованием принятого опорного значения, формируемого с помощью встроенного в датчик средства (измерительного преобразователя или меры) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала».

Следует отметить, что сам термин «датчик» используется здесь как составное устройство, в отличие от его международного значения «чувствительный элемент» [14].

Подходы к терминологии интеллектуальных датчиков начали разрабатываться с 1980-х годов. В этот период такие авторы, как Иванов В.Н., Орнатский П.П., Соболев В.С., Цветков Э.И. в публикациях в

специализированных журналах обсуждали термины «интеллектуальные средства измерений», «интеллектуальные измерительные комплексы», развитие теории интеллектуальных измерительных систем [15-18]. Затем, в 90-е годы, тема разрабатывается более подробно авторами: Бунин В.И., Цапенко М.П., Романов В.Н., Соболев В.С., Цветков Э.И. в публикациях [19-21]. Однако, только с развитием микроэлектроники в 2000-е годы, увеличилось количество публикаций по данной тематике.

Более поздние работы таких авторов, как Селиванова З.М., Слепцов В.В., Подбельский А.Н., Стасенко К.С., Артемова С.В., Третьяков В.В., Удод Е.В., Пьявченко О.Н., Крутинский С.Г., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Панич А.Е., Сапронов П.В., Васильев В.А., Чернов П.С., Бельчанская Е.Н. [22-32], посвящены уже практическим вопросам применения интеллектуальных датчиков в разных отраслях.

Распространённые методы преобразования избыточного давления основаны на использовании резистивного тензомоста, выполненного по технологии «кремний на сапфире». Ранее для уменьшения погрешности, обусловленной недостатками тензомоста, использовались методы коррекции в аналоговой форме. В настоящее время, благодаря наличию однокристальных микроконтроллеров с малым потреблением, встроенными прецизионными АЦП и энергонезависимой памятью данных, ведущие фирмы перешли от аналоговых методов коррекции погрешности к цифровым. Такие датчики получили название интеллектуальных. На рисунке 1.1 представлена структурная схема интеллектуального датчика избыточного давления.

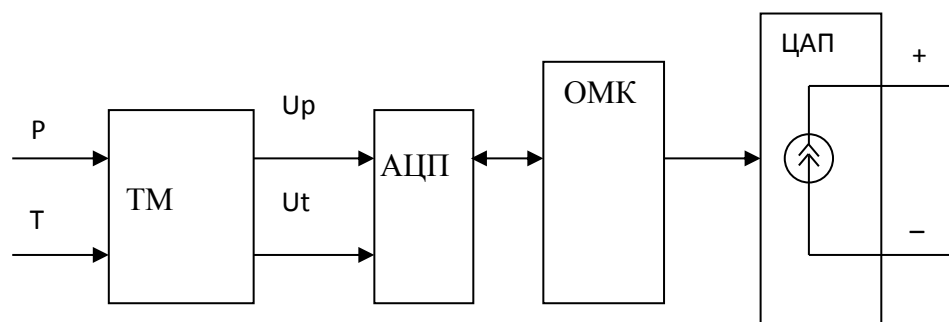


Рисунок 1.1 - Структурная схема интеллектуального датчика

$P$  – давление,  $T$  – температура,  $TM$  – тензомост,  $U_p$  – напряжение, снимаемое с диагонали  $TM$ ,  $U_t$  – падение напряжения на резисторе, включенном в цепь диагонали питания тензомоста, ОМК – однокристальный микроконтроллер [33].

Современные датчики давления это сложный комплекс самых разных компонентов, высокочувствительных сенсоров, электронных схем, микропроцессоров.

В очень упрощенном виде работу прибора можно описать так: сенсор, созданный на основе монокристаллического кремниевого элемента, преобразует давление в электрический сигнал, который усиливается и передается в микропроцессор, установленный в самом приборе, а не в центральный контроллер (АСУ ТП), как в классических схемах. Именно поэтому они и называются «интеллектуальными датчиками давления».

Устройство интеллекта – микропроцессор, производящий математическую обработку информации непосредственно в процессе измерения давления, а также активно управляющий процессом измерения. Обработка данных в самом приборе – основное отличие интеллектуальных датчиков от других приборов для измерения давления [34].

На мировом рынке появился новый класс, так называемых интеллектуальных датчиков, то есть датчиков, имеющих встроенное вычислительное устройство (микроконтроллер) [35].

В практике электрических измерений и измерительных преобразований многомерных массивов информации, представленных множеством электрических сигналов, наряду с основной целью измерения (измерительного преобразования) ставится ряд сопутствующих задач: режекция (подавление) и селекция (выделение) по заданному признаку одного из нескольких сигналов, ранжирование и сортировка сигналов по информационному признаку, разделение множества сигналов на подклассы, адресная идентификация одного из каналов передачи, на который воздействует сигнал с заданным информационным

признаком, контроль наличия заданной ранговой ситуации множества сигналов и др.

Измерения (измерительные преобразования) с вышеуказанными сопутствующими и другими операциями и (или) алгоритмами обработки, функционирующие на формализованной основе в автоматизированном или автоматическом режимах, принято называть интеллектуальными.

Чаще термин "интеллектуальные" употребляют в узком смысле по отношению к устройствам, которые за счёт использования в них переработки информации (обычно на основе микропроцессора) приобретают новые функциональные возможности.

Например, интеллектуальный датчик может выдавать более точные показания благодаря применению числовых вычислений для компенсации нелинейности чувствительного элемента или температурной зависимости. Такой датчик способен работать с большей разновидностью разных типов чувствительных элементов, а также комбинировать два или более измерений в одно новое измерение (например, объединять измерения физиологических параметров в сводный показатель здоровья). И, наконец, интеллектуальный датчик позволяет производить настройку на другие диапазоны измерений или полуавтоматическую калибровку, а также осуществлять функции внутренней самодиагностики, что упрощает техническое обслуживание. Наряду с усовершенствованием работы, дополнительные функциональные возможности интеллектуальных устройств снижают размерность обработки сигналов системой управления и приводят к тому, что несколько разных приборов заменяются прибором одной модели, что даёт преимущество как в самом производстве, так и в стоимости обслуживания [36].

Анализируя определения из этих и других источников [37 - 42], можно выделить следующие общие факторы «интеллектуальности», начиная с наиболее упоминаемого:

- 1) Наличие вычислительного блока (микроконтроллера, микропроцессора) в датчике и первичная обработка данных в самом датчике;



- 2) Выполнение вычислительным блоком корректирующей функции (снижение влияния внешних факторов);
- 3) Выполнение вычислительным блоком других дополнительных функций, в числе которых – статистическая обработка данных, калибровка и самодиагностика, хранение данных, преобразование данных к различным форматам передачи на следующий уровень.

Необходимо отметить, что для дальнейшей обработки данных и интеграции датчиков в измерительные системы и комплексы, выдача измерительных данных в цифровом виде является весьма желательной. Кроме того, благодаря развитию полупроводниковой промышленности, вычислительные мощности растут, а потребляемая электрическая мощность снижается, что создаёт предпосылки для расширения выполняемых датчиками функций.

Основываясь на всём вышеизложенном, предлагается следующая формулировка определения «интеллектуальный датчик».

Интеллектуальный датчик – преобразователь, содержащий один или несколько первичных преобразователей и оснащённый АЦП для представления измеренных данных в цифровом виде и вычислительным блоком для коррекции измеренного значения с учётом влияющих факторов и выполнения дополнительных функций: обработки, преобразования, хранения и передачи данных.

## **1.2 АНАЛИЗ СЕМЕЙСТВА СТАНДАРТОВ IEEE 1451**

Проблемы интеграции датчиков в информационно-измерительные системы начали решать с основного – улучшения метрологических характеристик, которые зависят не только от стабильности параметров датчиков, но и от уровня выходных сигналов, передаваемых по достаточно длинным (десятки метров и более) линиям связи от датчиков к аналого-цифровым преобразователям, от характеристик помех и т.п.

Для этого в датчики встраивают элементы, обеспечивающие преобразование пассивных электрических параметров в активные (напряжение, ток), фильтрацию помех, усиление сигналов для улучшения соотношения сигнал/помеха, а также приведение уровней сигналов к значениям, удобным для последующего аналого-цифрового преобразования (нормализация). Существуют датчики с унифицированным выходным сигналом напряжения, тока, частоты (например,  $0 \div 5$  В,  $4 \div 20$  мА,  $0 \div 1000$  Гц) и другие. Это позволило не только улучшить метрологические характеристики систем, но и упростить их техническую реализацию – различные физические величины, изменяющиеся в различных диапазонах, на вход аналоговых мультиплексоров и аналого-цифровых преобразователей поступают преобразованными в одинаковый электрический сигнал с одинаковыми параметрами – значительная часть аппаратуры становится однородной, легко поддаётся унификации, а, следовательно – становится дешевле.

Решение других проблем потребовало длительного и кропотливого труда по обобщению и систематизации множества факторов, связанных с устройством, принципом действия и индивидуальными особенностями самих датчиков, интерфейсов и протоколов обмена информации между датчиками и системой, способов формализации описания системных компонентов и т.п.

Для выполнения этой работы в международной организации IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers - институт инженеров по электротехнике и электронике) в 1993 году были сформированы группы специалистов высшей квалификации, которые разработали и опубликовали семейство специальных стандартов.

Рабочие группы сформулировали основные цели и ограничения, которыми руководствовались в процессе своей деятельности:

- Общий коммуникационный интерфейс между датчиками и процессорами

- Совместимость с различными стандартными шинами для датчиков и актюаторов
- Сопрягаемость аналоговых датчиков с цифровыми сетями
- Использование какого-либо из существующих интерфейсов (не изобретать новый тип сети)

Предполагалось достижение положительного эффекта за счёт:

- Обеспечения совместимости и взаимодействия датчиков и систем управления различных производителей
- Работы датчиков с общей шиной, достаточно простой и дешёвой
- Использования в системах, уже находящихся в эксплуатации
- Использования существующих коммуникаций

Первым в 1997 году был представлен стандарт IEEE P1451.2, определяющий формат электронных таблиц для датчиков (Transducer Electronic Data Sheet - TEDS), интерфейсный модуль интеллектуальных датчиков (Smart Transducer Interface Module - STIM) и интерфейс, независимый от типа датчиков (Transducer Independent Interface TII) [6].

Второй по времени появления (1999 год) стандарт IEEE 1451.1 посвящён общей объектной модели датчика и коммуникационному процессору для включения датчиков в сеть (Network Capable Application Processor - NCAP) [7].

Стандарт IEEE 1451.3 (2003 год) развивает концепцию многоточечных сетей датчиков, использующих для передачи информации широкополосные радиочастотные физические среды [8].

И, наконец, в мае 2004 года был опубликован готовый к применению стандарт IEEE 1451.4, на основе которого начинается массовое производство интеллектуальных датчиков [9].

Стандарт 1451.5 (26 марта 2007) описывает методы и форматы данных для беспроводной связи с датчиками. В частности, определяются TEDS на основе концепции IEEE 1451, и протоколы для доступа к данным TEDS и датчика. Он

адаптирует необходимые беспроводные интерфейсы и протоколы для использования текущих беспроводных решений.

Стандарт 1451.6 описывает сеть многоканальных датчиков на основе сети CANopen. Этот стандарт определяет размещение TEDS в пространстве CANopen (коммуникационные сообщения, обработка данных, конфигурационные параметры, диагностическая информация). Он адаптирует профиль устройства CANopen для измерительных устройств и контроллеров с замкнутой обратной связью. Также этот стандарт определяет искробезопасный физический уровень сети CAN. Всё это позволяет разрабатывать передаточные шлюзы и каскадные сети датчиков на основе комбинированных спецификаций IEEE 1451 и CANopen.

Стандарт IEEE 1451.4 "Интеллектуальный интерфейс для датчиков и актюаторов. – Комбинированный коммуникационный протокол и форматы электронных таблиц для преобразователей", как следует из названия, основан на трех главных компонентах:

1. Электронных таблицах, в которых хранятся все важнейшие характеристики преобразователя.

2. Шаблонах электронных таблиц, позволяющих стандартным образом упаковывать для хранения и распаковывать для применения необходимые данные о разнообразных преобразователях.

3. Комбинированном физическом канале обмена данными (Mixed-Mode Interface – MMI). Этот интерфейс обеспечивает передачу цифровых данных электронных из таблиц и аналоговых сигналов от сенсоров с использованием проводных линий связи практически от любых типов датчиков и актюаторов.

На системном уровне архитектура стандарта может быть представлена как комплекс взаимосвязанных составляющих (рисунок 1.2, [10]).

## IEEE 1451.4 System Architecture

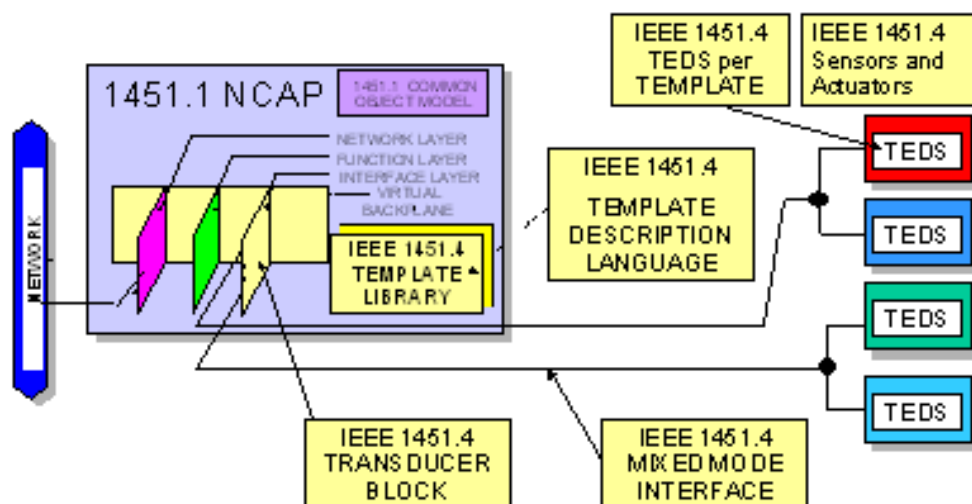


Рисунок 1.2 - Системная архитектура стандарта IEEE 1451.4 [9]

Непосредственно с каналом обмена информацией (Network) связан коммуникационный процессор NCAP (Network Capable Application Processor), обеспечивающий реализацию протокола стандарта 1451.1 в соответствии с общей объектной моделью. В этой модели используются: три уровня представления данных – интерфейсный (Interface Layer), функциональный (Function Layer) и сетевой (Network Layer), а также библиотека шаблонов электронных таблиц, создаваемых с помощью специального языка описания шаблонов (Template Description Language).

Информация в коммуникационный процессор поступает от датчиков и актюаторов (TEDS) через блок преобразования (Transducer Block) или через комбинированный интерфейс (Mixed Mode Interface).

Интеллект преобразователя (датчика) определяется содержанием электронной таблицы, которое может быть использовано при подключении, конфигурировании и в процессе работы системы.

Считывание таблиц из датчиков производится через специальный комбинированный интерфейс.

Стандарт IEEE P1451.4 регламентирует применение двух разновидностей комбинированного интерфейса для обмена информацией между датчиком и системой: интерфейс класса 1 и класса 2.

Интерфейс класса 1 – основан на двухпроводной линии связи, по которой передаются как измеряемый аналоговый сигнал, так и цифровые данные из электронной таблицы (рисунок 1.3), по этим же двум проводам в датчик поступает питание. Такой способ обмена информацией применяется при работе с акселерометрами и микрофонами, аналоговый выход которых реализован с помощью усилителя, запитываемого постоянным током. При считывании измеряемого сигнала на линию связи подключается источник тока питания, при работе с памятью электронной таблицы на линию связи подаётся напряжение питания противоположной полярности, внутри датчика соответственно полярности питающего напряжения коммутируются либо усилитель выходного сигнала, либо выход памяти.

Sensing Element – чувствительный элемент, Amplifier – усилитель, Current Source – источник тока, Analog Signal Output – аналоговый выходной сигнал, Digital Signal I/O – цифровой ввод/вывод.

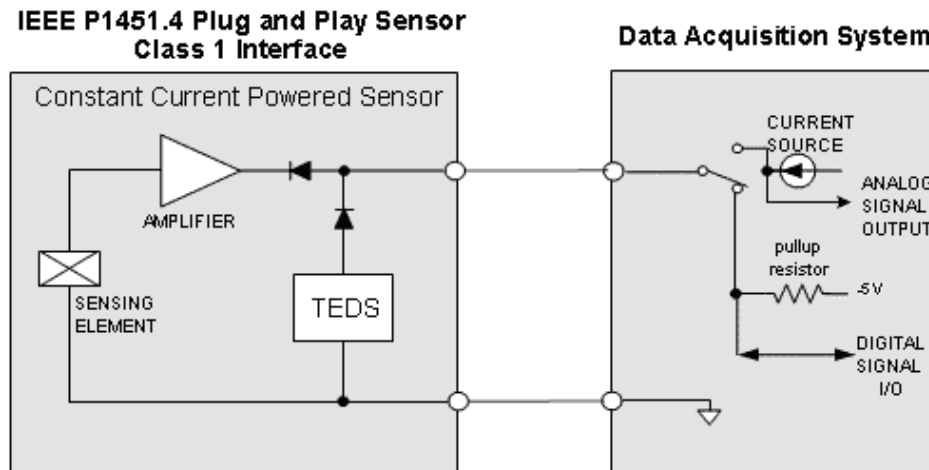


Рисунок 1.3 - Датчик с интерфейсом класса 1 [9]

Интерфейс класса 2 использует отдельные каналы для передачи аналоговой и цифровой информации (рисунок 1.4).

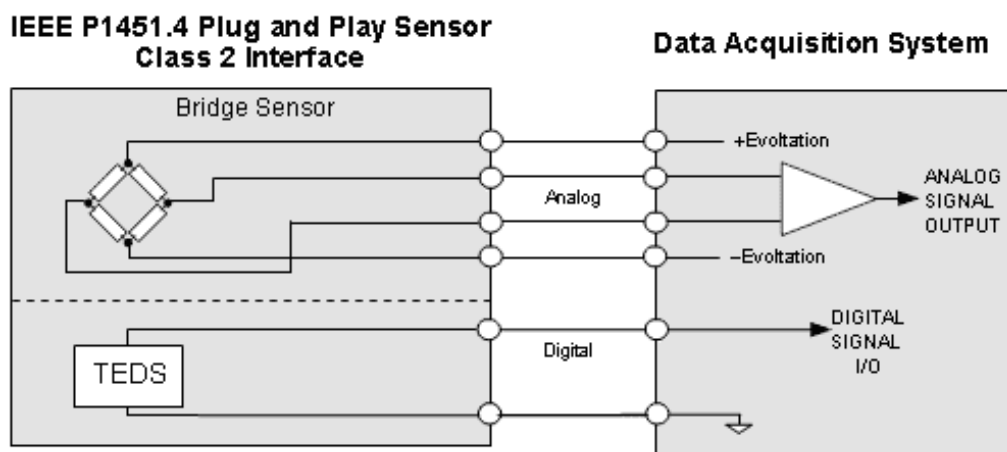


Рисунок 1.4 - Датчик с интерфейсом класса 2 [9]

Bridge Sensor – мостовой датчик, Analog – аналоговый канал, Digital – цифровой канал,  $\pm$ Evolution – напряжение питания моста, Analog Signal Output – аналоговый выходной сигнал, Digital Signal I/O – цифровой ввод/вывод.

На рисунке 1.4 чувствительные элементы датчика включены по мостовой схеме, которая соединяется с измерительной системой 4-мя проводами – два используются для питания моста, а два – для передачи сигнала с измерительной диагонали моста. Данные электронной таблицы передаются в систему по отдельной паре проводов.

Такая организация интерфейса между датчиком и системой позволяет распространить стандарт IEEE 1451.4 практически на любые типы датчиков.

Цифровой канал связи основан на широко распространённом и дешёвом интерфейсе 1-Wire, разработанном компанией Maxim/DallasSemiconductor, компоненты, использующие интерфейс 1-Wire, выпускают и ряд других компаний. В качестве примера приведём микросхему DS-2430, в состав которой входит блок однократно программируемой памяти ёмкостью 64-бит, 8-разрядный регистр состояния, блок репрограммируемой памяти ёмкостью 256 бит и блок аппаратно реализованного интерфейса 1-Wire. Эта микросхема идеально подходит для использования в интеллектуальных датчиках – в 64-битовую память изготовитель заносит идентификационную информацию – это базовая секция таблицы TEDS, в блоке репрограммируемой памяти может храниться стандартная

секция типа датчика, в которой представлены все необходимые характеристики датчика, канал передачи цифровых данных встроен.

Электронная таблица может храниться не только во встроенном в датчик запоминающем устройстве, но и в файле на диске системного компьютера (так называемая виртуальная электронная таблица). Во втором случае любой, даже уже смонтированный и много лет эксплуатирующийся датчик приобретает признаки "интеллектуальности", если для него создать файл электронной таблицы. И тогда измерительная система, как с новыми интеллектуальными датчиками, так и со старыми датчиками, превращёнными в интеллектуальные согласно стандарту IEEE 1451.4, приобретает вид, показанный на рисунке 1.5. Для разработчика программного обеспечения и для инженеров, эксплуатирующих систему, все её измерительные каналы становятся самоидентифицируемыми, что существенно упрощает создание системы и её обслуживание.

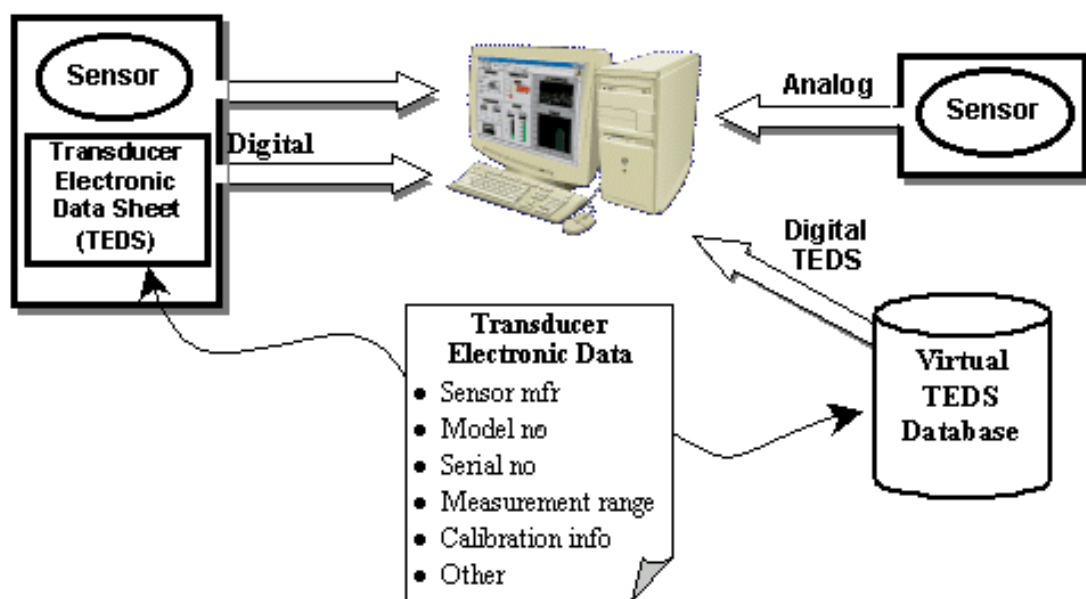


Рисунок 1.5 - Система с электронными таблицами, встроенными в датчики, и с виртуальными электронными таблицами [9]

Таким образом, стандарт интеллектуальных датчиков с электронными таблицами оказался чрезвычайно универсальным и гибким, обеспечивающим возможность постепенного перехода на новые технологии интеграции измерительных систем. Учитывая, что стоимость интеллектуальных датчиков



пока еще заметно выше стоимости обычных датчиков, это обстоятельство достаточно существенно. В настоящее время многие фирмы выпускают "обычные" датчики, поставляя вместе с ними виртуальные электронные таблицы.

Sensor – чувствительный элемент, Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) – электронная таблица, Virtual TEDS Database – база данных виртуальных электронных таблиц.

Стандарт IEEE P1451.4 определяет электронную таблицу в виде нескольких упорядоченных и связанных друг с другом секций (рисунок 1.6).

Электронная таблица обязательно содержит базовую секцию (Basic TEDS) и секцию стандартного шаблона типа преобразователя (Standard Template TEDS), кроме того, в таблице может быть нестандартная секция с данными пользователя (User Data) (рисунок 1.6). В расширенном формате в состав таблицы включается секция стандартного шаблона калибровки (Calibration TEDS Template) (рисунок 1.6б). Разграничителем секций служит селектор (Selector).

Для каждого типа датчика (терморезистор, акселерометр, датчик давления и т.п.) разработан соответствующий стандартный шаблон. Точно так же и для разных способов калибровки (табличный, полиномиальный – для статической характеристики преобразования, табличный – для калибровки в частотной области) – соответствующий стандартный шаблон представления калибровочных данных. Для идентификации стандартных шаблонов используется идентификатор шаблона (Template ID).

Вся информация в таблице хранится в двоичном виде, причём каждое поле таблицы используется максимально экономно – формат представления данных выбирается с учётом возможного диапазона значений и точности представления.

<b>a. Transducer with standard TEDS content</b>
<b>Basic TEDS</b> (64 bits)
Selector (2 bits)
Template ID (8 bits)
<b>Standard Template TEDS</b> (ID=25 to 39)
Selector (2 bits)
Extended End Selector (1 bit)
<b>User Data</b>

a)

<b>b. Transducer with standard TEDS and calibration table TEDS</b>
<b>Basic TEDS</b> (64 bits)
Selector (2 bits)
Template ID (8 bits)
<b>Standard Template TEDS</b> (ID=25 to 39)
Selector (2 bits)
Template ID (8 bits)
<b>Calibration TEDS Template</b> (ID = 40 to 42)
Selector (2 bits)
Extended End Selector (1 bit)
<b>User Data</b>

б)

Рисунок 1.6 - Структура электронных таблиц [9]

В базовой секции (Basic TEDS) в закодированном виде содержатся сведения, необходимые для идентификации датчика. В таблице 1.1 приведена структура базовой секции с указанием размера и диапазона значений каждого поля.

Таблица 1.1 – Структура базовой секции [9]

<b>Field</b> (наименование поля)		<b>Bit Length</b> (размер в битах)	<b>Allowable Range</b> (диапазон значений)
Manufacturer ID	Идентификатор производителя	14	17 – 16381
Model Number	Номер модели	15	0-32767
Version Letter	Символ версии	5	A-Z (data type Chr5)
Version Number	Номер версии	6	0-63
Serial Number	Заводской номер	24	0-16777215

Базовая секция таблицы заполняется изготовителем датчика и корректировке не подлежит. Общий размер базовой секции – всего 64 бита.

Секция стандартного шаблона типа датчика (Standard Template TEDS) содержит полное описание датчика, включая все его характеристики.

В стандарте IEEE 1451 обеспечивается возможность идентификации любой разновидности датчика в семействе с помощью селектора выбора Select Case (рассматривается ниже). Однозначное определение разновидности датчика осуществляется по таблице, представленной в приложении А, в которой перечислены все воспринимаемые физические величины с указанием возможных единиц измерений.

Краткая информация по стандартным шаблонам приведена в приложении В.

Стандартные шаблоны создаются с использованием специального языка описания шаблонов TDL (IEEE 1451.4 Smart Transducers Template Description Language) и хранятся в текстовом формате в файле библиотеки шаблонов (расширение .tdl) [10]. Собственно таблицы TEDS хранятся в упакованном

двоичном формате либо в энергонезависимом запоминающем устройстве, встроенном в интеллектуальный датчик (Smart TEDS), либо вне датчика – в файле виртуальной электронной таблицы с расширением .ted (Virtual TEDS).

Программное обеспечение для работы с датчиками TEDS считывает таблицу, принадлежащую конкретному датчику, и, в соответствии с идентификатором шаблона типа датчика, отыскивает в библиотеке нужный шаблон. Затем с помощью шаблона декодируются все свойства датчиков, которые используются в процессе измерений или калибровки.

Пример электронной таблицы акселерометра представлен в приложении Б.

### **1.3 АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ В ДАТЧИКАХ**

На сегодняшний день большинство датчиков, выпускающихся промышленностью, являются или называются интеллектуальными. Производители наделяют их разнообразными функциями, позволяющими облегчить труд инженеров на этапе проектирования, конфигурирования и эксплуатации разрабатываемых информационно-измерительных и управляющих систем. В связи с этим возникает задача классификации этих функций. Для этого необходимо рассмотреть существующие решения на предмет выполняемых ими функций, а также обратиться к источникам, в которых уже были попытки классифицировать функции интеллектуальных датчиков.

#### **1.3.1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ**

Многофункциональный датчик вибрации HAUBER 648 [43] представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Многофункциональный датчик вибрации HAUBER 648 [43]

### Характеристики

- Многофункциональный датчик виброскорости, виброускорения и температуры с выходами токового стандарта 4-20 мА.
- Диапазон частот 5 Гц ... 1 кГц (виброскорость) 100 Гц ... 6 кГц (виброускорение).
- Максимальная виброскорость от 8 до 1000 мм/с (определяется при заказе).
- Максимальное виброускорение 16 м/с<sup>2</sup>.
- Диапазон измерений температуры 0 ... +100 °С.
- Рабочий диапазон температур -40 ... +100 °С.
- Габаритные размеры: 36×71 мм.
- Присоединительные размеры: M8×8.
- Напряжение питания 24 В.
- Вес 250г.

Функциональной особенностью данного датчика является возможность измерять несколько величин.

Датчик давления DS 200 [44] представлен на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 - Датчик давления DS 200 [44]

### Характеристики

- Диапазоны давления: от 0...0,04 до 0...600 бар, абсолютное, избыточное, разрежение.
- Основная погрешность: 0,5/0,35/0,25 %ВПИ.
- Выходной сигнал: 4...20 мА, 0...10 В (опция: Ех-исполнение), 1 или 2 программируемых дискретных выхода (I<sub>макс</sub>=125мА).
- Сенсор: кремниевый пьезорезистивный.
- Диапазон температур измеряемой среды: -25...+125°C.
- Класс защиты: IP 65-67.
- Механическое присоединение: M10x1, M12x1, M20x1.5, G<sup>1</sup>/<sub>4</sub>", G<sup>1</sup>/<sub>2</sub>", <sup>1</sup>/<sub>4</sub>" NPT, <sup>1</sup>/<sub>2</sub>" NPT.
- Электрическое присоединение: DIN 43650, M12x1, кабельный ввод, Bussaneer.

Применяется данный датчик для измерения средних и высоких давлений газов, пара и жидкостей, неагрессивных к нержавеющей стали.

Этот многофункциональный датчик представляет собой удачное сочетание нескольких устройств:

- прецизионный датчик давления;
- программируемый переключатель давления с дискретным выходом;
- цифровой дисплей.

К основным сферам применения DS 200 можно отнести пневматику и гидравлику, а также ряд приложений с MSR функциями, такие как прецизионные и долговременные измерения.

Датчик подходит для работы во всех типах сред неагрессивных к нержавеющей стали. Для пищевой, фармацевтической промышленности и других промышленных процессов возможно исполнение с приварной открытой мембраной из нержавеющей стали.

Четырех-разрядный программируемый светодиодный дисплей отображает давление в системе. Настройка и регулировка реле давления осуществляется с помощью кнопок, расположенных на панели дисплея. Программное обеспечение обеспечивает такие функции как программная блокировка доступа, конфигурирование дисплея, выходных каналов, и проч. Контрольные точки задаются в диапазоне от 0 до 100% от номинального давления.

Преимущества и особенности датчика давления DS200.

- Светодиодный дисплей: 7 сегментный, 4-х разрядный, вращаемый дисплей и корпус.
- Одно- или двухпозиционная настройка, простота конфигурирования (оконный режим или режим гистерезиса, время задержки вкл/выкл).
- Удобный контроль, программное исполнение функций блокировки и конфигурирования дисплея.

Высокотемпературный тонкоплёночный многофункциональный датчик [45] представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 - Высокотемпературный тонкоплёночный многофункциональный датчик [45]

Достоинства.

- Предоставляет более точную информацию о термических и аэродинамических нагрузках критических компонентов двигателей.
- Измерение множества физических параметров при высокой температуре – до 1100 градусов Цельсия.
- Минимальное вмешательство в устройство установки: толщина датчика порядка 0.01 мм и он может быть размещён непосредственно на деталях.
- Коммерческие приложения.
- Проверка целостности системы охлаждения, включая температуру поверхности, тепловой поток и деформации.
- Улучшенное понимание условий работы и возможностей, что приводит к повышению безопасности системы и уменьшению затрат на разработку.
- Проверка дизайна через одновременное измерение температуры, напряжения деформации, теплового потока и вибрации.

Описание технологии

Датчики для развитых воздухоплавательный и аэрокосмических исследовательских приложений должны быть способны действовать в обстановке, где высоки стресс и градиенты температуры и аэродинамических факторов или датчики должны быть минимального размера. Многофункциональный тонкоплёночный датчик, разработанный в исследовательском центре НАСА «Гленн», интегрируется в «умный» датчик конструкций датчиков, измеряющих:

- значение и направление напряжения деформации;
- тепловой поток;
- температуру поверхности;
- скорость и направление потока;

Весь датчик является микроскопическим изделием, заключен в треугольнике площадью приблизительно 1,5 см на стороне с толщиной 50 мкм. Разработан для приложений, систем материалов и тестирования компонентов двигателей, датчик может обеспечить минимально интрузивные характеристики



для современных двигателей, материалов и комплектующих во враждебных, высокотемпературных средах, проверки двигательной системы и экспериментальной проверки вычислительных моделей.

Интеллектуальный датчик газа GD-70D [46] представлен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 - Интеллектуальный датчик газа GD-70D [46]

Особенности.

- Мониторинг кислорода, горючих и широкого спектра токсичных газов.
- Легко подключаемые интеллектуальные датчики, сохраняющие калибровочные данные.
- Общая платформа (Основной блок/Датчики/Помпа) для всех методов обнаружения.
- Универсальный основной блок для всех типов датчиков.
- Многофункциональный блок датчиков.
- Без встроенных трубок (основной блок) / Без катушки (помпа).
- Доступ с передней панели, не требуется инструмента, лёгкая замена датчиков и помпы.
- LCD-экран большого размера.
- Различные методы коммуникации (4-20мА, NT и PoE).
- Минимальные затраты на обслуживание благодаря ПО с расширенными функциями.
- Малый монтажный объём.

- Дружелюбный к окружающей среде.
- Широкий спектр доступных датчиков.

Спецификации приведены в таблицах 1.2 – 1.4.

Таблица 1.2 – Спецификации основного блока

Model	GD-70D	GD-70D-NT	GD-70D-ET
Коммуникация	4-20mA DC	DC power line communication	PoE Method
Принцип работы	Различные типы, зависит от блока датчиков и детектируемого газа		
Метод оцифровки	Sample drawing types (автоподстройка скорости) 0.5 / минуту +/- 10%		
Дисплей	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Большой LCD экран (белая подсветка)</li> <li>• Концентрация газа</li> <li>• Скорость потока, статус коммуникаций, статус пиролизера, обнаруженный газ</li> <li>• Код ошибки, содержимое ошибки</li> </ul>		
Газовая тревога	Два уровня тревог: 1-ая тревога - Красный 2-ая тревога - Красный остальные: Жёлтый		
Внешний выход	1-ая, 2-ая и остальные тревоги : Выходы реле для каждой тревоги		
Функции самодиагностики	Сбой системы, сбой датчика, сбой потока, ошибки коммуникаций		
Логирование данных	История событий, тревог, калибровок. График тревог (3 минуты до и после первой тревоги)		
Рабочие температура и влажность	0 ~ 40°C, 30 ~ 70% RH (без конденсации)		
Рабочие настройки	Все настройки доступны с передней панели		
Потребление энергии	DC 24V +/- 10%, прикл. 1.5Вт (Max 4Вт вместе с блоком датчиков) по стандарту PoE		
Размеры	70 Ширина x 120 Высота x 150 Длина в мм		
Масса	Приблизительно 0.9 кг вместе с блоком датчиков		
Монтаж	Настенный		
Пробные зонды	4 x 6 мм PTFE зонды рекомендуются		
Соединение	Кабель зависит от способа коммуникаций		

Таблица 1.3 – Спецификации блока датчиков

Модель	ESU	SGU	SSU	OSU	NCU
Принцип работы	Электро-химическая ячейка	Полупроводник	Пиролиз	Гальваническая ячейка	Каталитическое сжигание
Газ и диапазон обнаружения	См. Список обнаруживаемых газов	0-2000 ppmH <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , or CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (R-32) в воздухе и др.	0-15ppm TEOS в воздухе	0-25% O <sub>2</sub> в воздухе	0-100% LEL H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , и др.

## Продолжение таблицы 1.3

Функции самодиагностики	Сбой датчика, сбой системы
Функции логирования данных	История событий, история тревог, история калибровок, график тревог (1 минута до и после тревоги)

Таблица 1.4 – Спецификации блока пиролиза

<b>Модель</b>	<b>PLU-70</b>
Приложения	NF3 / TEOS газы обнаруживаемые в воздухе
Использование	Используется вместе с основным блоком
Индикация работы	LED (зелёный цвет) норма: постоянное свечение разогрев: мигание с 1 секундным интервалом проблема: мигание с интервалом 0.2 сек
Функции самодиагностики	Проблема пиролизера, вентилятора, системы
Рабочие температура и влажность	0-40° C, 30-70% RH без конденсации
Рабочие настройки	Все настройки доступны с передней панели.
Потребление энергии	DC 24В +/- 10%, прибл. 25Вт (max)
Размеры	70 ширинах 120 высотах 150 длина в мм
Масса	Прибл. 1.2 кг
Монтаж	Настенный
Пробные зонды	4x6 мм PTFE зонды рекомендуются.
Втулка	1.25 кв. дюйма 2 core-кабель для питания DC24В

Как можно видеть, наиболее развитое устройство реализует четыре функции: преобразования, конфигурирования, информационная, самодиагностика.

Высокоточный 1-Wire цифровой термометр DS18S20.

Наиболее популярными компонентами 1-Wire-сетей являются цифровые термометры типа DS18S20 (фирма Dallas Semiconductor), более известные под обозначением уже давно снятого с производства устройства DS1820, успевшего стать международным брендом [47]. Преимущества этих цифровых термометров с точки зрения организации магистрали, по сравнению с любыми другими интегральными температурными сенсорами, а также неплохие метрологические характеристики и хорошая помехоустойчивость, уже на протяжении полутора десятков лет неизменно выводят их на первое место при построении многоточечных систем температурного контроля в диапазоне от -55°C до +125°C.

Они позволяют не только осуществлять непосредственный мониторинг температуры в режиме реального времени, но и благодаря наличию встроенной энергонезависимой памяти температурных уставок, могут обеспечивать приоритетную оперативную сигнализацию в 1-Wire-линию о факте выхода контролируемого параметра за пределы заданных значений.

Особенности.

- Уникальный 1-Wire требует только одного провода для коммуникаций.
- Каждое устройство имеет уникальный 64-битный серийный номер, хранящийся в памяти устройства.
- Возможность многоточечных измерений упрощает создание приложений с распределённым измерением температуры.
- Не требуются внешние компоненты.
- Может питаться от линии данных. Диапазон напряжений питания от 3.0V до 5.5V.
- Диапазон измеряемых температур от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .
- Точность  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ .
- 9-битное разрешение термометра.
- Время преобразования температуры до 750 мс (макс).
- Задаваемые пользователем энергонезависимые установки тревог.
- Команда поиска тревоги определяет и адресует устройства, температура которых превысила запрограммированные пределы.
- Приложения, включающие термостатический контроль, промышленные системы, потребительские товары, термометры, или любые чувствительные к температуре системы.

Цифровой термометр DS18S20 предоставляет 9-битное измерение температуры по Цельсию и имеет функцию тревоги с энергонезависимыми, задаваемыми пользователем верхней и нижней точками триггеров. Устройство DS18S20 общается с внешним миром с использованием шины 1-Wire, по определению требующей только одной линии для данных (и «землю») для

общения с центральным микропроцессором. Цифровой термометр имеет диапазон измерения температуры от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  и точность до  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Кроме этого, DS18S20 может запитываться непосредственно от линии данных (“parasite power”), что устраняет необходимость в дополнительном внешнем источнике питания.

Каждое устройство DS18S20 имеет уникальный 64-битный серийный номер, позволяющий нескольким DS18S20s функционировать на одной шине 1-Wire. Таким образом, упрощается использование одного микропроцессора или микроконтроллера для управления большим количеством DS18S20, распределённым по значительному пространству. Приложения, в которых могут быть полезны эти особенности, включают климатический контроль, температурный мониторинг внутри зданий, оснащения, или оборудования, и системы мониторинга и контроля процессов [48].

Операция — измерение температуры.

Основная функциональность устройства DS18S20 это температурный датчик прямого преобразования. Выход датчика имеет 9-битное разрешение, что соответствует шагу температуры в  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Устройство DS18S20 при включении питания находится в малопотребляющем состоянии простоя; для запуска измерения температуры и аналого-цифрового преобразования, мастер-устройство должно послать команду Convert T [44h]. По завершению преобразования, измеренное значение температуры сохраняется в 2-байтовом регистре температуры в памяти устройства и DS18S20 возвращается в состояние простоя.

Операция — сигнализация тревоги

После выполнения DS18S20 преобразования температуры, значение температуры сравнивается с двумя пользовательскими значениями уставок температуры, хранящихся в 1-байтовых регистрах TH and TL.

Знаковый бит (S) индицирует положительное или отрицательное значение: для положительных чисел  $S = 0$  и для отрицательных  $S = 1$ . Регистры TH и TL энергонезависимы (используется EEPROM) так что они сохраняют данные при

выключении устройства. Регистры TH и TL могут быть доступны как байты 2 и 3 памяти устройства.

Память устройства состоит из набора ячеек SRAM и энергонезависимыми EEPROM ячейками для значений верхней и нижней уставок по температуре.

Если функция тревоги не используется, регистры уставок TH и TL могут использоваться как память общего назначения.

Дорожный радар Wavetronix HD Digital Wave Radar [49] представлен на рисунке 1.11.

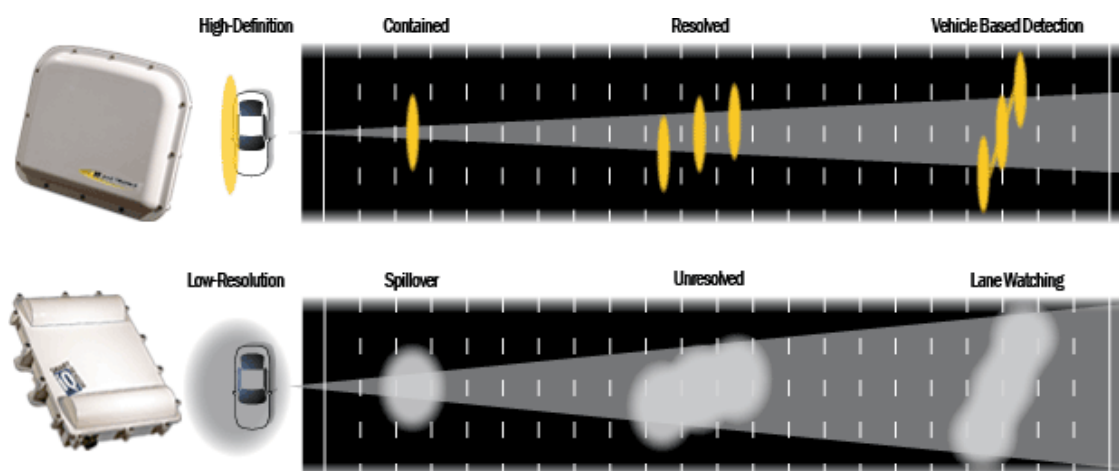


Рисунок 1.11 - Дорожный радар Wavetronix HD Digital Wave Radar [49]

Данный дорожный радар представляет собой законченное, монтируемое на опорах решение для обнаружения автомобиля, определения его типа, определения полосы автодороги, на которой он находится, направления движения автомобиля, определения скорости движения автомобиля – то есть, полного контроля дорожной загрузки в данной точке автодороги.

Устройство хранит, вычисляет и выдаёт по последовательному порту данные по 22 полосам дороги включительно: интервальные (средняя скорость, средний разрыв, распределение по скоростям), мгновенные (временная метка, полоса, скорость, длина, класс). Для точного определения параметров автомобилей устройство использует фирменную технологию с двумя радарами.

Маломощный датчик освещённости с повышенной чувствительностью Maxim Integrated MAX44007 [50] представлен на рисунке 1.12.

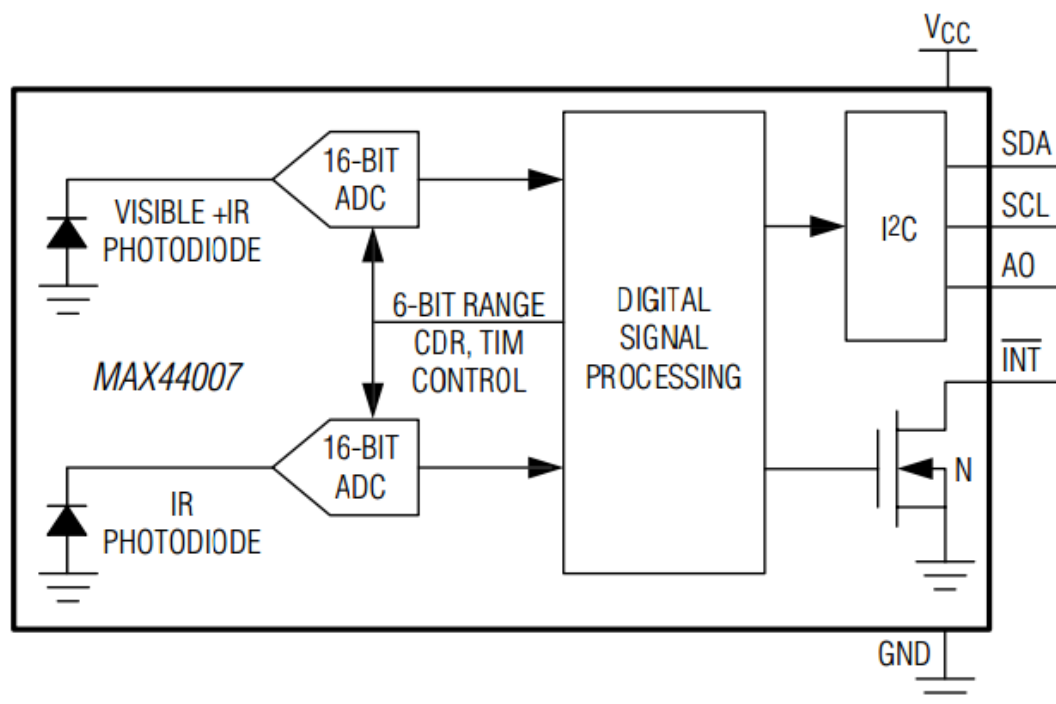


Рисунок 1.12 - Маломощный датчик освещённости с повышенной чувствительностью Maxim Integrated MAX44007 [50]

Данный датчик использует технологию с двумя преобразователями видимого и инфракрасного диапазона и только инфракрасного, для получения результата, коррелирующего с человеческим зрением, неспособным воспринимать инфракрасный спектр. В устройстве производится высокоточная оцифровка сигналов с двух преобразователей и цифровая обработка с вычитанием из сигнала видимого и инфракрасного диапазонов инфракрасного сигнала, полученного со второго преобразователя. Результат измерений доступен по цифровому интерфейсу I2C.

Основные характеристики.

- Широкий динамический диапазон 0.025 Лк – 104.448 Лк
- Малые размеры 2 мм на 2 мм
- Напряжение питания от 1.7В до 3.6В
- Температурный диапазон от -40С до +85С
- Повышенная чувствительность под затемнённым стеклом
- Разрядность АЦП 16 бит

- Минимальное время преобразования 100 мс

Упомянем также 16-битный цифровой датчик температуры с интерфейсом I2C Analog Devices ADT7420 [51].

Большинство описанных здесь датчиков предоставляет несколько различных измеряемых величин. Также датчики предоставляют цифровой выход данных, в различных видах. Некоторые датчики используют выдачу сигналов, в зависимости от превышения заранее заданных уставок. Кроме этого, для ряда моделей возможно конфигурирование режима работы.

По указанным моделям можно сформировать следующий список задействованных функций: конфигурирование, цифровой вывод измеренных данных, контроль значений, внешняя сигнализация.

### **1.3.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ФУНКЦИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Рассмотрим перечень функций интеллектуальных датчиков с учетом их анализа другими авторами, например, Селивановой, Ицкович, Тесленко, Войтович [2, 3, 35, 37, 38, 40, 41, 42].

Интеллект датчиков, как правило, обеспечивает выполнение некоторого подмножества из следующих функций:

- автономный (необслуживаемый) режим работы в течение временных периодов от нескольких часов до нескольких месяцев;
- обработку и хранение больших объёмов входных данных
- высокую стабильность метрологических характеристик в течение длительных интервалов времени;
- устойчивость к воздействию внутренних, внешних помех и сбоев;
- повышение точности датчиков и коррекция погрешностей;
- самотестирование;



- самообучение с элементами искусственного интеллекта;
- коммутация (интерфейсы передачи данных).

К числу дополнительных функций относятся:

- обеспечение повышенной надёжности при работе в тяжёлых климатических условиях;
- минимизация энергопотребления от автономных гальванических источников питания;
- коррекция погрешности и возможность автокалибровки измерительных каналов;
- аппаратная и программная фильтрация входного сигнала с целью уменьшения помех;
- реализации режима периодической подачи и отключения питания;
- использование сторожевого таймера для предотвращения потери программного управления;
- использование статических оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) с резервированием питания;
- герметизация корпуса;
- многократное измерение параметров.

Особое внимание уделяется обеспечению режима минимизации энергопотребления за счёт следующих средств:

- использование элементной базы с малым энергопотреблением;
- введение в общую структуру устройства систем управления режимами энергопотребления (например, менеджеров питания);
- выбор минимальной тактовой частоты контроллера;
- использование режимов приостановки, полной остановки или выключения питания во время работы относительно медленнодействующих периферийных устройств;
- использование экономных преобразователей постоянного напряжения.

Кроме обычных функций восприятия искомой величины и преобразования сигнала, современные интеллектуальные датчики (ИД) выполняют ряд других

функций, существенно расширяющих их возможности и улучшающих их технические характеристики. Далее рассмотрены эти функции, которые в той или иной степени полноты свойственны современным ИД:

1. Преобразования;
2. Конфигурирования;
3. Форматирования;
4. Управляющие.

В процессе проектирования встраивались и другие функциональные возможности, такие как самоконтроль или самокалибровка. Датчики построенные таким образом обладают множеством достоинств, особенно в плане повышения надёжности и снижения затрат на установку и техобслуживание. Состояние датчика контролируется путём сравнения реального выхода с ожидаемой величиной, полученной на основе заранее известных соотношений [39].

Задачи интеллектуализации измерительных датчиков заключаются в реализации следующих интеллектуальных функций:

1. Применение методов искусственного интеллекта, информационных технологий при разработке интеллектуальных датчиков, получение измерительной информации в которых осуществляется в условиях неопределённости.

2. Возможность самопроверки, заложенной в алгоритмическом обеспечении ИД, коррекция выходной информации с датчиков при воздействии дестабилизирующих факторов.

3. Универсальность интеллектуальных датчиков, которая создаётся благодаря формированию базы знаний для конкретной предметной области с использованием микроконтроллера и разработке конструкции датчика, позволяющей использовать набор измерительных ячеек датчиков и осуществлять выбор измерительной ячейки в соответствии с функциональным назначением ИД и методом измерения определяемых параметров.

4. Осуществление интеллектуальной процедуры оптимизации режимно-энергетических параметров измерений и контроля свойств исследуемых материалов в условиях неопределённости.

5. Разработка программного обеспечения измерительных датчиков, включающее программирование применяемых методов измерения, алгоритмов, измерительных процедур, методов метрологического анализа, которое прошивается в память микроконтроллера ИД.

6. Реализация интеллектуальной процедуры контроля исходного состояния измерительного датчика, т.е. контроля параметров первичных измерительных преобразователей (ПИП), например термопар при контроле теплофизических свойств материалов, сопротивления нагревательных элементов, «нуля» на выходе операционных усилителей, применяемых при сигналах микровольтового уровня из ПИП. Контроль осуществляется по соответствующим значениям, заложенным в систему допускового контроля, программным способом.

7. Увеличение эксплуатационного и метрологического ресурсов интеллектуальных датчиков предлагается увеличить за счёт разработки оригинальных надёжных конструкций датчиков, позволяющих исключить механическое повреждение, например, первичных измерительных преобразователей, нагревательных элементов и подложки в измерительном зонде при контроле теплофизических свойств материалов. Кроме того, необходимо применять высокостабильные радиоэлементы в измерительных цепях датчика с малым коэффициентом старения и высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов [37].

Данные функции можно разделить на несколько основных блоков: преобразования, информационный, конфигурирования, контроля, диагностики, управления. Воспользовавшись определениями из [3, 38, 41], автором предлагается следующая классификация функций интеллектуального датчика.

#### А. Функции преобразования

- восприятие физической величины

- дополнительные преобразования – усиление, стандартизация уровней аналогового выхода сенсора, линеаризация, фильтрация, расчёт выходной величины
- преобразование электрической величины на выходе сенсора (аналоговое напряжение, ток, частота) в код
- коррекция результатов с учётом изменения параметров окружающей среды (температуры или давления).

#### Б. Функции информационные

Выдача информации о свойствах и характеристиках датчика, его настройках, накопленных данных, текущих измеренных данных. По запросу в систему передаются:

- тип датчика
- заводской номер
- основные технические характеристики
- установленный диапазон измерения
- установленная шкала
- параметры настройки сенсора
- идентификатор рабочей версии программного обеспечения
- архив метрологических проверок
- срок очередной поверки и т.д.
- архив текущих измеренных и/или вычисленных величин (с привязкой ко времени)
- последние измеренные значения

Также прибор может самостоятельно выдавать на шину измеренные значения и сигналы превышения уставок:

- трансляция последних измеренных значений
- трансляция статуса уставок

#### В. Функции конфигурирования

С помощью этих функций осуществляется формирование и дистанционная модификация настроечных параметров датчика:

- диапазон и единицы измерения
- интервал измерения
- параметры фильтров и т.п.

#### Г. Функции контроля и прогнозирования

Функции этой группы (иногда называемые функциями форматирования) выполняют:

- анализ изменений измеряемой величины
- анализ изменений состояния среды измерений
- контроль выхода значений измеряемой величины за допустимые нормы
- контроль выхода значений параметров окружающей среды за допустимые нормы

По результатам выполнения функций контроля и прогнозирования могут изменяться режимы работы датчика и системы.

#### Д. Функции самодиагностики

При возникновении неисправностей, сбоев в работе датчика самодиагностика позволяет установить причину и место неисправности, возможно также определение факта превышения погрешности допустимого значения и т.д. Интеллектуальный датчик может выдавать до 30-ти различных диагностических сообщений, содержащих информацию о текущем состоянии датчика, использование которых облегчает и ускоряет его обслуживание, способствует повышению надёжности функционирования системы. Эти сообщения делятся на 2 типа:

- некритические, когда требуется обслуживание датчика, но выдаваемые им значения могут использоваться для управления;
- критические – выходные данные неверны, требуется немедленное вмешательство для прекращения использования показаний датчика

(может быть реализован режим работы, в котором датчик может сам перевести свой выход в безопасное для обслуживаемого процесса состояние).

### Е. Функции управляющие

Обычным датчикам несвойственно выполнение функций управления. Но поскольку в интеллектуальном датчике находятся и чувствительный элемент, и аналого-цифровой преобразователь, и микропроцессор, то достаточно добавить канал вывода и доработать программное обеспечение, чтобы датчик превратился в локальную и компактную систему управления, оставаясь по-прежнему источником информации для верхнего уровня системы. Подобные устройства, называемые актюаторами, выполняют функции:

- автоматических регуляторов, реализующих все классические алгоритмы (P, I, PI, PD, PID)
- устройств блокировки
- устройств автоматического включения/отключения и т.п.

Все эти функции становятся возможными для реализации в миниатюрных размерах благодаря развитию полупроводниковой и микроконтроллерной отраслей. За последние годы при существенно уменьшившемся потреблении энергии значительно выросла вычислительная мощность, при сохранении или уменьшении относительных размеров кристаллов и корпусов микроконтроллеров.

Так, например, для классических 8-битных микроконтроллеров с архитектурой 8051 производительность повысилась более чем в 12 раз, при снижении энергопотребления более чем на 80%. Производительность 8-битных микроконтроллеров может достигать 20 MIPS и более. Производительность 32-разрядных микроконтроллеров легко достигает значений в сотни MIPS.

Крайне важно отметить, что параллельно шло архитектурное и функциональное развитие микроконтроллеров, и сейчас это уже мощные 8-, 16-,

32-разрядные системы на чипе (SoC), куда интегрированы АЦП, ЦАП, память, различные интерфейсы обмена данными.

Таким образом, технологическое развитие является предпосылкой для успешного выполнения цели данной работы.

## **ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ: ЗАВИСИМОСТИ И УРАВНЕНИЯ**

### **2.1 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И ДАТЧИКИ СО СЛОЖНЫМИ ЗАВИСИМОСТЯМИ**

Предлагается более точное определение многофункционального датчика, основанное на классификации функций интеллектуальных датчиков и анализе определений из разных источников [1, 2, 5, 39, 40]. При этом в качестве основы для построения таких датчиков можно использовать различные первичные преобразователи, как с простой линейной зависимостью, так и с более сложными зависимостями. Для того чтобы можно было в дальнейшем работать с преобразователями со сложными зависимостями, проводится анализ примеров сложных зависимостей преобразователей.

#### **2.1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

В современной литературе присутствуют различающиеся определения многофункциональных датчиков. Приведём несколько определений подобных датчиков.

Многофункциональные датчики – это датчики, в которых формируются и используются одновременно несколько различных первичных информационных сигналов, имеющих разную физическую природу [39, 40].

Многофункциональные датчики могут помимо основной функции (восприятие величины и формирование измерительного сигнала) выполнять ряд дополнительных функций, таких как, например, функции фильтрации, обработки аналоговых сигналов и т. п. Другими словами, многофункциональный датчик выполняет несколько измерительных функций [1].



Согласно [5], датчики с микроконтроллером способны выполнять цифровую обработку сигнала сенсора, обеспечивающую компенсацию уникальности сенсорного элемента, фильтрацию помех и ложных срабатываний, учёт параметров влияния, хранить в памяти датчика градуировочные таблицы, вычислять измеряемые величины в стандартных аппаратно-независимых единицах, хранить накопленные результаты и архивы событий.

По работе [2], многофункциональными датчиками считаются многофункциональные программируемые измерительные средства, имеющие связи со стандартными полевыми сетями. Под многофункциональностью в данной работе понимается выполнение любых других функций, кроме обычных функций восприятия искомой величины и преобразования сигнала (функции преобразования, самодиагностики, информационные функции и другие).

Как видно, в первом определении многофункциональным датчиком называется датчик, измеряющий несколько величин. По версии автора, более корректными являются остальные определения. Необходимо добавить, что авторы источника [1] различают многомерные и многофункциональные датчики, под многомерными понимаются датчики, воспринимающие несколько входных величин.

Учитывая приведенный выше перечень функций интеллектуальных датчиков, сформулируем определение многофункционального датчика.

В данной работе под многофункциональным интеллектуальным датчиком понимается интеллектуальный датчик, содержащий один или несколько первичных преобразователей, выполняющий основную измерительную и дополнительные функции: анализа (прогнозирования) и управления. На рисунке 2.1 показана диаграмма взаимосвязи понятий «интеллектуальный датчик» и «многофункциональный интеллектуальный датчик».

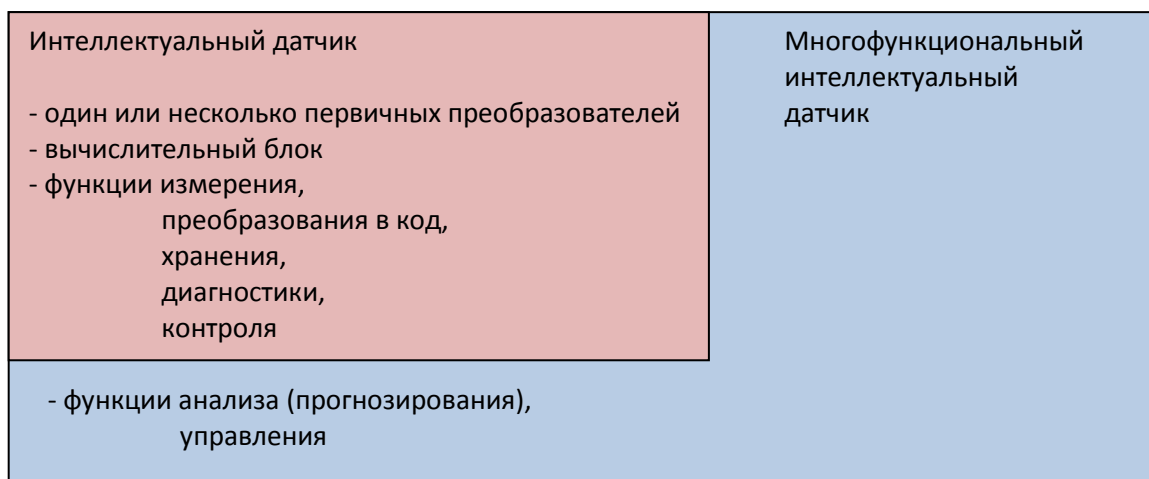


Рисунок 2.1 - Диаграмма понятий интеллектуальный и многофункциональный интеллектуальный датчики

### 2.1.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ГАЗОВЫХ ДАТЧИКОВ

К многофункциональным датчикам со сложными зависимостями относятся, в частности газовые датчики. Для исследования были выбраны газовые датчики достаточно известной фирмы Figaro.

Датчик углекислого газа TGS4160 [52] слабо зависит от влияния температуры окружающей среды и изменения влажности. Выходная величина – изменение ЭДС относительно значения ЭДС при определённой концентрации углекислого газа, измеряемой в ppm.

Графики зависимостей представлены на рисунках 2.2 – 2.4.

Таблицы значений приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 - Таблица значений функции преобразования датчика TGS4160

Концентрация газа, ppm	EMF, mV
350	0
1000	30
3000	62
10000	95
30000	129
50000	145

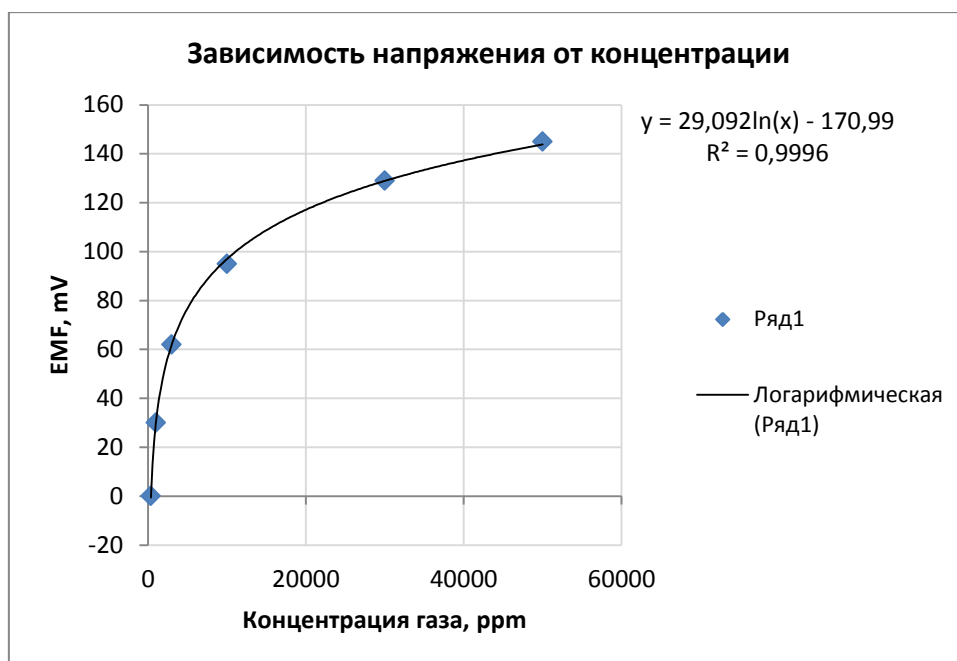


Рисунок 2.2 - График функции преобразования датчика TGS4160

Таблица 2.2 - Таблица значений зависимости ЭДС и разницы ЭДС от относительной влажности

Relative Humidity, %	$\Delta$ EMF(mV)	EMF (mV)
20	295	409
30	299	406
50	300	404
70	301	402
90	302	404
95	302	405

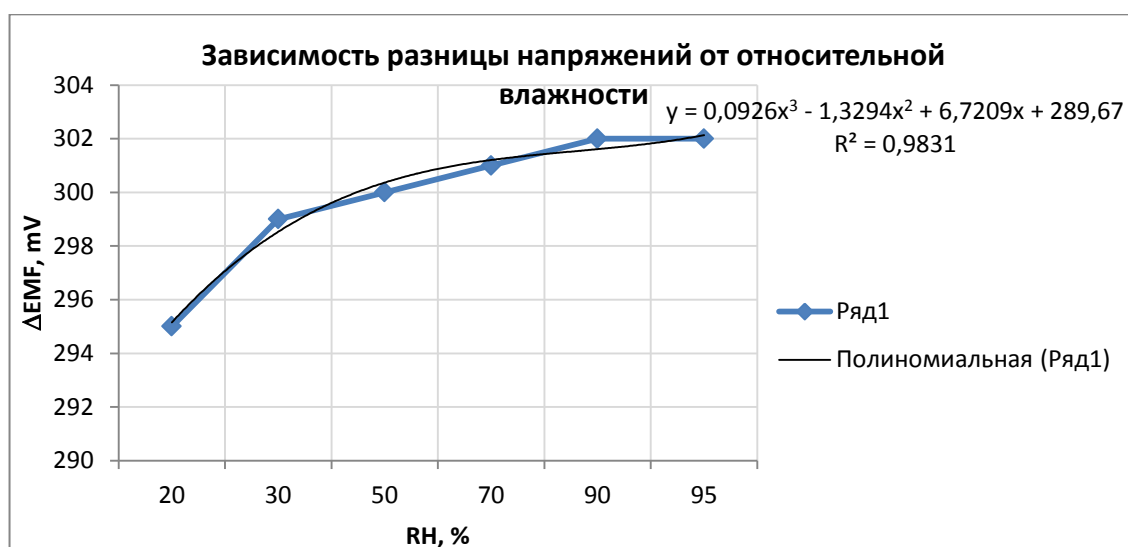


Рисунок 2.3 - График зависимости разницы напряжения от относительной влажности

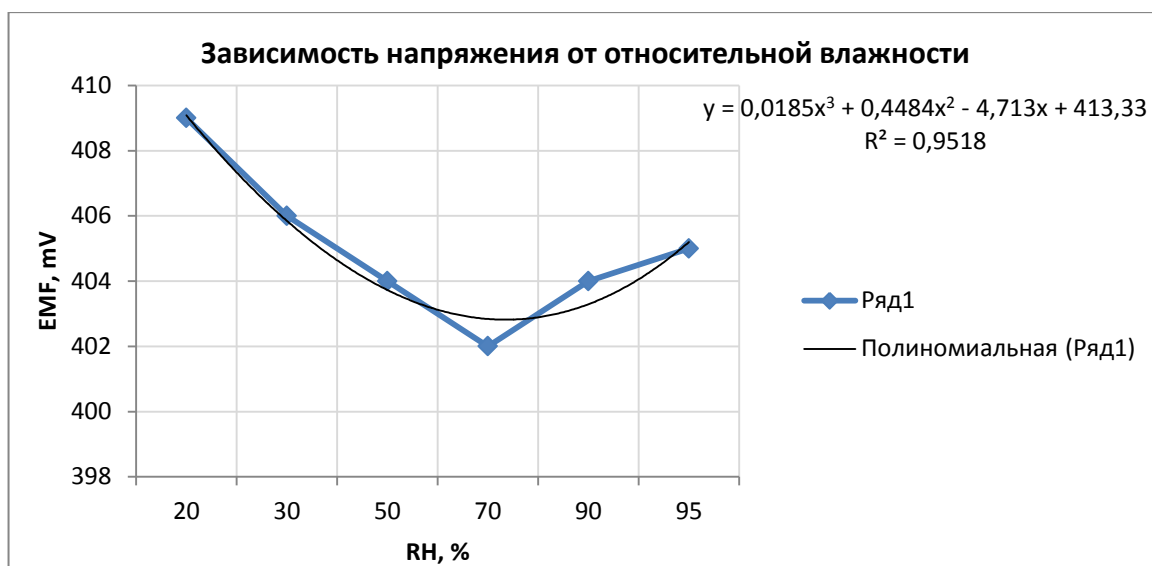


Рисунок 2.4 - График зависимости напряжения от относительной влажности

Датчик TGS2610 [53] предназначен для детектирования взрывоопасных и легковоспламеняющихся газов, таких как этанол, изобутан, водород, метан. При этом показания датчика зависят от температуры окружающей среды и влажности.

Выходная величина – изменение сопротивления относительно значения при определённой концентрации, измеряемой в ppm.

Графики зависимостей представлены на рисунках 2.5 – 2.8.

Таблицы значений приведены в таблицах 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3 - Таблица значений функции преобразования датчика TGS2610

Концентрация газа, ppm	$R_s/R_0$
300	6
3000	2
10000	1

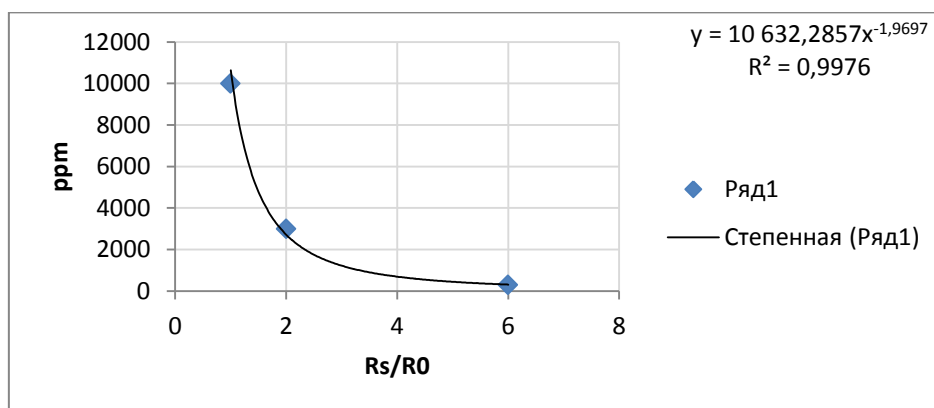


Рисунок 2.5 - График функции преобразования датчика TGS2610

Таблица 2.4 - Таблица значений зависимости от температуры и влажности датчика TGS2610

Rs/RO		Влажность, RH, %			
		35	50	65	100
Температура, t, gradC	10	1,9	1,55	1,25	1,1
	20	1,6	1,25	1	0,85
	30	1,3	0,92	0,79	0,67
	40	0,99	0,75	0,61	0,48

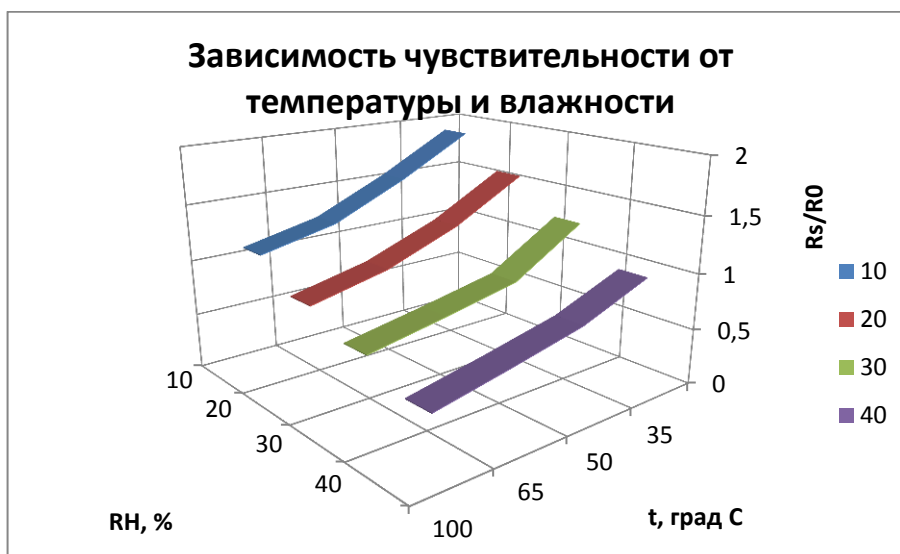


Рисунок 2.6 - Сводный график зависимостей чувствительности от температуры и влажности

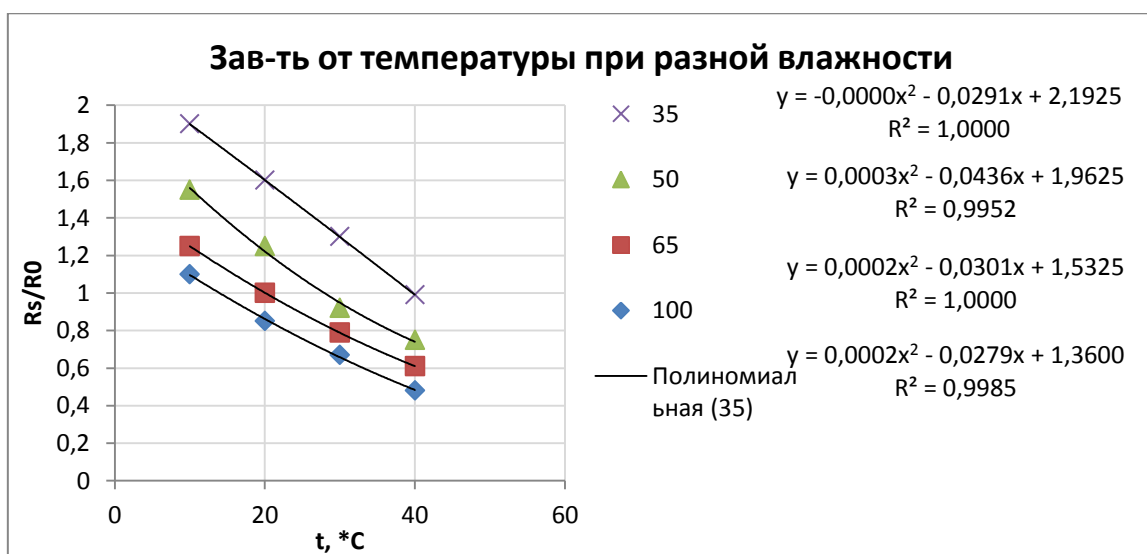


Рисунок 2.7 - График зависимостей от температуры при различной влажности для датчиков TGS2610

Для получения этих зависимостей производилась оценка показаний датчиков по указанному в спецификациях конкретного датчика графику функции преобразования датчика. Оценка зависимости показаний от изменения внешних параметров проводилась аналогичным образом. Далее, для получения аналитического выражения, в приведённых примерах использовались следующие виды аппроксимации в Microsoft Excel: экспоненциальная, степенная, полиномиальная и линейная.

Полиномиальная аппроксимация в Excel строится по методу наименьших квадратов.

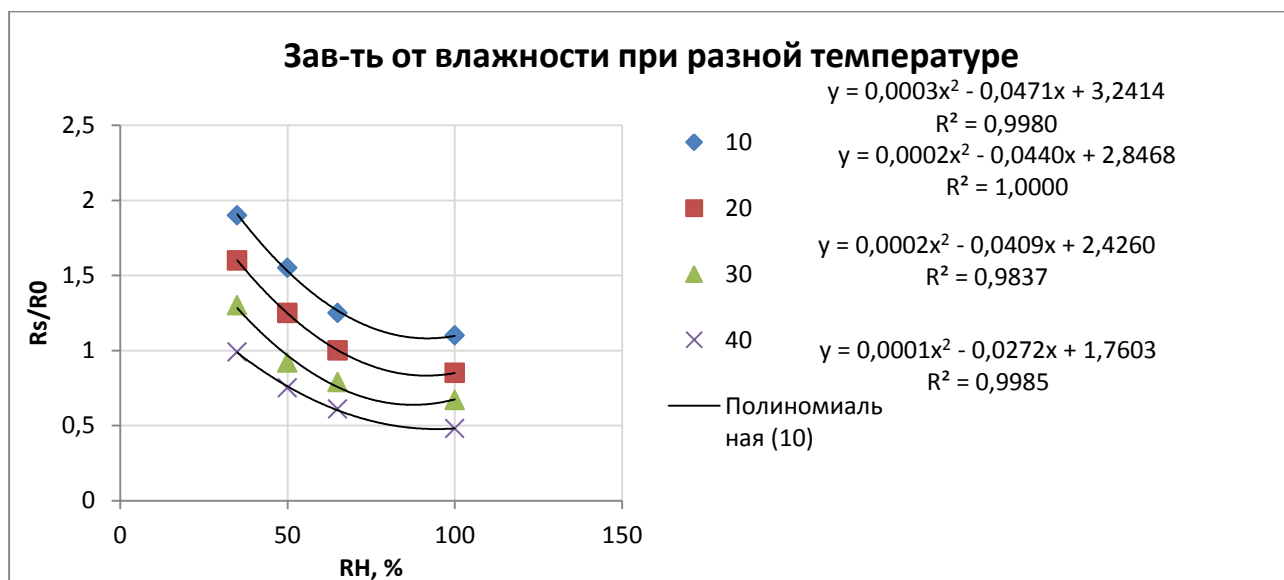


Рисунок 2.8 - Графики зависимостей от влажности при различной температуре для датчиков TGS2610

Датчик TGS2442 [54] производства Figaro предназначен для обнаружения газа CO. Его достоинства – низкое энергопотребление и высокая чувствительность к CO.

Графики зависимостей представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

Таблица значений приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Таблица значений чувствительности датчика

Концентрация газа, ppm	$R_s/R_0$
20	4
100	1
120	0,25
1000	0,08

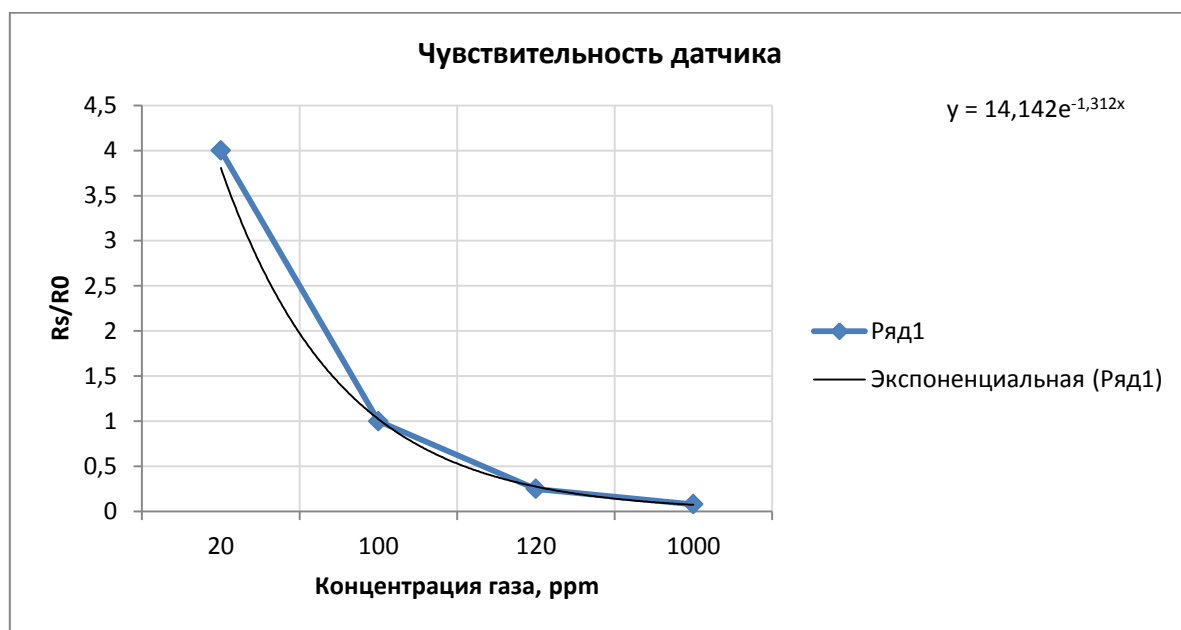


Рисунок 2.9 - График зависимости чувствительности датчика от концентрации

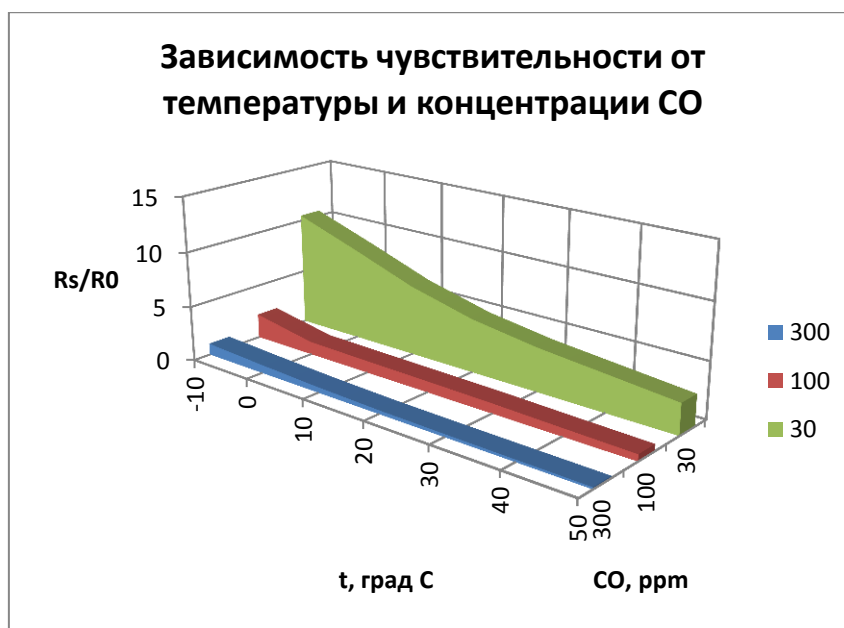


Рисунок 2.10 - Зависимость чувствительности от температуры при разной концентрации CO

Датчик SHT75 [55] производителя Sensirion предназначен для измерения влажности и температуры. Его достоинства – цифровой выход, малое энергопотребление.

График зависимости представлен на рисунке 2.11.

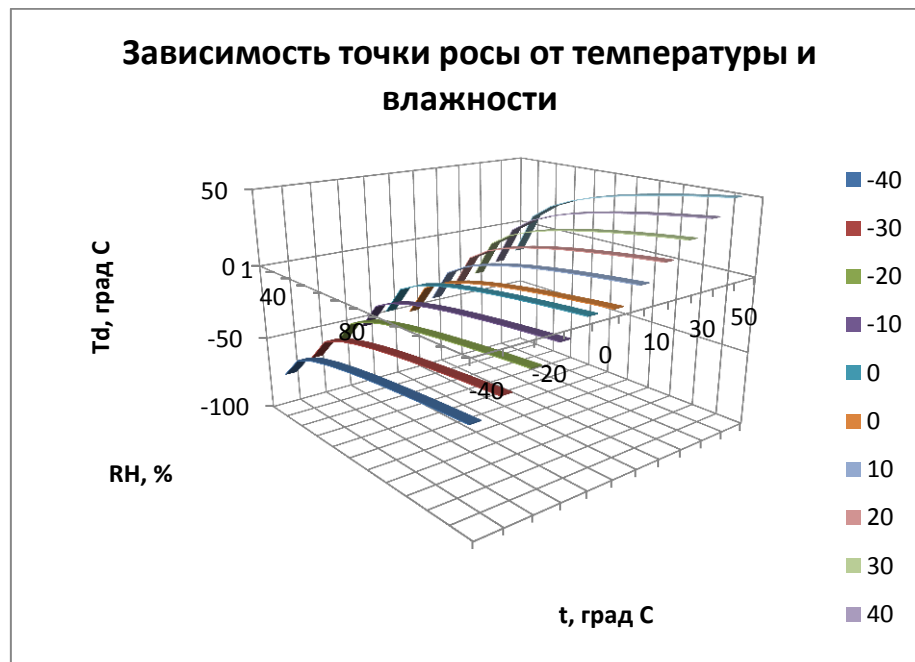


Рисунок 2.11 - График зависимости точки росы от температуры и влажности

Таким образом, кроме основной линейной зависимости (например, у датчиков влажности), у датчиков могут наблюдаться степенные, экспоненциальные и более сложные зависимости. Кроме этого, влияние внешних параметров (в частности, температуры и влажности) может выражаться в семействе кривых, в данном примере – многочлен второй степени.

Важно отметить следующий момент. На настоящий момент характеристики датчиков производителями публикуются исключительно в графическом виде, как можно увидеть в любом т.н. «datasheet» на датчик. Разумеется, у самого производителя имеются все данные по испытаниям их датчиков, в цифровом виде, однако они недоступны для разработчиков и проектировщиков измерительных систем. Одна из целей данной работы заключается в том, чтобы все датчики либо публиковались с точными значениями своих характеристик в документации, либо содержали их в своей памяти в машинно пригодном виде.



Преимущество такого подхода, по мнению автора, заключается в том, что, зная характеристики датчика, измерительная система сможет сразу использовать его для своих задач, вне зависимости от его конкретных калибровочных характеристик.

### **2.1.3 ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ ДАТЧИКОВ**

Как было показано ранее, достаточно редко в процессе измерений, отсутствуют какие либо влияющие факторы. В общем виде, наиболее часто на процесс измерений влияют характеристики окружающей среды, в локальной точке измерений.

Для определения списка величин использовался канонический список из РМГ 29-2013 [56].

Например, для газовых датчиков полупроводникового типа дополнительные факторы, влияющие на стабильность и точность показаний (по [1] ):

- температура
- влажность относительная
- парциальное давление кислорода
- состав атмосферы, целевой газ
- инерционность при помещении/удалении в/из газовой среды
- инерционность при включении
- долговременная стабильность
- зависимость от напряжения нагревателя
- дрейф при длительном хранении
- испарения сопутствующих химических веществ (смазки и т.д.)
- агрессивная газовая среда
- вода и её фазовые состояния
- длительное пребывание в любой агрессивной среде

- вибрация, удары

В ряде работ была проведена классификация влияющих факторов, на разных основах. Здесь можно выделить работы Дж. Фрайдена [57], А.Ф.Котюка [37], Дж. Вульвета [38].

Для того чтобы можно было работать с влияющими факторами, был составлен их список, с учётом уже существующих.

Для составления списка были использованы работы: [37, 38, 47, 57-59].

Список влияющих факторов составлен на основе вида измеряемой величины. В пределах каждой категории (измеряемой величины) приводятся списки влияющих факторов, для каждого из основных видов преобразователей (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Основные влияющие факторы для датчиков различных величин

Температура	
Термометры сопротивления	Вибрация Самонагрев Влажность
Термопары	Температура окружающей среды Электромагнитное поле
Термисторы	Химическое воздействие (загрязнение)
Радиационные термометры (пирометры, тепловизоры)	Световое излучение Тепловое излучение
Волоконно-оптические датчики температуры	Механическое давление
Давление	
Абсолютного давления, избыточного давления, дифференциального (разности, перепада) давления, гидростатического давления, вакууметрического давления (разряжения), избыточного давления-разряжения	Температура Влажность Химическое воздействие Электромагнитное поле

Газовые	
Взрывоопасных газов (метан, пропан, водород, др.), токсичных газов (угарный газ, аммиак, сероводород), контроль вентиляции автомобиля (бензин, дизельное топливо), детекторы алкоголя, анализаторы органических растворителей, детекторы утечки фреона, детекторы пищевых испарений (алкоголь, водяной пар), контроля состояния воздуха (углекислый газ, загрязнители, кислород)	Температура Влажность Концентрация нецелевого/нецелевых газов Вибрация

Как можно увидеть в списке влияющих факторов, их можно разделить на два типа: связанные с объектом/средством измерения, и не связанные.

Данная работа посвящена анализу и учёту влияющих факторов, так или иначе связанных с измеряемой величиной или используемым первичным преобразователем. Влияющие факторы второго типа – инвариантны относительно используемых средств измерений и являются по своей природе помеховыми. Их влияние можно свести к минимуму грамотной конструкцией измерительного блока, фильтрацией и другими, хорошо изученными средствами. Поэтому факторы второго рода далее не рассматриваются.

Кроме основной линейной зависимости (например, у датчиков влажности), у датчиков могут наблюдаться степенные и экспоненциальные зависимости. Кроме этого, влияние внешних параметров (в частности, температуры и влажности) может выражаться в семействе кривых, например – многочлен второй степени.

Поскольку природа влияющих факторов известна, и поддаётся метрическому определению, то становится возможным описание данных факторов более формальным языком.

Влияющую зависимость в общем виде можно представить как систему, каждый член которой актуален на определённой области значений влияющей величины.

$$K = \begin{cases} \sum_{j=1}^{K0} a_{0j} \cdot \psi_{0j}(u), & A2 \in [a_1; a_2) \\ \sum_{j=1}^{K1} a_{1j} \cdot \psi_{1j}(u), & A2 \in [a_3; a_4) \\ \sum_{j=1}^{K2} a_{2j} \cdot \psi_{2j}(u), & A2 \in [a_5; a_6) \end{cases} \quad (2.1)$$

Здесь  $a_{0j}$ ,  $a_{1j}$ ,  $a_{2j}$  — коэффициенты, свои для каждой области влияния.

$\psi_{0j}(u)$ ,  $\psi_{1j}(u)$ ,  $\psi_{2j}(u)$  — базовые функции влияющей зависимости для каждой области.

$A2 \in [a_1; a_2)$  — область влияния,  $a_1$  и  $a_2$  — границы области влияния по влияющей величине.

Графически систему влияющих зависимостей можно представить на рисунке 2.12. Здесь изображён вариант, когда влияющие зависимости имеют различный вид на некоторой области определения, и одинаковый вид в остальной части области определения.

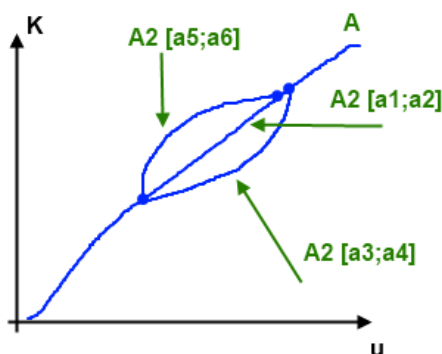


Рисунок 2.12 - Система влияющих зависимостей в графическом представлении

Теперь можно уточнить, что в данной работе влияющий фактор понимается как фактор окружающей среды, вызывающий такое изменение основной

характеристики датчика, которое может быть представлено в графическом или аналитическом виде.

Перечислим основные виды влияющих факторов: электрический, магнитный, механический, акустический, тепловой, оптический, ионизационный, химический.

## **2.2 УРАВНЕНИЕ И АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

### **2.2.1 ОБОБЩЁННОЕ УРАВНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

Для того чтобы унифицировать работу интеллектуального датчика, необходимо формализовать его функционирование. Как нам представляется, необходимо вычленить составляющие, влияющие на результат измерения. Затем, эти составляющие описать формальным языком, что позволит их систематизировать.

Непосредственно же формализация функционирования интеллектуального датчика разрешает:

- 1) получить уравнение, в котором видны все составляющие результата измерений;
- 2) закодировать характеристики датчиков в цифровом виде;
- 3) получить каталог составляющих результата измерения для использования в дальнейшем;
- 4) применить единое уравнение для унификации программного обеспечения интеллектуальных датчиков.

Без обобщённого уравнения нам пришлось бы каждый интеллектуальный датчик создавать «с нуля»: определять его параметры, составлять список влияющих параметров, заново кодировать уравнения зависимостей. Такие

затраты не только непроизводительны, но и влекут издержки в виде необходимости тестирования каждой версии программного обеспечения.

Цель же обобщённого уравнения – дать основу для создания датчиков с высокими характеристиками, гарантированной точностью результатов при сокращении затрат на их производство.

В поисках обобщённого уравнения интеллектуального датчика можно руководствоваться двумя подходами:

- 1) Обобщённое уравнение на основе статистических характеристик датчика;
- 2) Обобщённое уравнение на основе паспортной характеристики датчика.

Первый подход рассматривается, например, в работе [60].

Автором предлагается подход, основанный на анализе паспортной характеристики датчика [61]. Анализ заключается в определении уравнения преобразования в соответствии с его паспортными данными. Кроме основной характеристики, в уравнение, по мнению автора, должны входить следующие составляющие: корректирующее значение (учитывающее влияние других параметров окружающей среды), корректирующее значение, учитывающее временной дрейф показаний датчика, и значение, учитывающее калибровочную характеристику конкретного экземпляра датчика.

Основную характеристику можно определить либо эмпирически, либо теоретически. В первом способе нахождение сводится к испытаниям серии датчиков и нахождению уравнения кривой по результатам испытаний. Во втором способе, зная материал изготовления, используемые технические решения и физические явления, можно аналитически вывести основную характеристику, справедливую для всех экземпляров данной модели.

Основная характеристика датчика может быть записана:

$$A = F(\{U, I, R\}). \quad (2.2)$$

$A$  – отклик от измеряемой датчиком величины (интересующая нас величина),

$F$  – функция характеристики,

$U$ ,  $I$ ,  $R$  – электрические величины на выходе датчика, связанные с измеренной им величиной. Далее, для краткости, предполагается, что на выходе датчика используется напряжение  $U$ .

Функция характеристики может иметь линейный, степенной, экспоненциальный и более сложный вид. Поэтому представим основную характеристику как

$$A' = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \psi_i(u). \quad (2.3)$$

Здесь:

$A'$  – искомая величина,  $a_i$  – коэффициенты,  $\psi_i(u)$  – базовые функции.

Базовыми функциями могут являться функции вида:

$$S = a + b \cdot \ln(u), \quad (2.4)$$

$$S = a \cdot e^{k \cdot u}, \quad (2.5)$$

$$S = a \cdot u^k, \quad (2.6)$$

$$S = \sum_{i=0}^N a_i \cdot u^i \quad (2.7)$$

Запишем характеристику с учётом корректирующих факторов.

$$A = F(\{U, I, R\}) + K + Z \quad (2.8)$$

$K$  – фактор влияющей второстепенной величины,

$Z$  – фактор, обусловленный характеристиками конкретного экземпляра (калибровочная характеристика).

Фактор влияющей второстепенной величины можно представить в общем виде как

$$K = F(f(A_k)). \quad (2.9)$$

$A_k$  – влияющая величина,

$f(A_k)$  – передаточная функция влияющей величины для данного конкретного датчика,

$F(f(A_k))$  – функция преобразования.

Фактор калибровочной характеристики можно представить как

$$Z = Z(\{U, I, R\}) = \sum_{i=0}^N a_i x^i, \quad (2.10)$$

где  $x$  – значения в калибровочных точках,  $a$  – коэффициенты.

Как правило, данная функция представляется в виде таблицы значений.

На практике, влияющий фактор может быть одномерным и двумерным.

Запишем выражение для одномерной коррекции.

$$K = \sum_{j=1}^K a_j \cdot \psi_j(u). \quad (2.11)$$

Здесь  $\psi_j(u)$  также может быть из ряда (2.4), (2.5), (2.6), (2.7).

Запишем выражение для двумерной коррекции.

Учтём при этом, что влияющая функция может иметь как аналитическую зависимость от второй величины, так и табличную.

$$K = \sum_{j=1}^K a_j \cdot \psi_j(u, A2) \quad (2.12a)$$

$$K = \begin{cases} K = \sum_{j=1}^{K0} a_{0j} \cdot \psi_{0j}(u), A2 = a_0 \\ K = \sum_{j=1}^{K1} a_{1j} \cdot \psi_{1j}(u), A2 = a_1 \\ K = \sum_{j=1}^{K2} a_{2j} \cdot \psi_{2j}(u), A2 = a_2 \end{cases} \quad (2.12b)$$

Отдельно следует отметить влияние временного дрейфа на показания датчика.

Исходя из предположения, что временной дрейф не зависит от измеряемой величины, запишем

$$A' = F_1(U) + F_t(t) \quad (2.13)$$

$$A_t = F_t(t) \quad (2.14)$$

$A_t$  также можно представить в виде суммы базовых функций

$$A_t = \sum_{i=1}^N a_{ti} \cdot \psi_{ti}(t) \quad (2.15)$$

При этом возможно различать кратковременный и долговременный дрейф показаний, кратковременный дрейф – в течение часа после включения, и долговременный – общее время работы от суток и более.



Используя выражения (2.3), (2.10), (2.11), (2.15), перепишем общее уравнение (2.8)

$$A = F(u) + F_k(A_k) + F_t(t) + Z \quad (2.16)$$

$F(u)$  – основная характеристика,

$F_k(A_k)$  – коррекция с учётом влияющей величины,

$F_t(t)$  – коррекция с учётом временного дрейфа,

$Z$  – коррекция с учётом калибровочной характеристики.

Окончательный вид обобщённого уравнения:

$$A = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \psi_i(u) + \sum_{j=1}^{N_k} a_{K_j} \cdot \psi_{K_j}(u) + \sum_{i=1}^{N_t} a_{ti} \cdot \psi_{ti}(t) + \sum_{i=0}^N a_{zi} \cdot x^i \quad (2.17)$$

Полученное обобщённое уравнение интеллектуального датчика представляет собой уравнение преобразования, в котором учтены величины влияющих факторов, временного дрейфа, а также калибровочные данные преобразователей.

Обобщённое уравнение многофункционального интеллектуального датчика является основой для алгоритма работы этого датчика. При использовании данного уравнения можно представить характеристики первичных преобразователей и датчиков в цифровом виде. Благодаря этому, становится возможным создать такой алгоритм работы программного обеспечения многофункционального интеллектуального датчика, который был бы инвариантным к характеристикам конкретных первичных преобразователей [61].

Обобщённое уравнение позволит:

- учесть все влияющие факторы результата измерений и реализовать двух- или более мерную интерполяцию сложных зависимостей;
- закодировать составляющие в цифровом виде, для использования при измерениях;
- унифицировать программное обеспечение интеллектуальных датчиков;

- задавать характеристики интеллектуального датчика только путём изменения параметров уравнения, не изменяя его программы;
- добиться снижения затрат на проектирование и производство измерительных систем.

Проведём сразу оценку сложности вычислений обобщённым уравнением при разных объёмах коэффициентов.

Возьмём объёмы коэффициентов равными 1, 20, 50, сравнение будем проводить в общем виде, считая вид базовых функций одинаковым. Учтём при этом все составляющие обобщённого уравнения: основная характеристика, коррекция влияющего фактора, долговременная стабильность, калибровка.

Уравнение для объёма коэффициентов, равного единице:

$$A = a_1 \cdot \psi_1(u) + a_{K_1} \cdot \psi_{K_1}(u) + a_{t1} \cdot \psi_{t1}(t) + a_{z1} \cdot x^1 \quad (2.18)$$

Уравнение для объёма коэффициентов, равного десяти:

$$A = \sum_{i=1}^{10} a_i \cdot \psi_i(u) + \sum_{j=1}^{10} a_{K_j} \cdot \psi_{K_j}(u) + \sum_{i=1}^{10} a_{ti} \cdot \psi_{ti}(t) + \sum_{i=0}^{10} a_{zi} \cdot x^i \quad (2.19)$$

Уравнение для объёма коэффициентов, равного пятидесяти:

$$A = \sum_{i=1}^{50} a_i \cdot \psi_i(u) + \sum_{j=1}^{50} a_{K_j} \cdot \psi_{K_j}(u) + \sum_{i=1}^{50} a_{ti} \cdot \psi_{ti}(t) + \sum_{i=0}^{50} a_{zi} \cdot x^i \quad (2.20)$$

Можно видеть, что для уравнения с 50-ю коэффициентами увеличение объёма вычислений составит 5 крат, по сравнению с уравнением с 10-ю коэффициентами.

Теперь оценим разницу в точности вычислений для уравнений с разным объёмом коэффициентов.

Как было найдено при исследовании сложных зависимостей датчиков, коэффициент R аппроксимационных уравнений для степеней от 2 до 6 меняется на десятые-сотые (первый-второй знак после запятой). Для степеней выше 10 – улучшение точности составляет уже сотые процента и меньше. Учитывая, что найденные аппроксимационные уравнения входят в обобщенное уравнение в

качестве базовых функций, то использование для них коэффициентов выше 10 не имеет практического смысла – объём вычислений будет выше на порядок, при улучшении точности в пределах менее сотой процента.

Таким образом, можно заключить, что обобщённое уравнение мало подходит для задач с быстро протекающими процессами ( $t$  менее одной миллисекунды) или задач, требующих повышенной точности измерений. Основная область возможного применения – экология и контроль параметров окружающей среды; наблюдение и контроль состояния искусственных сооружений.

### **2.2.2 ОБОБЩЁННЫЙ АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

Как известно, детерминированным конечным автоматом называют такой автомат, в котором при любой данной последовательности входных символов существует лишь одно состояние, в которое автомат может перейти из текущего. Недетерминированный конечный автомат (НКА) отличается тем, что он может при поступлении символа переходить во множество состояний. Различаются НКА с пустыми переходами и с несколькими переходами из одного состояния, помеченные несколькими символами.

Применительно к обсуждаемому многофункциональному интеллектуальному датчику, является очевидным, что он имеет два основных состояния: конфигурирования, в котором происходит задание параметров интеллектуального датчика, и функционирования, в котором производится измерение и все остальные задачи (рисунок 2.13).

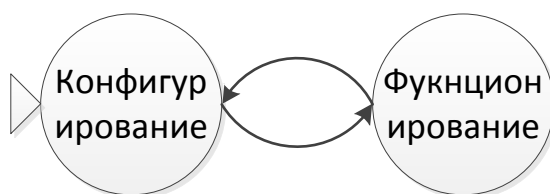


Рисунок 2.13 - Состояния интеллектуального датчика в первом приближении

Далее, рассмотрим каждое из основных состояний отдельно.

В процессе конфигурирования интеллектуальный датчик проходит состояния: пауза, приём посылки, отправка подтверждения приёма посылки (рисунок 2.14).

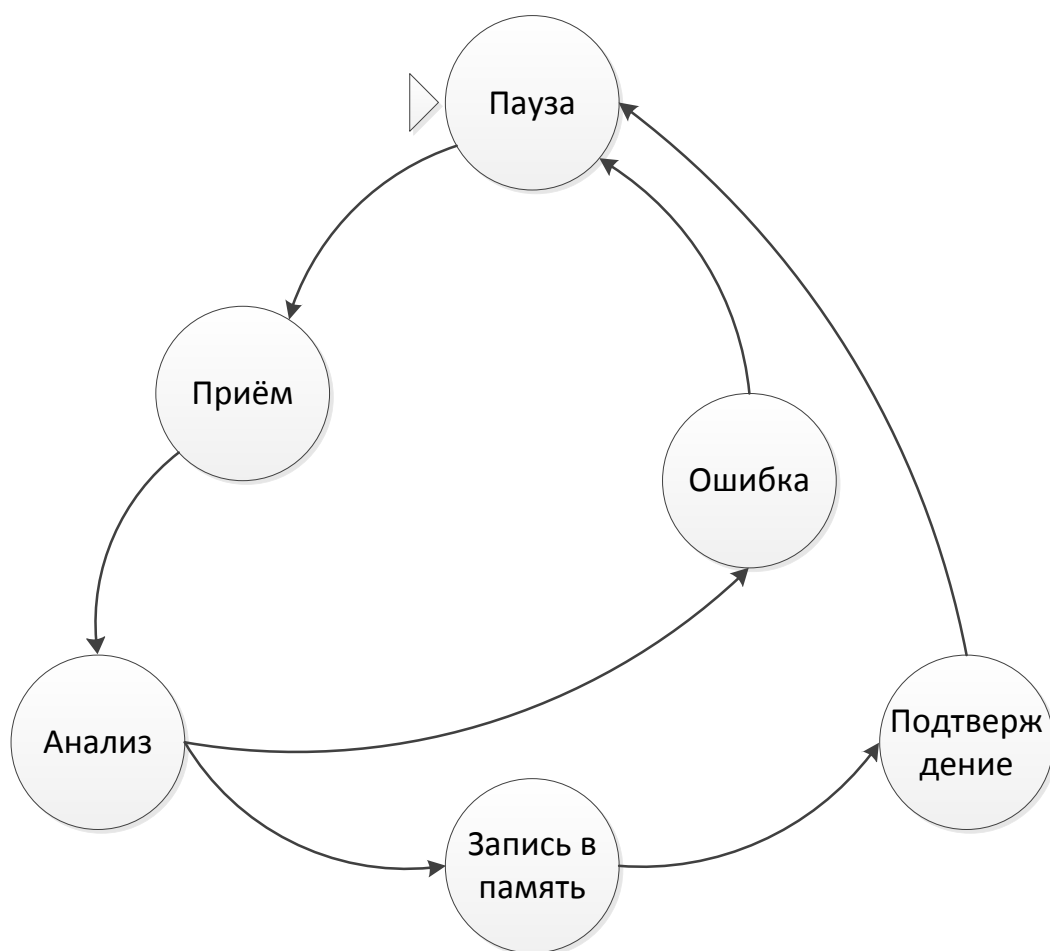


Рисунок 2.14 - Подробная схема состояния конфигурирования

Из состояния паузы возможен переход в состояние функционирования и обратно.

В процессе функционирования интеллектуальный датчик проходит фазы паузы между измерениями, собственно измерения, обработки данных и сохранения данных.

Подсостояние паузы в состоянии функционирования имеет переход к подсостоянию паузы в состоянии конфигурирования и обратно.

Теперь рассмотрим каждое из основных состояний чуть более подробно.

При конфигурировании необходимо предусмотреть ситуацию пересылки прибору некорректных данных.

Для основного состояния функционирования необходимо предусмотреть все фазы работы программы интеллектуального датчика: измерение, обработка данных, сохранение данных.

Согласно предложенному обобщённому уравнению, в фазе измерения может быть несколько стадий: измерение основной величины, измерение вспомогательной (влияющей) величины, учёт калибровочных данных, учёт длительности временного промежутка. Но измерения – это только одна из функций интеллектуального датчика, поэтому вторая фаза посвящена выполнению остальных функций. Кратко, здесь имеются стадии выполнения функций: информационных, конфигурирования, контроля и прогноза, самодиагностики, управления.

В общем виде, стадии измерения и стадии функций зависят от конкретной конфигурации интеллектуального датчика. Это означает, что какие-то стадии могут пропускаться, какие-то стадии зависеть от выполнения условий для входных параметров. Таким образом, можно зарисовать предварительную картину алгоритма как недетерминированного конечного автомата (рисунок 2.15).

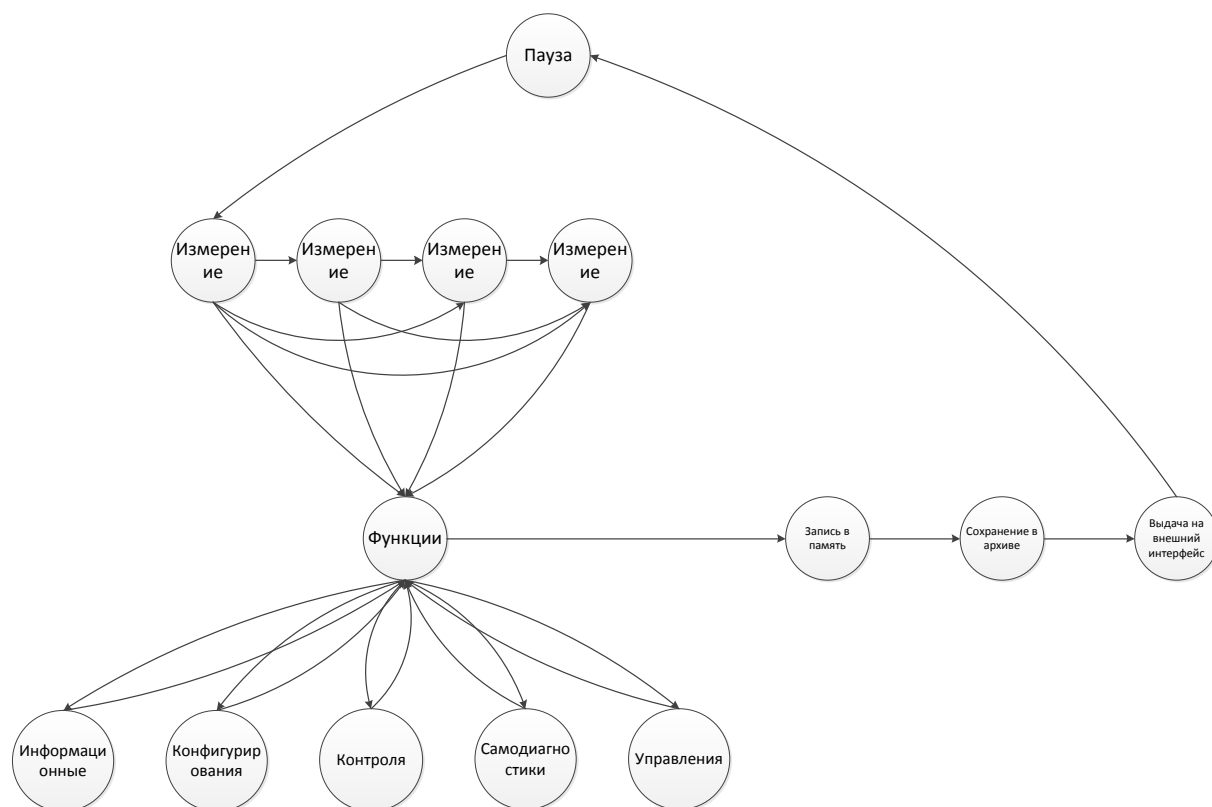


Рисунок 2.15 - Подробная схема функционирования без детерминизма

Для того чтобы обеспечить жёсткую детерминированность алгоритма (рисунок 2.16), нам придётся принять следующие допущения.

Допущение 1. Вся программа разбивается на фазы.

Допущение 2. В каждой фазе может быть несколько стадий.

Допущение 3. Стадия может выполняться или не выполняться, в последнем варианте управление передаётся следующей фазе.

Необходимо отметить, что переходы из одного состояния в несколько следующих в недетерминированной схеме (рисунок 2.15) не являются равновероятными, наоборот, каждый переход однозначно соответствует одному варианту входных условий. Это не совсем соответствует каноническому определению недетерминированного конечного автомата, поэтому получается некий промежуточный вариант – автомат является детерминированным конечным автоматом, когда каждому из нескольких переходов из одного состояния однозначно соответствует выполнение одного варианта условий для входных данных из всех вариантов условий.

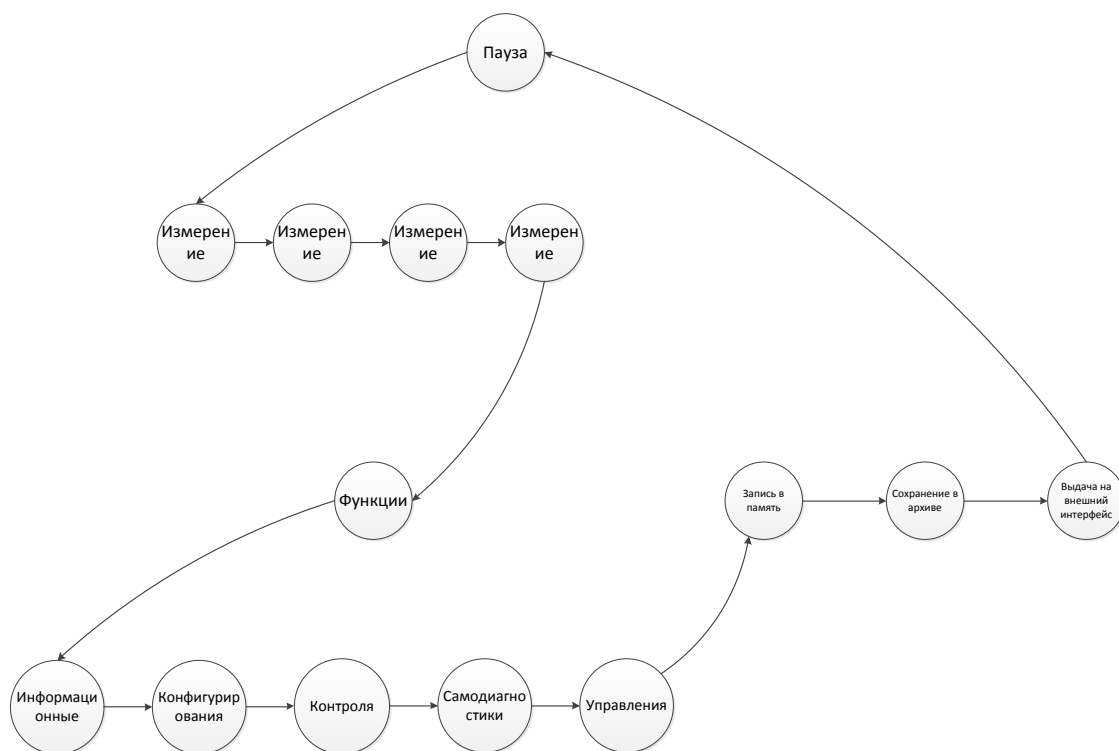


Рисунок 2.16 - Подробная схема функционирования детерминированного алгоритма

На самом деле, разрабатываемый интеллектуальный датчик предназначен для работы в разных условиях и в его задачу уже заложена коррекция показаний при изменении внешних условий. Для разных значений внешних условий будет выполняться та или иная схема алгоритма. Таким образом, для уникального набора параметров внешней среды схема алгоритма будет являться детерминированным конечным автоматом. При этом, в целом программа интеллектуального датчика является множеством, содержащим различные варианты детерминированных автоматов.

## **ГЛАВА 3 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДАТЧИК**

### **3.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

Для того, чтобы чётко разграничить абстрактный интеллектуальный датчик и датчик, являющийся предметом данной работы, необходимо ввести определение реконфигурируемого интеллектуального датчика.

Реконфигурируемый интеллектуальный датчик – интеллектуальный датчик, который может быть легко переконфигурирован для использования с другими первичными преобразователями и в других условиях применения без изменений его аппаратных и программных составляющих.

Характеристика «реконфигурируемый» означает, что эта особенность является ключевой для понимания датчика, способного работать в разных условиях и жизненный цикл которого может не ограничиваться одной измерительной задачей. Уточнение «без изменения аппаратных и программных составляющих» подразумевает, что не меняются ни основная программа датчика, ни его аппаратная конфигурация.

Подобный подход к построению систем ранее уже обсуждался, например, Груневегеном [62], который анализирует достоинства и недостатки данного подхода.

Понятие многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика (МРИД) включает в себя понятие многофункционального интеллектуального датчика. Взаимосвязь понятий интеллектуальных датчиков дана на рисунке 3.1.

Таким образом, понятие интеллектуального датчика входит в понятие многофункционального интеллектуального датчика, которое, в свою очередь,



является основой для понятия многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика.

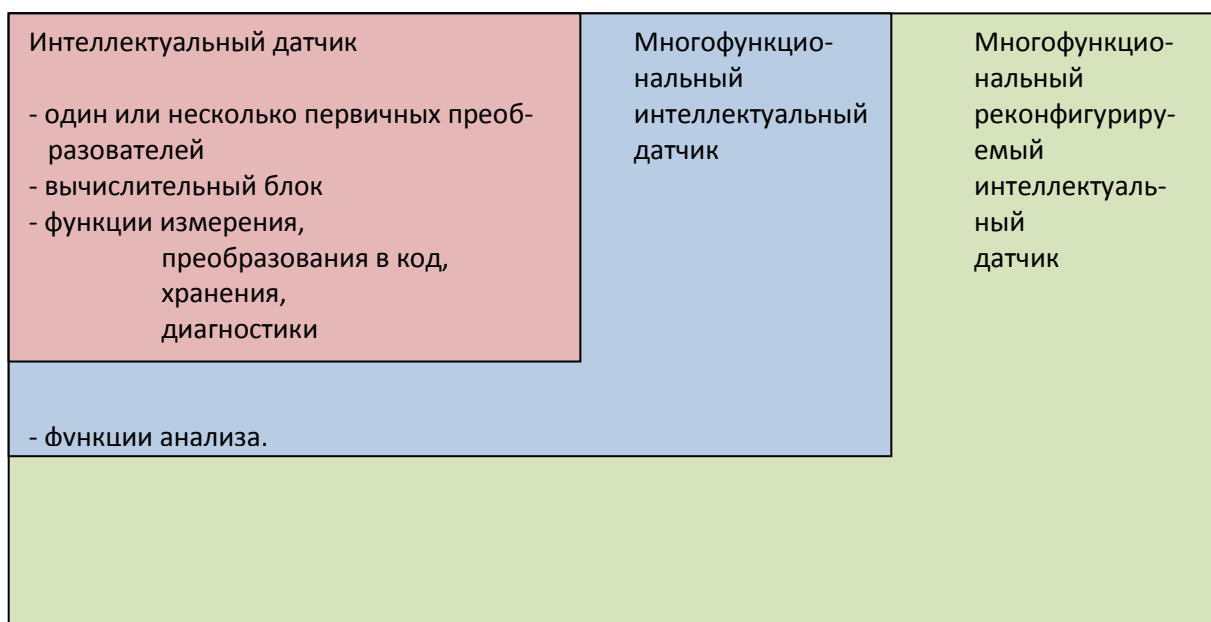


Рисунок 3.1 - Диаграмма взаимосвязи понятий интеллектуальных датчиков

### 3.2 СТРУКТУРА МРИД

В общем виде, МРИД состоит из двух компонентов: аппаратного и программного. Аппаратный компонент представляет собой плату, к которой подключается основной датчик и дополнительные датчики влияющих величин. Датчики могут быть как со своей памятью TEDS, так и без неё. Дополнительно может быть подключён один цифровой выход или несколько. На плате МРИД располагаются: микроконтроллер с флэш-памятью, АЦП и ЦАП, микросхемы интерфейсов с внешними вычислительными системами, аналоговая обвязка. Всю функциональность интеллектуального датчика реализует программа, выполняющаяся микроконтроллером.

Особенность данного решения заключается не столько в реализации интеллектуального датчика самого по себе способного корректировать показания в зависимости от условий окружающей среды, но прежде всего – в возможности

унифицированным образом работать с датчиками самых разных типов, используя базу данных со всей необходимой для проектировщика информацией. Это достигается за счёт того, что программа интеллектуального датчика реализует обобщённое уравнение и обобщённый алгоритм датчика. Система позволяет один и тот же интеллектуальный датчик наделить разным функционалом для выполнения конкретной задачи, или с одним и тем же первичным преобразователем создать разные интеллектуальные датчики. Исполнение интеллектуального датчика (в зависимости от предполагаемых целевых условий применения и решаемой задачи) может меняться, но процесс конфигурирования и проектирования, и само представление уравнений преобразования при этом не меняются.

Конфигурирование МРИД выполняется с помощью отдельной программной подсистемы на IBM PC, и позволяет наглядным образом спроектировать: основное уравнение преобразования, уравнения преобразования вспомогательных датчиков, указать калибровочные характеристики датчиков, указать условия применения уравнений корректировки, задать уставки, указать прочую функциональность датчика.

### **3.2.1 СХЕМА МРИД**

Функциональная схема состоит из четырёх блоков: преобразователя измеряемых величин, вычислительного ядра, преобразователя цифровых величин в аналоговые, блока интерфейсов.

Структурная схема показана на рисунке 3.2.

Первичный преобразователь (датчик/сенсор) – устройство, преобразующее неэлектрический сигнал в электрический, устройство, воспринимающее входное воздействие.

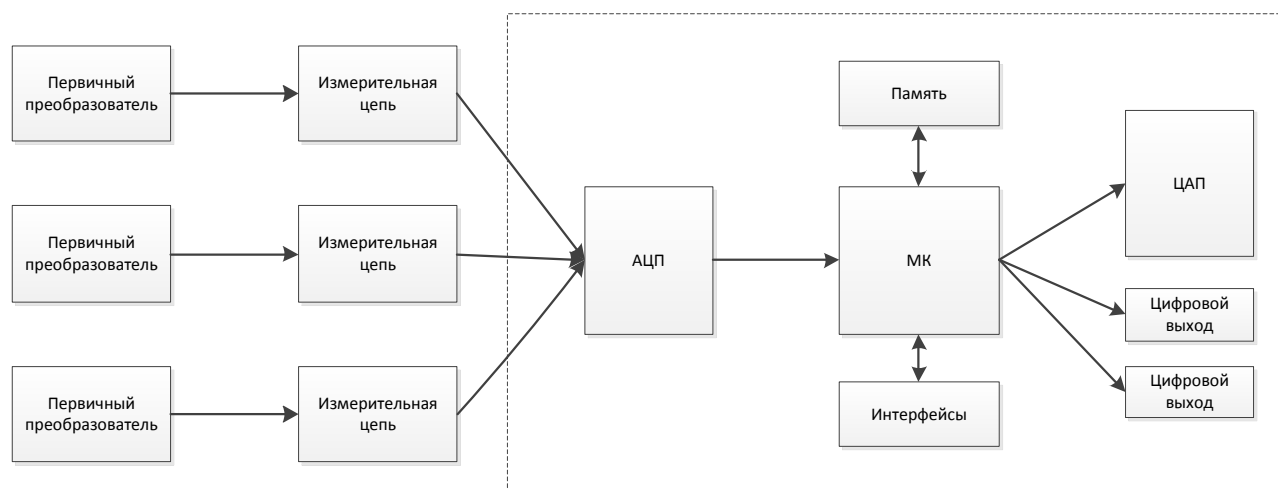


Рисунок 3.2 - Структурная схема МРИД

Измерительная цепь – совокупность электронных элементов, необходимых для работы первичного преобразователя, а также для масштабирования, фильтрации входного сигнала. Количество, назначение и параметры элементов измерительной цепи зависят от типа и параметров первичных преобразователей.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь – электронное устройство, преобразующее напряжение в двоичный цифровой код.

МК – микроконтроллер - микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает в себе функции процессора и периферийных устройств, содержит ОЗУ или ПЗУ. По сути, это однокристальный компьютер, способный выполнять простые задачи.

Память – флэш-память, служит для хранения данных измерений, параметров конфигурации интеллектуального датчика.

Интерфейсы – микросхемы для интерфейсов к внешним вычислительным системам, таким как измерительные системы верхнего уровня, система конфигурирования МРИД.

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь – устройство, предназначенное для преобразования цифрового сигнала в аналоговый.

Цифровой выход – устройство, предназначенное для выдачи дискретных сигналов во внешний мир.

### **3.2.2 ИСХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОСНОВНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ МРИД**

Итак, можно сформулировать требования к аппаратной части МРИД. При этом будем исходить из требуемой функциональности, областей применения, основной идеи концепции данного интеллектуального датчика.

Широкий спектр областей применения требует достаточной экономичности прибора, а богатая функциональность – достаточной вычислительной мощности. Разумеется, необходимы достаточная точность аналого-цифрового преобразования, но, поскольку не предполагается работа с быстропротекающими процессами, то не требуется высокоскоростных АЦП.

Предварительные требования к аппаратной части МРИД:

- 1) достаточная скорость работы (от единиц МГц)
- 2) достаточный объем энергонезависимой памяти (от 1 Мбайт)
- 3) АЦП достаточной точности и скорости преобразования (от десятков кГц, от 12 разрядов)
- 4) малое энергопотребление
- 5) модульная архитектура и возможность независимого наращивания каждого модуля

К микроконтроллеру предъявлены следующие требования :

- 1) Быстродействие и разрядность микроконтроллера – от 8 МГц, разрядность от 8 бит
- 2) Обязательная поддержка микроконтроллером математических функций (возведение в степень, логарифмирование, вычисление экспоненты, умножение, сложение) на аппаратном уровне или в виде готовых программных реализаций
- 3) Встроенная флэш-память или поддержка внешней флэш-памяти
- 4) Собственное статическое ОЗУ
- 5) АЦП – встроенный или внешний.

Указанное в задании быстроедействие и поддержка математических операций обусловлены тем, что МРИД должен обрабатывать результат измерений в соответствии с функцией преобразования первичного измерительного преобразователя. Кроме того он должен передавать данные в информационно-измерительную систему.

### 3.3 АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ МРИД

В качестве главного вычислительного устройства интеллектуального датчика был выбран микроконтроллер AVR Atmega 128l семейства Mega компании Atmel, на структурной схеме (рисунок 3.3) он изображён под номером 1. [63]. Технические характеристики данного микроконтроллера приведены в таблице 3.1.

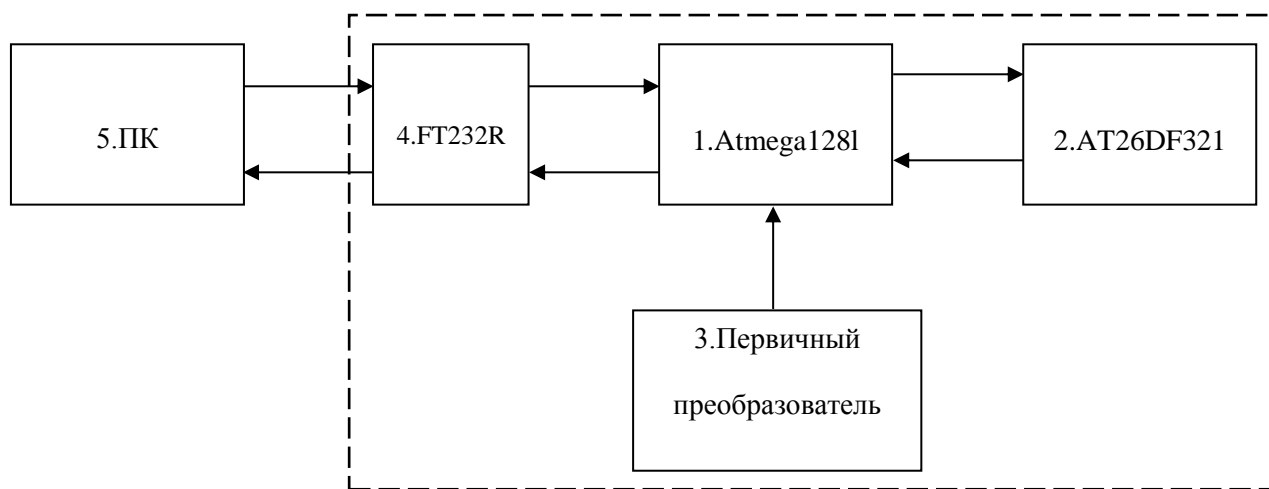


Рисунок 3.3 - Структурная схема прототипа интеллектуального датчика

Таблица 3.1 – Технические характеристики AVR Atmega 128l

Flash	128 KB
EEP ROM	4 KB
RAM ROM	8 KB
Дополнительная внешняя RAM	до 64 KB
ISP (I), Self-Prog (S)	I, S

Продолжение таблицы 3.1

I/O (Pins)	51
Отладочный интерфейс	JTAG
Интерфейсы	2 USART, SPI, I2C
8/16-bit Timer	2/4
N-канальный ШИМ	4+6
Аналоговый компаратор	+
N-канальный АЦП 10-bit	8
Внутренний RC-генератор	+
Сторожевой таймер	+
Апп. умножитель	+
Количество инструкций	135
Vcc (V)	1.8-5.5, 2.7-5.5
Тактовая частота, МГц	0-8, 0-16
Тип корпуса	TQFP64, MLF64

Как и все микроконтроллеры AVR фирмы «Atmel», микроконтроллеры семейства Mega являются 8-разрядными микроконтроллерами, предназначенными для встраиваемых приложений. Они изготавливаются по малопотребляющей КМОП-технологии, которая в сочетании с усовершенствованной RISC-архитектурой позволяет достичь наилучшего соотношения быстродействие/энергопотребление. Микроконтроллеры описываемого семейства являются наиболее развитыми представителями микроконтроллеров AVR.

В целях достижения максимальной производительности и параллелизма у AVR-микроконтроллеров используется Гарвардская архитектура с отдельными памятью и шинами программ и данных. Команды в памяти программ выполняются с одноуровневой конвейеризацией. В процессе выполнения одной инструкции следующая предварительно считывается из памяти программ. Данная концепция позволяет выполнять одну инструкцию за один машинный цикл.

Память программ представляет собой внутрисистемно программируемую флэш-память.

Подавляющее большинство основных характеристик процессора микроконтроллеров семейства Mega такие же, что и у микроконтроллеров других семейств — Classic и Tiny:

- полностью статическая архитектура;
- АЛУ подключено непосредственно к регистрам общего назначения;
- большинство команд выполняются за один машинный цикл;
- многоуровневая система прерываний; поддержка очереди прерываний.

В то же время процессор микроконтроллеров семейства Mega имеет ряд характеристик, присущих именно этому семейству:

- наибольшее число источников прерываний (до 27 источников, из них до 8 внешних);
- наличие программного стека во всех моделях семейства;
- наличие аппаратного умножителя.

Все характеристики подсистемы ввода/вывода микроконтроллеров семейства Mega такие же, как и у микроконтроллеров других семейств:

- программное конфигурирование и выбор портов ввода/вывода;
- выводы могут быть запрограммированы как входные или как выходные независимо друг от друга;
- входные буферы с триггером Шмитта на всех выводах;
- возможность подключения ко всем входам внутренних подтягивающих резисторов (сопротивление резисторов составляет 35...120 кОм).

Микроконтроллеры семейства Mega имеют наиболее богатый набор периферийных устройств (ПУ). При этом в большинстве моделей имеются все ПУ, которые вообще встречаются в составе микроконтроллеров AVR. Этими устройствами являются:

- 8-разрядные таймеры/счетчики (таймеры T0 и T2). В ряде моделей эти таймеры/счетчики могут работать в качестве часов реального времени (в асинхронном режиме);
- 16-разрядные таймеры/счетчики (таймеры T1 и T3);
- сторожевой таймер WDT;
- генераторы сигнала с ШИМ разрядностью 8 бит (один из режимов работы 8-разрядных таймеров/счетчиков T0 и T2);
- одно-, двух- и трехканальные генераторы сигнала с ШИМ регулируемой разрядности (один из режимов работы 16-разрядных таймеров T1 и T3);
- разрешение ШИМ-сигнала для разных моделей составляет 8...10 бит или 1...16 бит;
- аналоговый компаратор;
- многоканальный 10-разрядный АЦП как с несимметричными, так и с дифференциальными входами;
- полнодуплексный универсальный асинхронный приемопередатчик (UART);
- полнодуплексный универсальный синхронный/асинхронный приемопередатчик (USART);
- последовательный синхронный интерфейс SPI;
- последовательный двухпроводный интерфейс TWI (аналог интерфейса I2C).

Ядро микроконтроллеров AVR семейства Mega, как и ядро микроконтроллеров семейств Classic и Tiny, выполнено по усовершенствованной RISC-архитектуре (enhanced RISC) [64]. Арифметико-логическое устройство (АЛУ), выполняющее все вычисления, подключено непосредственно к 32-м рабочим регистрам, объединенным в регистровый файл. Благодаря этому АЛУ выполняет одну операцию (чтение содержимого регистров, выполнение операции и запись результата обратно в регистровый файл) за один машинный цикл.



Практически каждая из команд (за исключением команд, у которых одним из операндов является 16-разрядный адрес) занимает одну ячейку памяти программ.

Под номером 2 на рисунке 3.3 изображена внешняя flash – память AT26DF321, её технические характеристики приведены в таблице 3.2 [65].

Таблица 3.2 – Технические характеристики AT26DF321

Емкость, бит	32M
Рабочая частота, МГц (макс)	66
Размер страницы, байт	256
V <sub>cc</sub> , В	2.7-3.6
Тип интерфейса	Serial (SPI)
Буфер SRAM, байт	+
Функция Lockdown	-
Серийный номер (ID)	+
Тип корпуса	SOIC8, SOIC16
Температурный диапазон	I

Данная микросхема служит для хранения электронных таблиц и подключается вместе с датчиком.

AT26DF321 – flash-память использующая последовательный интерфейс SPI, разработанная компанией Atmel для широкого круга использования.

Под номером 3 на рисунке 3.3 изображен первичный преобразователь неэлектрической величины, в электрическую.

Связь между персональным компьютером и интеллектуальным датчиком будет осуществляться через USB-интерфейс. Микроконтроллер Atmega128l не поддерживает USB-интерфейс. Для сопряжения ПК и микроконтроллера была выбрана микросхема FT232R (на рисунке 3.3 она изображена под номером 4), разработанная компанией FTDI Chip [66]. Данная микросхема используется для преобразования последовательного COM-интерфейса в интерфейс USB.

Микросхема FTDI FT232R (FT232RL и FT232RQ) является высокоинтегрированным переходником USB - COM позволяющая используя минимум внешних компонентов (разъем и пассивные компоненты) организовать последовательный обмен данными между внешним устройством на микроконтроллере и компьютером через шину USB. По сравнению с предыдущими версиями микросхемы у FT232R на кристалл интегрированы тактовый генератор, энергонезависимая память EEPROM, часть внешних пассивных компонентов. Микросхема может работать в режиме последовательного обмена и в режиме bit-bang.

Характеристики и особенности микросхемы FT232R:

- одночиповый переходник из USB в асинхронный последовательный интерфейс передачи данных (UART);
- протокол USB полностью реализован в микросхеме;
- интерфейс UART поддерживает режимы передачи 7 и 8 бит данных, 1 и 2 стоповых бита, различные режимы контроля четности;
- поддержка управления потоком данных программного X-On / X-Off и аппаратного;
- скорости передачи от 300 бод до 3 мегабод для RS422 / RS485 / TTL и от 300 бод до 1 мегабод для RS-232;
- бесплатные VCP (виртуальный COM-порт) и D2XX (DLL) драйвера для разработчиков;
- новая возможность - встроенный уникальный идентификационный номер (FTDIChip-ID™) - может быть использован для создания ключа защиты;
- новые настраиваемые выходы CBUS;
- возможность вывода состояния приема/передачи на внешние светодиоды;
- возможность подачи тактового сигнала на внешние микросхемы, контроллеры, ПЛИС, частоты 6, 12, 24 и 48 МГц;
- буферы FIFO на прием и передачу для высокоскоростной передачи данных;

- настраиваемый timeout для приемного буфера;
- улучшенный режим bit bang - выводы CBUS могут служить для формирования стробов чтения и записи;
- встроенная энергонезависимая память EEPROM объемом 1024 байт;
- микросхема поставляется с уникальным идентификационным номером, который программируется на фабрике в процессе изготовления кристаллов и доступен для чтения по шине USB;
- поддержка режимов питания от шины, от шины с большим потреблением и от внешнего источника;
- встроенный стабилизатор на 3.3 В с нагрузочной способностью до 50 мА;
- встроенный преобразователь для напряжений внешних сигналов на выводах UART и CBUS от 1.8 до 5 вольт;
- настоящая поддержка уровней 5В / 3.3В / 2.8В / 1.8В CMOS на выходе и TTL на входе выводов;
- высокая нагрузочная способность выходов;
- встроенная цепь сброса по питанию;
- встроенный генератор - не нужно внешних;
- встроенный фильтр питания - не нужен внешний RC фильтр;
- возможность инверсии сигнала UART;
- работа микросхемы при напряжении питания от 3.3 до 5.25 вольт;
- низкое потребление, режим энергосбережения;
- совместимость с хост контроллерами UHCI / OHCI / EHCI;
- совместимость с USB 2.0 Full Speed;
- расширенный рабочий температурный диапазон: от -40°C до +85°C (промышленный);
- исполнение RoHS-совместимое в корпусах 28 SSOP и QFN-32.

Микросхемы поставляются с запрограммированной EEPROM, нет необходимости программировать EEPROM для начала работы.

На рисунке 3.4 изображена внутренняя структура микросхемы FT232R.

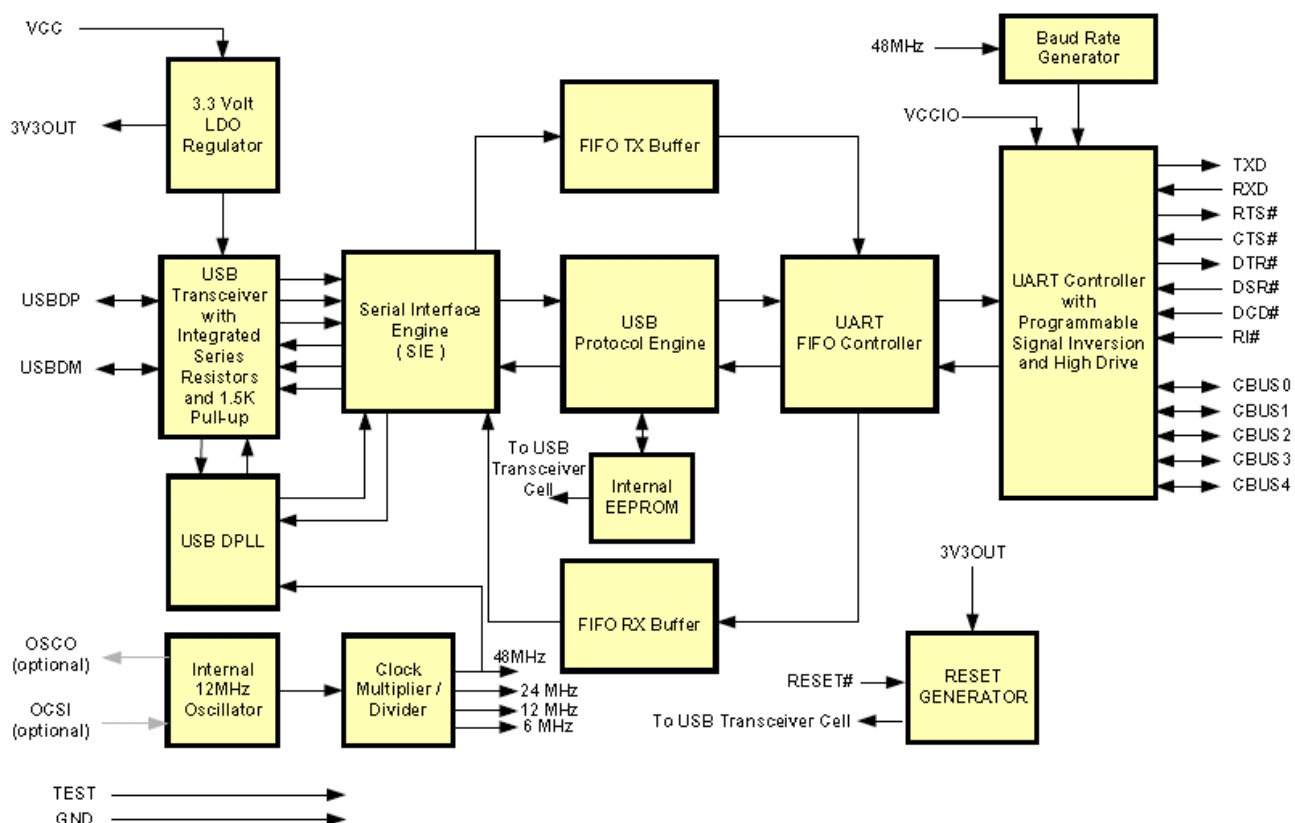


Рисунок 3.4 - Внутренняя структура микросхемы FT232R

Здесь:

3.3V LDO Regulator – генератор напряжения в 3.3В для управления буфером передатчика USBшины.

USB Transceiver –приемопередатчик USB обеспечивает USB 1.1 / USB 2.0 полную скорости физического интерфейса по кабелю USB.

USB DPLL – USB ячейка DPLL соединяется к поступающим данным USB NRZI и обеспечивает отдельные восстановленные часы и сигналы данных к блоку SIE.

Internal 12MHz Oscillator – внутренняя ячейка Генератора на 12 МГц производит справочный вход часов на 12 МГц к x4 множителю Часов. Генератор на 12 МГц также используется как справочные часы для SIE, Двигатель Протокола USB и блоки диспетчера FIFO UART.

Clock Multiplier / Divider – множитель Часов / Сепаратор берет вход на 12 МГц от Ячейки Генератора и производит 48 МГц, 24 МГц, 12 МГц, и справочные

сигналы часов на 6 МГц. 48Mz ссылка часов используется для USB DPLL и блоки Генератора Скорости двоичной передачи.

Serial Interface Engine (SIE) – блок выполняющий преобразование USB данных параллельного вида к последовательному и последовательному к параллельному, чтобы быть Параллельным преобразованием данных USB. В соответствии с USB 2.0 спецификации это выполняет заполнение битами / располнение и CRC5 / генерация CRC16 / проверка потока данных USB.

USB Protocol Engine – двигатель Протокола USB управляет потоком данных от конечной точки контроля за USB устройства. Это обращается с протоколом USB низкого уровня, запросы, произведенные USB, принимают диспетчера и команды для того, чтобы управлять функциональными параметрами UART.

FIFO TX Buffer – данные от данных USB конечная точка сохранена в FIFO буфер TX и удалена от буфера до UART, передают регистр под контролем диспетчера FIFO UART.

FIFO RX Buffer – данные от UART получают регистр, сохранен в FIFO буфер RX до того, чтобы быть удаленным SIE на запросе USB о данных из данных устройства устройства в конечной точке.

UART FIFO Controller – диспетчер FIFO UART обращается с передачей данных между FIFO, RX и буфера TX и UART передают и получают регистры.

UART Controller with Programmable Signal Inversion and High Drive – месте с Диспетчером FIFO UART Диспетчер UART обращается с передачей данных между FIFO RX и FIFO, буфера TX и UART передают и получают регистры.

Baud Rate Generator – генератор скорости двоичной передачи предоставляет x16 входную частоту диспетчеру UART от генератора частоты на 48 МГц и состоит из предварительного скалера на 14 битного и 3 битного регистра, которые обеспечивают, точную настройку скорости двоичной передачи. Это определяет скорость двоичной передачи UART, которая программируется от 183 бодов до 3 миллионов бодов.

RESET Generator – интегрированная ячейка генератора сброса, обеспечивает надежное включение при сбросе устройства. Сброс позволяет

другим устройствам перезагружать FT232R. СБРОС # может быть привязан к VCCIO или оставлен несвязанный, если это не требуется, чтобы перезагрузить устройство от внешней логики или внешнего генератора сброса I.C.

Internal EEPROM – Внутренний EEPROM в FT232R может использоваться для хранения некоторой системной информации данных.

Ниже на рисунке 3.5 приведена принципиальная схема преобразователя USB – COM. Данный пример иллюстрирует, как соединить FT232R как USB на конвертер RS232. TTL – Конвертер Уровня RS232 I.C. используется на последовательном UART FT232R, чтобы сделать преобразование уровня RS232. Это, например может быть сделан, используя популярное “213” ряд TTL на конвертеры уровня RS232. Эти устройства имеют 4 передатчика и 5 приемников в 28-LD пакете SSOP и показывают встроенный конвертер напряжения, чтобы преобразовать 5V (номинальный) VCC к +/-9 В, требуемых RS232. Важная особенность этих устройств – ножка SHDN#, которая может быстро сбрасываться в ноль во время работы USB в приостанавливающем режиме.

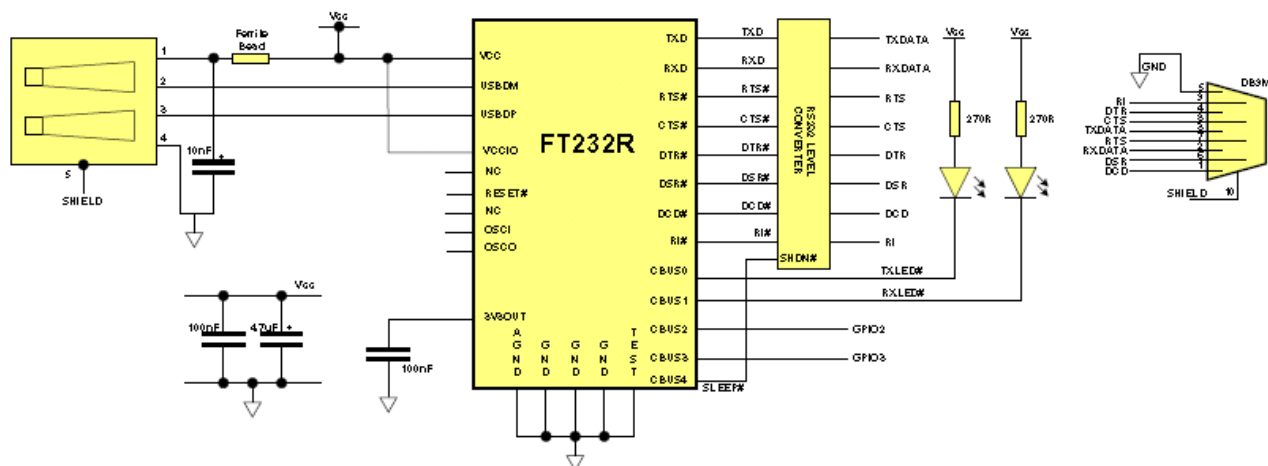


Рисунок 3.5 - Принципиальная схема преобразователя USB – COM

Номер 5 (рисунок 3.3) – персональный компьютер со специальным программным обеспечением, позволяющий принимать, хранить и обрабатывать данные МРИД, настраивать МРИД.

Весь интеллектуальный датчик делится на две части: вычислительная часть и первичный преобразователь с внешней памятью для хранения таблиц.

Вычислительная часть состоит из микроконтроллера, микросхем сопряжения с персональным компьютером. Это – главный модуль, мозг интеллектуального датчика. Данная часть подключается непосредственно к ПК и отвечает за обработку данных, полученных от первичного преобразователя, отправку их на ПК, управление всеми частями интеллектуального датчика и выполнение команд полученных от ПК.

Часть первичного преобразователя состоит из самого первичного преобразователя и микросхемы хранения электронных таблиц. Эта часть – отдельный модуль, подключаемый к вычислительной части. Прочитав данные из электронных таблиц, имеем все характеристики данного первичного преобразователя, что позволяет нам более точно обрабатывать (делать коррекцию результатов измерения, снизить влияние помех и т.д.) полученные данные от датчика, а так же на основе полученных измерений реагировать на возникшие события. Со временем характеристики первичного преобразователя изменяются, поэтому полученные измерения будут не верными. Этого можно избежать, если корректировать характеристики датчика. Поэтому я в своей работе использую перезаписываемую внешнюю память, что позволяет нам отредактировать некоторые поля в электронных таблицах и перезаписать их в память. Данная часть МРИД управляется вычислительной частью.

В приложении Д приведены принципиальные схемы прототипа многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика.

В приложении Е приведены схемы разводки печатных плат прототипа МРИД.

### 3.4 ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ МРИД

#### 3.4.1 ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ МРИД

Блок-схема алгоритма работы программы представлена на рисунке 3.6.

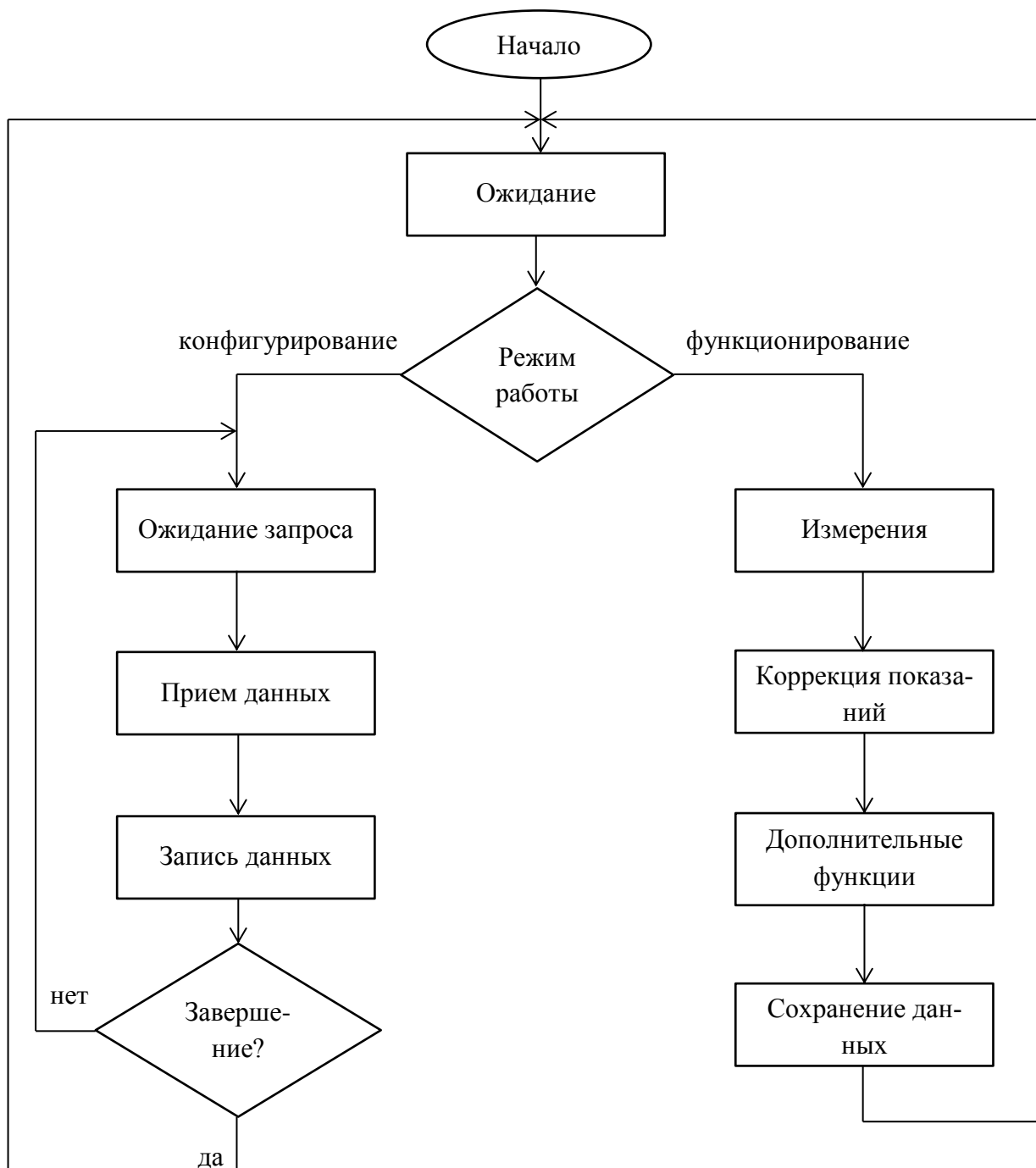


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритма

Программа реконфигурируемого интеллектуального датчика состоит из двух основных частей: обслуживание процесса конфигурирования и



измерительная часть (рисунок 3.6). Основным режимом работы является измерительный. При каждом цикле программы проверяется наличие запроса на переход в режим конфигурирования. При его появлении программа переходит в малый цикл – обслуживание конфигурирования. Во время конфигурирования могут поступать различные запросы в произвольном порядке, поэтому для выхода из режима конфигурирования датчику посылается отдельное сообщение. После его обнаружения программа интеллектуального датчика возвращается в основной режим.

### 3.4.2 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МРИД

А) Получение результата измерения (рисунок 3.7):

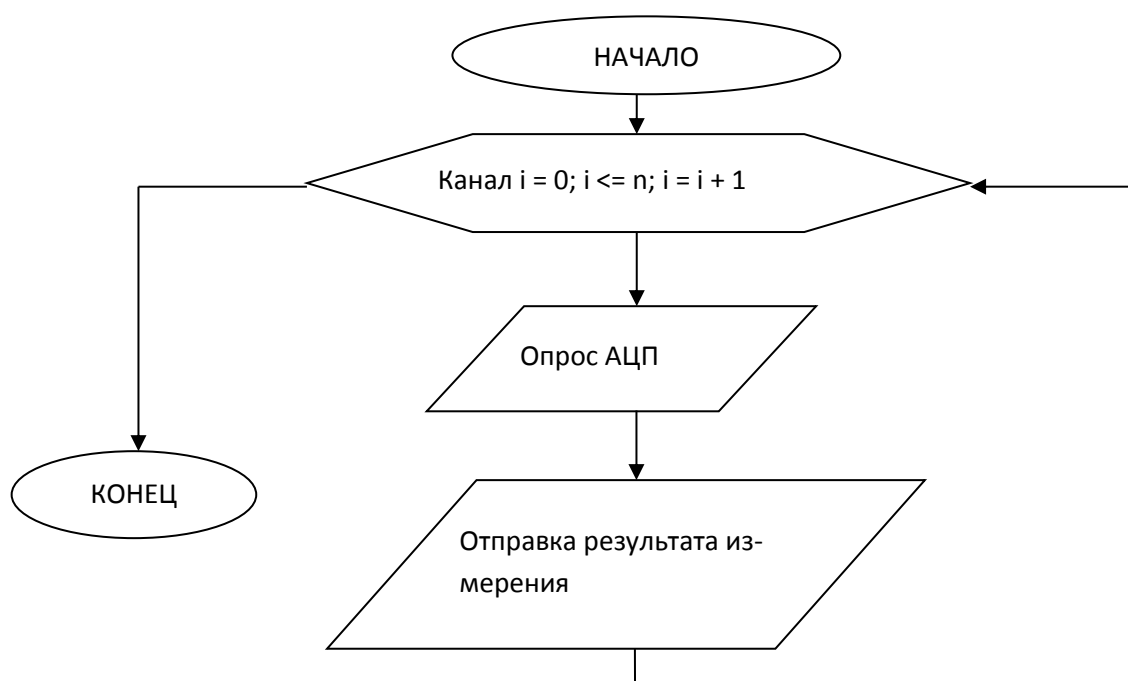


Рисунок 3.7 - Блок-схема обработки запроса на получение результата измерений

## Б) Обработка запросов

- получение идентификационных данных (рисунок 3.8)

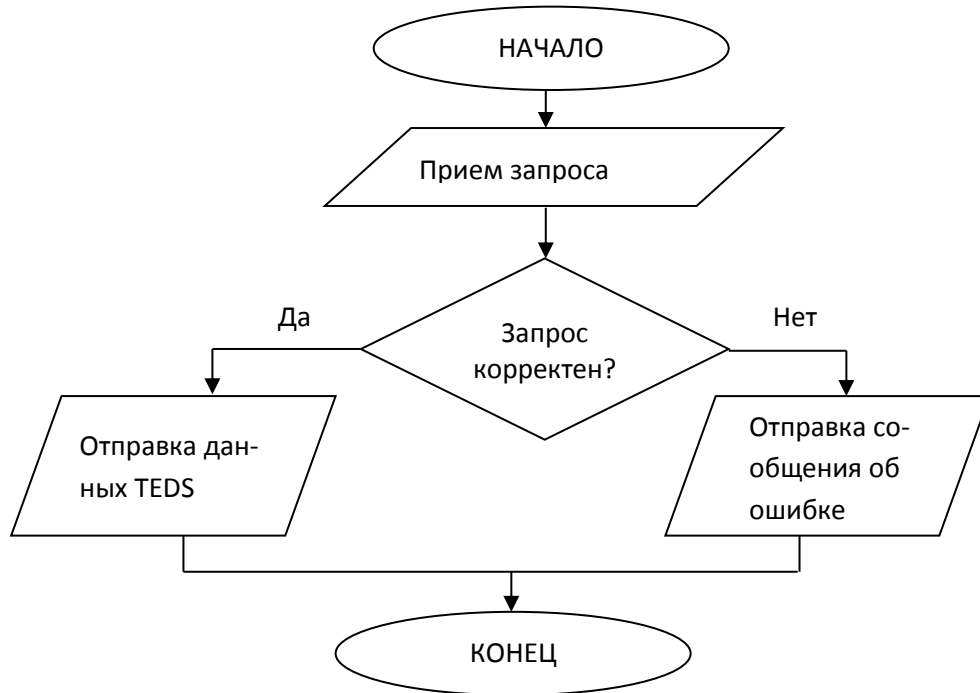


Рисунок 3.8 - Блок-схема запроса на получение идентификационных данных датчика

- чтение массива коэффициентов ИД (рисунок 3.9)

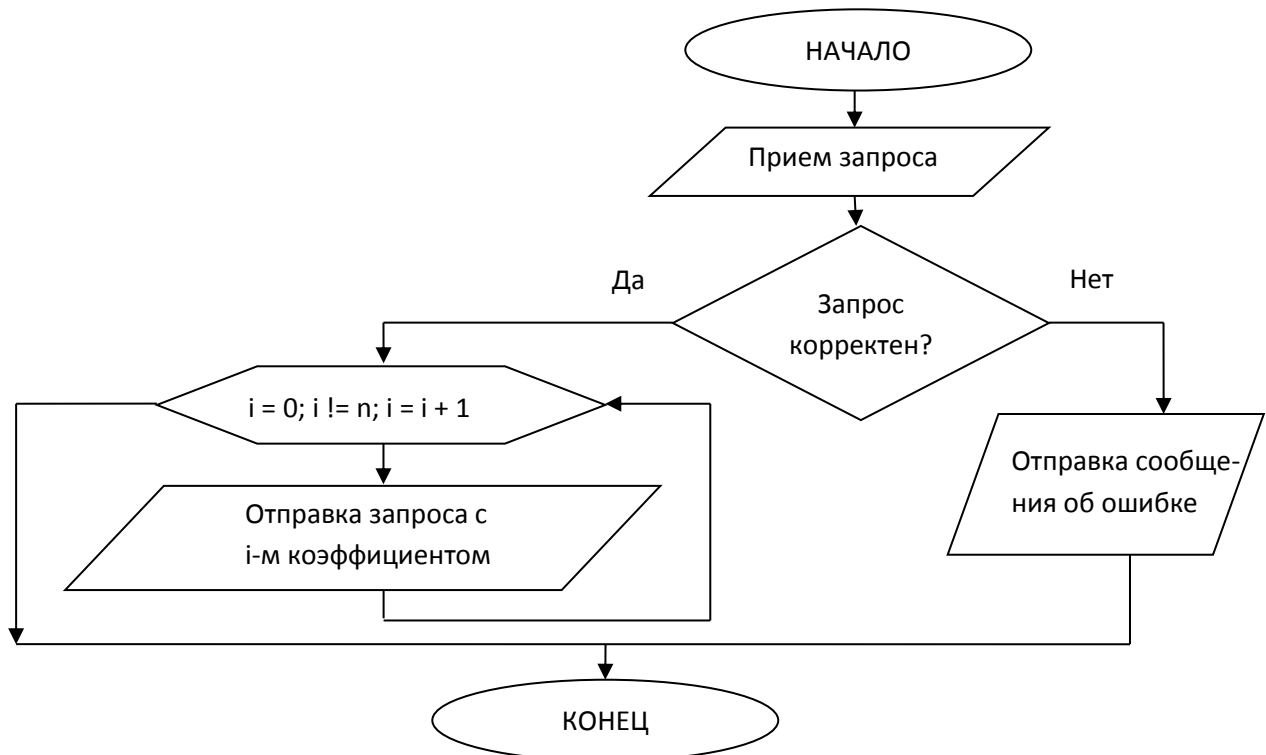


Рисунок 3.9 - Блок-схема запроса на чтение массива коэффициентов функции преобразования

- смена TEDS ИД (рисунок 3.10)

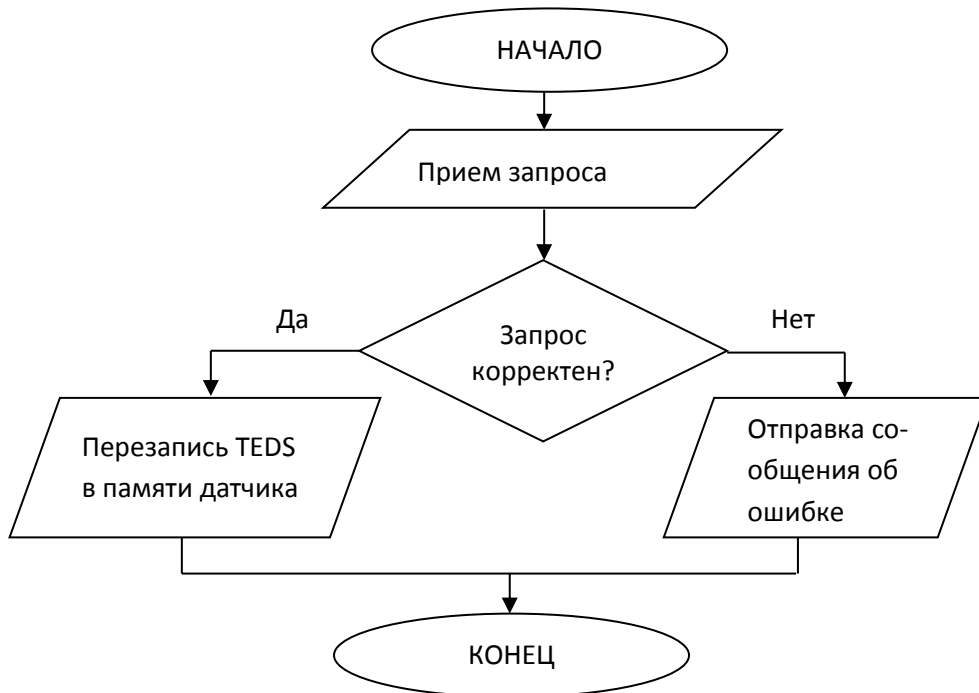


Рисунок 3.10 - Блок-схема замены идентификационных данных датчика

- смена коэффициентов преобразования (рисунок 3.11)

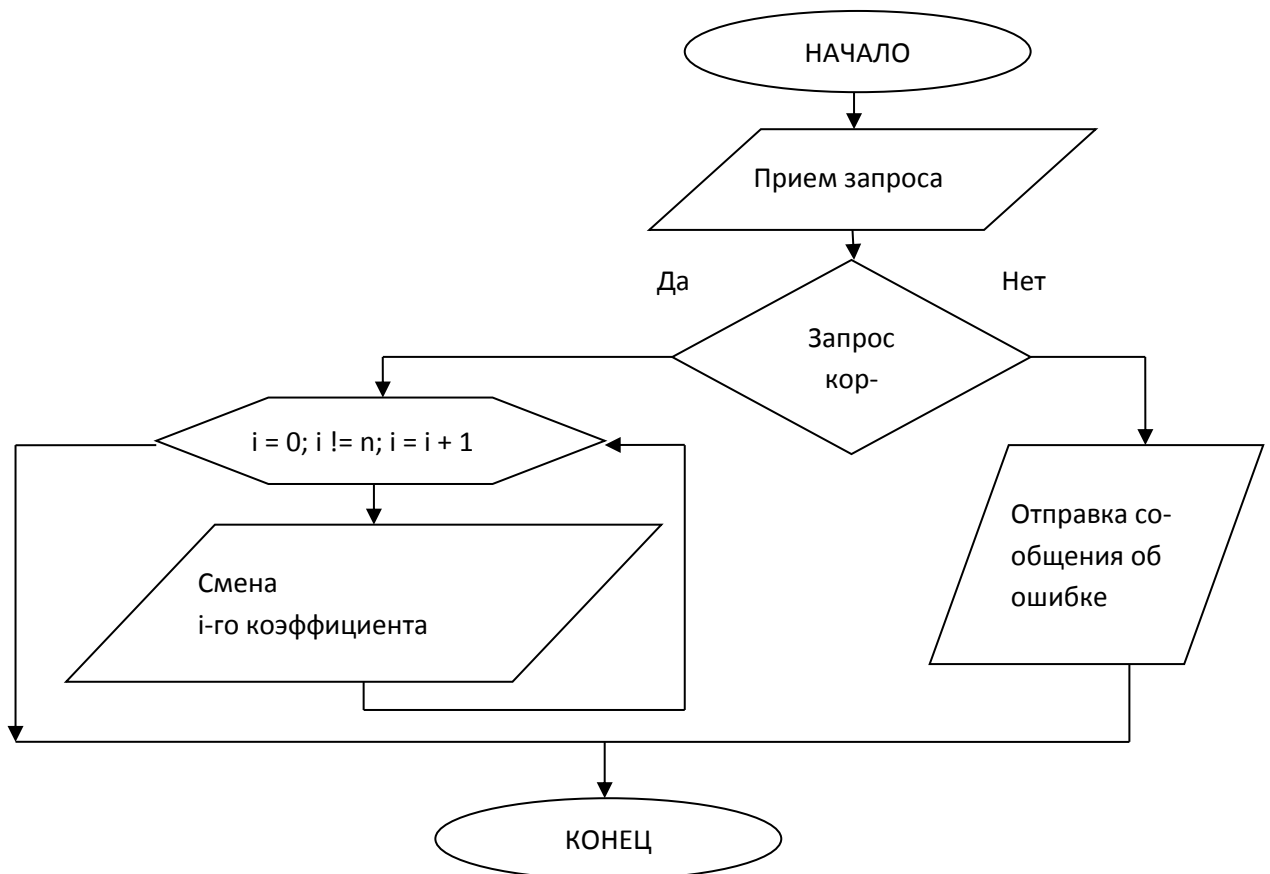


Рисунок 3.11 - Блок-схема запроса на смену коэффициентов преобразования

Первичные измерительные преобразователи преобразуют неэлектрическую величину в электрический сигнал, при этом существует зависимость между входной неэлектрической величиной и выходным электрическим сигналом. Данная зависимость может быть нелинейной и как правило одинакова для серии датчиков. Зависимость выходной величины от входного параметра публикуется в технических данных к первичному преобразователю.

Рассмотрим первичный преобразователь – терморезистор SCK и зависимость (рисунок 3.12):

$$T, ^\circ\text{C} \rightarrow R, \text{Ом} \quad (3.1)$$

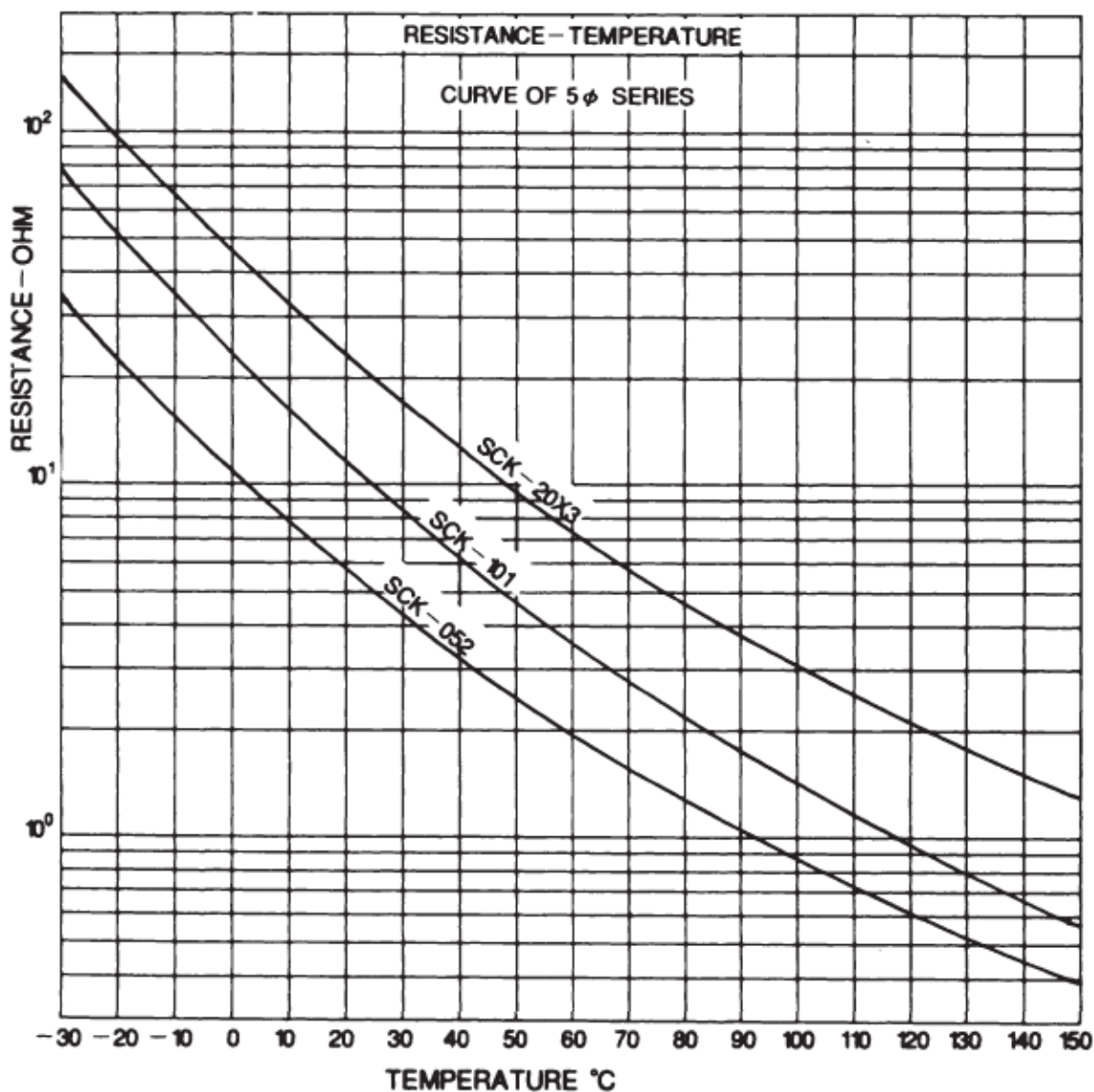


Рисунок 3.12 - Зависимость сопротивления терморезистора SCK от температуры

На данном графике (рисунок 3.12) приведено 3 зависимости – для трёх серий терморезистора [67]. Как видно на графике – зависимость является нелинейной и соответственно при дальнейшем преобразовании необходимо учитывать данную характеристику. Применение интеллектуального датчика даёт возможность провести корректировку результата измерения в соответствии с характеристикой преобразователя.

Характеристика преобразования задаётся в виде дискретных точек и далее восстанавливается при помощи интерполяции. Отметим, что пользователь МРИД должен самостоятельно выбрать дискретные точки с графика, неправильный выбор может ухудшить характеристики преобразования.

Интерполяция - в вычислительной математике способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений.

Рассмотрим систему несовпадающих точек  $x_i$  ( $i \in 0, 1, \dots, N$ ) () из некоторой области  $D$ . Пусть значения функции  $f$  известны только в этих точках:

$$y_i = f(x_i), i = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

Задача интерполяции состоит в поиске такой функции из заданного класса функций, что  $F(x_i) = y_i, i = 1, \dots, N$

Точки  $x_i$  называют узлами интерполяции, а их совокупность — интерполяционной сеткой.

Пары  $(x_i, y_i)$  называют точками данных или базовыми точками. Разность между «соседними» значениями  $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$  — шагом интерполяционной сетки. Он может быть как переменным так и постоянным.

Функцию  $F(x)$  — интерполирующей функцией или интерполянтой.

Для восстановления функции преобразования воспользуемся интерполяционным многочленом Лагранжа.

Интерполяционный многочлен Лагранжа — многочлен минимальной степени, принимающий данные значения в данном наборе точек. Для  $n + 1$  пар чисел,

где все  $x_i$  различны, существует единственный многочлен  $L(x)$  степени не более  $n$ , для которого  $L(x_i) = y_i$ .

Известно, что любая непрерывная функция на отрезке  $[a, b]$  может быть хорошо приближена некоторым полиномом  $P_n(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_0$ . Существует единственный полином степени  $n$ , совпадающий с  $y(x)$  в узлах сетки

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\dots(x-x_n)}{(x_k-x_0)(x_k-x_1)\dots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\dots(x_k-x_n)} \quad (3.3)$$

Такой вид записи многочлена называют интерполяционным полиномом Лагранжа. Для оценки близости полинома  $P_n(x)$  к функции  $y(x)$  предполагают, что существует  $n+1$  производная  $y^{(n+1)}(x)$ . Тогда имеет место формула оценки погрешности

$$y(x) - P_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{j=0}^n (x - x_j), \quad (3.4)$$

где  $\xi$  – произвольная точка из отрезка  $[a, b]$ .

На языке СИ вычисление данного полинома произведём в функции :

```
float Lagr(float x2, float x[], float y[] )
```

```
{
```

```
    float pr = 0; //произведение
```

```
    float y2 = 0;
```

```
    for(int i = 1; i != 10; i = i + 1)
```

```
    {
```

```
        pr = 1;
```

```
        for(int j = 1; j != 10; j = j + 1) //вычисление коэффициента
```

```
        {
```

```
            if (i != j) pr = pr*(x2-x[j])/(x[i]-x[j]);
```

```
        }
```

```
        y2 = y2 + y[i] * pr;
```

```
    }
```

```
    return y2; //возврат результата (значение полинома в точке x2)
```

```
}
```

$x$  и  $y$  – массивы с координатами узловых точек,  $x_2$  – точка значение которой необходимо узнать.

### 3.5 КОНФИГУРИРОВАНИЕ МРИД

Экземпляр многофункционального интеллектуального датчика, сконфигурированного под свои конкретные условия и назначения применения, является целью проектирования в описываемой **системе разработки интеллектуальных датчиков** (рисунок 3.13). Система состоит из нескольких подсистем, составляющих в своей совокупности комплекс средств аппаратного, программного, методического и организационного характера. Многофункциональный интеллектуальный датчик также является одной из составляющих этой системы.



Рисунок 3.13 - Общая схема системы проектирования

Если расширить определение интеллектуального датчика из [4], многофункциональный интеллектуальный датчик предназначен для измерения нескольких величин с учётом характеристик окружающей среды и выполнения при этом каких-либо дополнительных функций, таких как: преобразования (измери-

тельные), информационные, конфигурирования, контроля и прогнозирования, самодиагностики, управляющие. В максимальном варианте предполагается, что имеются объекты измерения и объекты управления.

Необходимо отметить, что многофункциональный интеллектуальный датчик, хотя и способен работать в автономном режиме, вообще, говоря, предназначен для использования в составе информационно-измерительной системы. В частности, часть функционала направлена на интеграцию с разными информационно-измерительными системами. Наличие стандартных интерфейсов связи служит той же самой цели. Таким образом, информационно-измерительная система (и объекты измерения и управления) также является одной из составляющих общей картины. Информационно-измерительная система – система верхнего уровня, использующая данные от интеллектуального датчика для контроля и управления, например. Типичный пример – современная SCADA-система.

Основные составляющие многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика – ядро и блок первичных преобразователей. Блок первичных преобразователей может иметь различный состав – всё определяется назначением конкретного проектируемого интеллектуального датчика. Сам конструктив МРИД таков, что имеется набор стандартных входов для подключения различных первичных преобразователей. Таким образом, достигается инвариантность конструкции относительно состава используемых преобразователей. Ядро МРИД включает в себя микроконтроллер, память, АЦП, ЦАП, интерфейсы для взаимодействия с системой конфигурирования и информационно-измерительными системами.

Ядро МРИД функционирует под управлением специальной мастер-программы. Эта программа одинакова для всех экземпляров на основе одной архитектуры микроконтроллера. Различия между разными архитектурами микроконтроллера сводятся к учёту особенностей организации памяти и ввода/вывода в данной архитектуре микроконтроллера. Мастер-программа имеет два режима функционирования – «измерительный» и «конфигурирования». «Измерительный» режим является основным. В этом режиме программа работает с учётом заданной



датчику конфигурации: количества используемых каналов, типов используемых преобразователей, характеристик используемых преобразователей, основного уравнения преобразования датчика, других сконфигурированных функций датчика. Эта конфигурация задаётся для датчика в режиме «конфигурирования». Здесь в датчик записывается конфигурационный блок, полностью описывающий функционал, характеристики и параметры датчика. Блок конфигурационных параметров формируется и записывается с помощью системы конфигурирования интеллектуальных датчиков.

**Система конфигурирования интеллектуальных датчиков** занимает центральное место в общей картине проектирования и использования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков. Процесс конфигурирования реализуется программой конфигурирования интеллектуальных датчиков, реализующей несколько концепций. Первая концепция – это удобный пользовательский интерфейс, позволяющий оператору задавать параметры проектируемого интеллектуального датчика, при этом ему не требуется слишком высокая квалификация. Интерфейс специально спроектирован так, чтобы можно было удобно задавать используемые каналы, характеристики первичных преобразователей, уравнение преобразования датчика, функциональность датчика. Вторая концепция – использование обобщённого уравнения [61] для задания уравнения преобразования датчика. В обобщённое уравнение входят измерительная, корректировочная, калибровочная и временная части. Таким образом, уравнение учитывает необходимую коррекцию показаний в зависимости от условий окружающей среды, калибровочных данных конкретных первичных преобразователей, долговременной стабильности преобразователей и датчика. Третья концепция состоит в числовом задании зависимостей используемых первичных преобразователей. Зависимости преобразователей разделяются на основную, калибровочную и влияющие. Все эти зависимости представляются и хранятся в **информационной системе** в числовом виде. Для представления зависимости в числовом виде в самом МРИД используется специальный формат хранения данных, основанный на стандарте IEEE 1451 (TEDS). Четвертая концепция заключается в использовании от-

дельного хранилища для версий мастер-программ для разных архитектур микроконтроллеров, используемых в проектируемых многофункциональных интеллектуальных датчиках. Сами мастер-программы разрабатываются в **системе разработки программы для новых версий МРИД**. Все параметры МРИД собираются в конфигурационный блок, который полностью описывает функционал и характеристики экземпляра датчика. Конфигурационный блок содержит, вкратце, следующие группы параметров: идентификационные параметры датчика и используемых первичных преобразователей, калибровочные и влияющие характеристики первичных преобразователей, запись обобщённого уравнения интеллектуального датчика с учётом его характеристик, функционал и конкретные параметры по задействованным функциям из всех шести групп функций. Вместе с использованием единой мастер-программы, становится возможным в широких пределах менять функциональность и характеристики одного и того же экземпляра датчика.

Для всех первичных преобразователей, используемых в МРИД, в целях хранения данных характеристик, идентификационных и других используются электронные таблицы TEDS. Обычно, в современных первичных преобразователях для хранения идентификационных данных используется память TEDS. Однако до сих пор процент таких датчиков среди общего количества невысок. Поэтому, вне зависимости от наличия TEDS в применяемом первичном преобразователе, для хранения информации о каждом использованном первичном преобразователе в памяти интеллектуального датчика организуется таблица VirtualTEDS. VirtualTEDS – это расширение стандарта TEDS для применения вне первичного преобразователя, не оснащённого своей памятью TEDS. Для каждого первичного преобразователя хранятся паспортные характеристики, калибровочные характеристики, характеристики основной и влияющей зависимостей. Все эти данные при конфигурировании берутся из **информационной системы**. Туда же они попадают из **комплекса проектирования таблиц TEDS**. В этом комплексе проводится проектирование таблиц TEDS для первичных преобразователей, подготовка таблиц для указания паспортных и калибровочных данных. Проектирование таблиц требует достаточно высокой квалификации оператора. Как правило, заново про-

ектировать таблицу необходимо для нового типа преобразователя, пока ещё отсутствующего в **информационной системе**. Кроме таблиц VirtualTEDS для первичных преобразователей, в МРИД хранятся таблицы для собственного назначения, расширенные данными основного уравнения преобразования. Все эти данные используются в процессе работы программы МРИД.

В МРИД в самом начале его жизненного цикла записывается так называемая мастер-программа, реализующая обобщённый алгоритм для конкретной архитектуры микроконтроллера. Таким образом, для МРИД сразу после изготовления конфигурирование состоит из двух этапов – запись мастер-программы, и затем – запись конфигурационного блока. В дальнейшем в интеллектуальный датчик можно заново записывать другие конфигурационные данные, меняя тем самым его назначение. Мастер-программа для новой версии интеллектуального датчика создаётся с помощью отдельной **системы разработки программы**. Новая мастер-программа передаётся в хранилище мастер-программ в составе системы конфигурирования интеллектуальных датчиков.

**Информационная система** содержит в себе данные на семейства датчиков или первичных преобразователей. В их числе – паспортные данные и графики зависимостей в числовом виде, для основной и зависимостей от влияющих факторов. Все эти данные предоставляются производителями датчиков, либо получаются в процессе испытаний с помощью **системы испытаний**. Данная информационная система, при использовании доступа из сети Интернет, потенциально позволяет организовать единую базу данных семейств преобразователей, что существенно облегчило бы инженеру сравнение и подбор необходимых для конкретной задачи преобразователей.

При проектировании МРИД предполагается, что в информационной системе имеются статистически достоверные данные о характеристиках первичных преобразователей: основное уравнение преобразования, уравнение влияющих факторов. Эти данные, причём в числовом виде, должен предоставлять производитель преобразователей – на каждое семейство или тип первичных преобразователей. Для того, чтобы получить эти данные для неизученных, неподдерживаемых

преобразователей, используется **система испытаний**. Эта система позволяет моделировать различные условия окружающей среды для получения уравнений влияющих факторов, также с её помощью проводятся испытания для получения основного уравнения преобразования для семейств/типов преобразователей.

Так же следует отметить **систему калибровки и поверки первичных преобразователей**. В отличие от системы испытаний, система калибровки и поверки предназначена для определения метрологических характеристик конкретных экземпляров преобразователей, например, определения калибровочной кривой конкретного экземпляра первичного преобразователя при конфигурировании МРИД [68].

Стоит отметить, что один из современных подходов к решению проблемы построения измерительных и автоматизированных систем наиболее простым и прозрачным способом, не требующим значительных усилий и высокой квалификации инженера, предлагается Институтом электронных управляющих машин (ИНЭУМ). Продукт «CONField», предлагаемый этим институтом, в большей степени ориентирован на разработку автоматики, тем не менее, его можно использовать для проектирования измерительных систем [69]. Этот продукт позиционируется как CASE-система стандарта МЭК 1131-3, ориентирован на квалифицированных инженеров КИП и КБ отечественных предприятий и позволяет создавать решения прикладных задач без посредничества программиста (рисунок 3.14).

По заявлению разработчика, предлагаемая им система призвана решить проблему серьёзного несоответствия затрат результату при использовании существующих решений для выполнения малоканальных задач (от интеллектуальных датчиков до систем малой автоматики). Это достигается путём резкого снижения требований к целевой системе: можно программировать дешёвые устройства на базе 8- и 16-разрядных микроконтроллеров так же, как и на базе мощных 32- и 64-разрядных микропроцессорах.

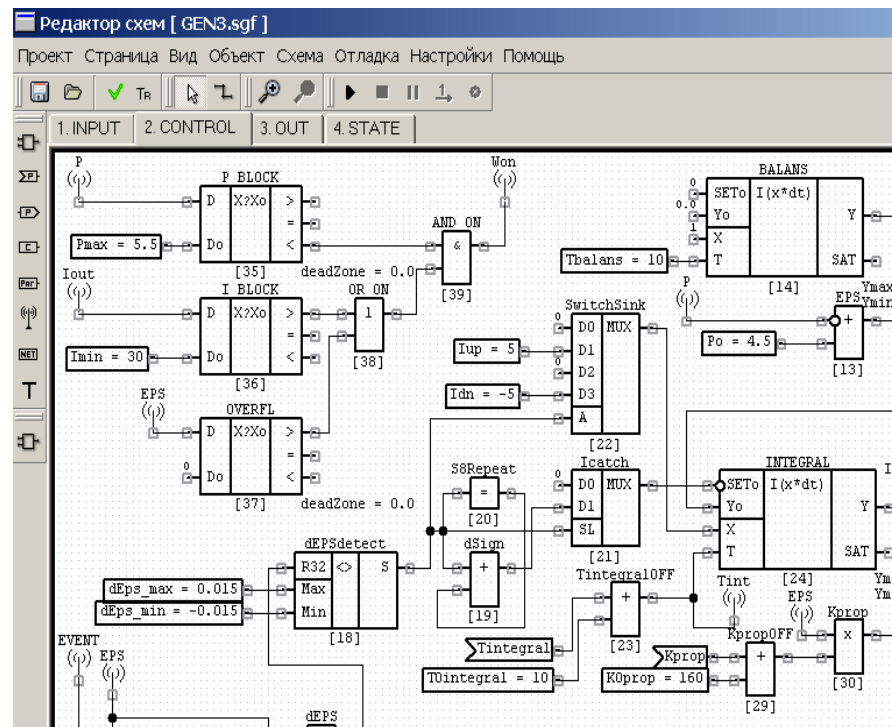


Рисунок 3.14 - Среда разработки CONField

Сутью решения является отказ от операционных систем реального времени и выделение отдельным подзадачам отдельных вычислительных ресурсов, что позволяет реализовать простой детерминированный программный автомат. Особенностью системы «CONField» является использование языка функциональных блок-схем (FBD) для формирования алгоритмов, описания аппаратных конфигураций целевых устройств.

Процесс проектирования выглядит следующим образом. Есть два подхода конфигурирования: экспресс-конфигурирование и универсальное конфигурирование.

Экспресс-конфигурирование предназначено для слабо подготовленного оператора. Экспресс-конфигурирование на предварительном этапе позволяет выбрать или задать последующие этапы конфигурирования, основные характеристики проектируемого датчика (тип, измеряемая величина, вид уравнения), затем подробно каждый этап проектирования (TEDS, калибровочные данные, измерения, математические операции, сравнение с уставками, выдача воздействий), с возможностью произвольного перемещения по этапам. В конце, в

устройство прошивается сконфигурированный код со всеми данными. После этого проводится тестирование интеллектуального датчика.

Универсальное конфигурирование предназначено для достаточно подготовленного проектировщика, которому необходимо задать нестандартную, уникальную программу работы интеллектуального датчика. Здесь конфигурирование проводится в среде проектирования виртуальных приборов LabVIEW корпорации National Instruments [70]. В блок-диаграмме VI собирается будущая программа интеллектуального датчика, с помощью субприборов [71], собранных в библиотеки [72]. Субприборы соединяются в последовательность стандартным для LabVIEW способом – выходы предыдущего субприбора соединяются со входами следующего. Отметим, что данное конфигурирование происходит в режиме редактирования главного VI. Запись программы в интеллектуальный датчик происходит с помощью запуска отредактированного главного VI. В данном варианте конфигурирования требуется дополнительное, ещё более строгое, тестирование работы датчика.

## ГЛАВА 4 СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МРИД

### 4.1 БЛОК-СХЕМА СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МРИД

Общая блок-схема предложенного алгоритма работы показана на рисунке

4.1.

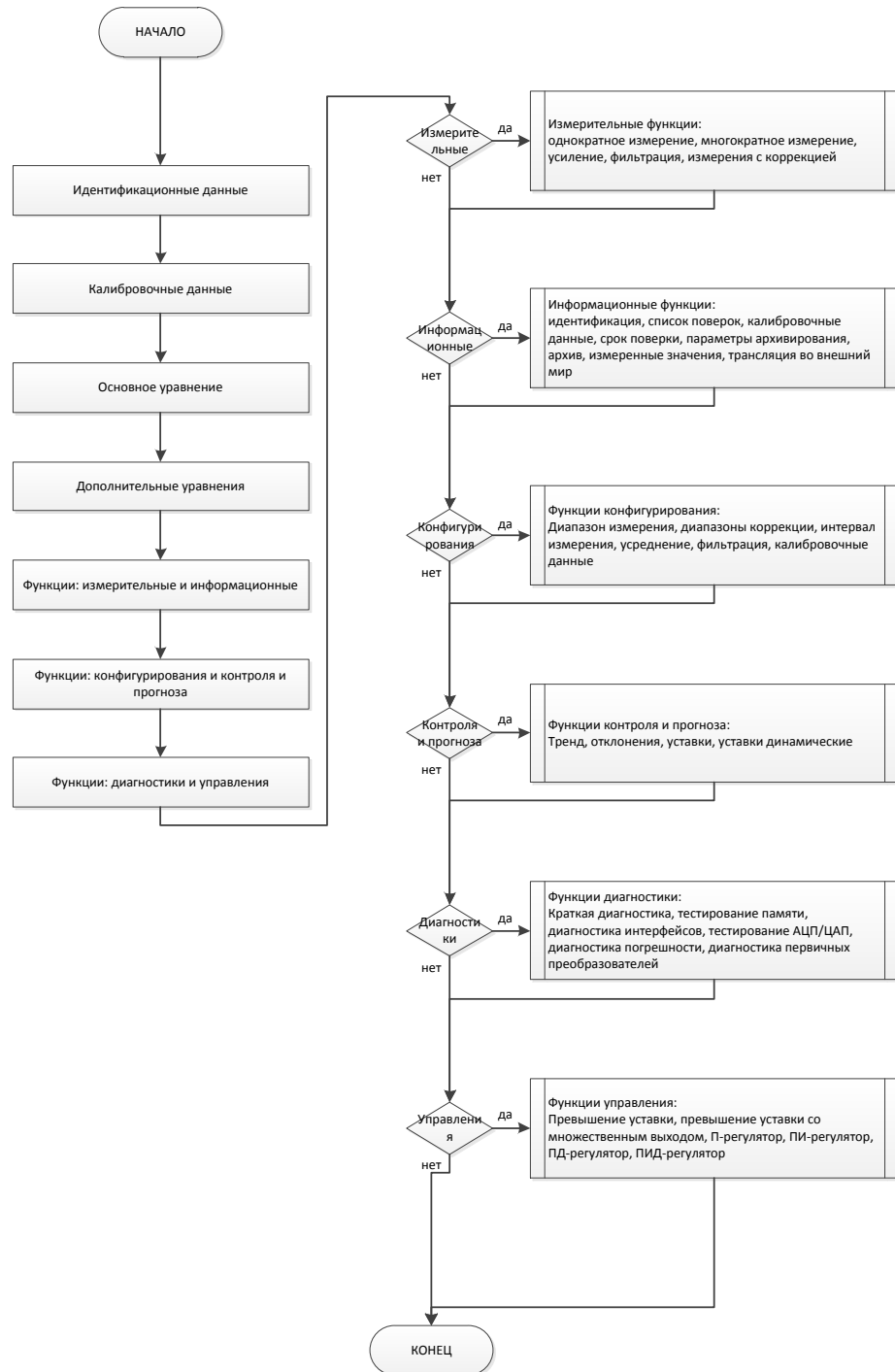


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма программы конфигурирования

В первой части алгоритма производится конфигурирование общесистемных параметров, таких как идентификационные данные, измерительные данные, данные уравнений и т.п. Во второй части производится конфигурирования выполнения каждой из заданных функций МРИД.

В части программирования предложена трёхуровневая система представление – модель – контроллер, где представление – экранные элементы на передней панели, модель – инкапсуляция параметров конфигурации в пользовательские типы данных, а контроллер – машина состояний, реализующая фазы конфигурирования. Подробнее каждый уровень раскрывается в следующих подразделах данной главы.

## **4.2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

### **4.2.1 ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА**

При разработке пользовательского интерфейса выявились две взаимоисключающие тенденции: необходимость размещения большого (несколько десятков параметров) количества элементов на экране и необходимость обеспечить удобство оператора.

При отдаче предпочтения первому варианту (попытке разместить все параметры на одном экране программы) есть две возможности практической реализации: интерфейс на основе закладок (Tabs), и интерфейс со скроллингом.

При превалировании удобства пользователя необходимо реализовать навигацию между экранами. Здесь возможно использование концепции т.н. «мастера».



Для первого варианта существенным недостатком является распыление внимания пользователя, следовательно, нам надо как-то группировать информацию. Принцип группирования не вызывает затруднений – организация протокола подсказывает логичную структуру группирования параметров.

Основываясь на работах [73, 74, 75], посвящённых дизайну и эргономике экранов программ, был сделан выбор в пользу «Мастера».

Общий граф состояний программы показан на рисунке 4.2. Этот граф отражает движение пользователя по экранам программы конфигурирования.

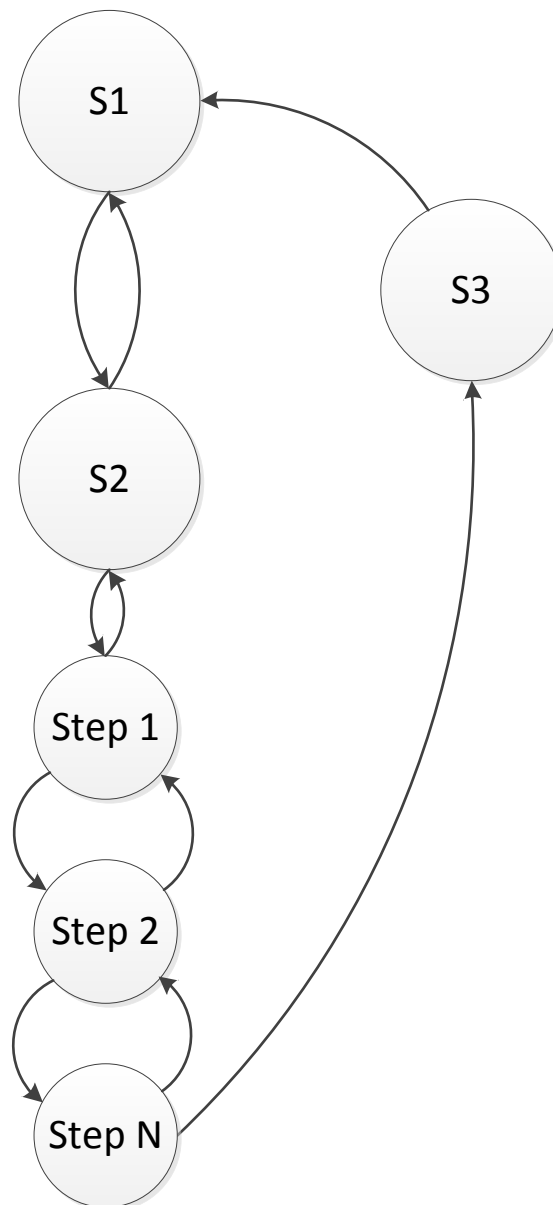


Рисунок 4.2 - Граф состояний системы при взаимодействии с пользователем  
Расшифровка состояний системы:

S1 – ожидание действий пользователя,  
 S2 – задание параметров конфигурации,  
 S3 – запись конфигурации в устройство.

Step1, Step2, StepN – шаги «мастера» при задании параметров конфигурации.

Другой вид графа состояний показан на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 - Граф состояний системы

Как можно видеть, процесс конфигурирования доступен только после задания параметров конфигурации.

Приведём примеры и описания некоторых экранов программы конфигурирования (рисунки 4.4 – 4.11).

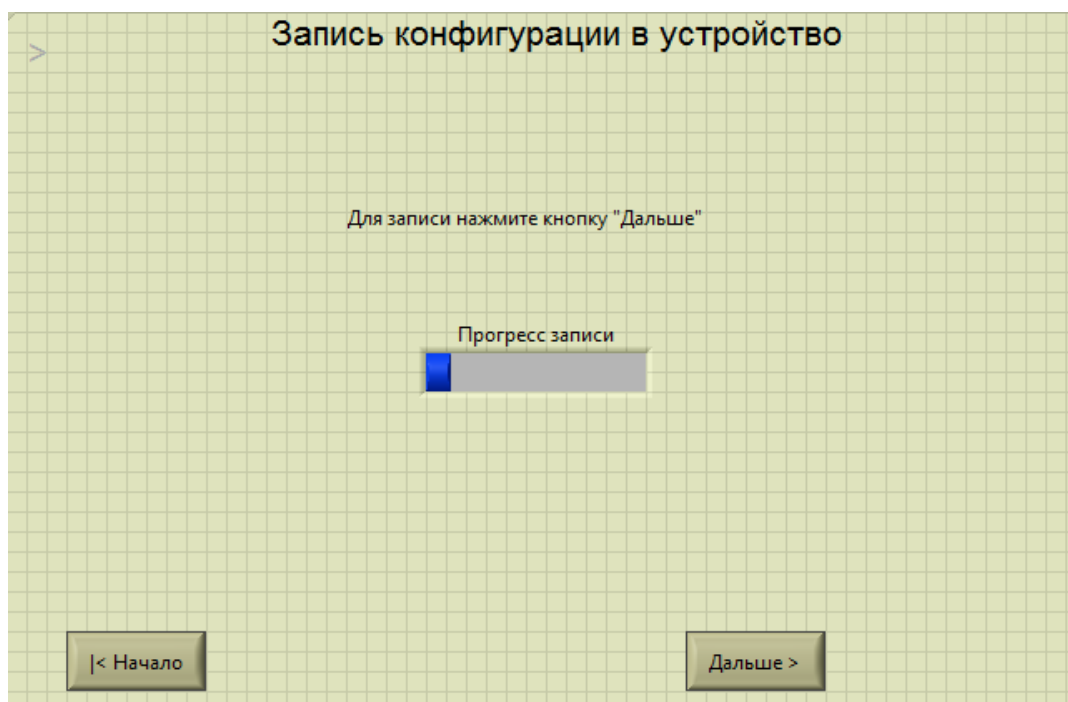


Рисунок 4.4 - Экран записи конфигурации в устройство

При записи конфигурации пользователь может вернуться в основное окно, ничего не делая, либо нажать «Дальше», тогда будет произведена запись, на индикаторе «Прогресс записи» показывается процент записи конфигурации в устройство.

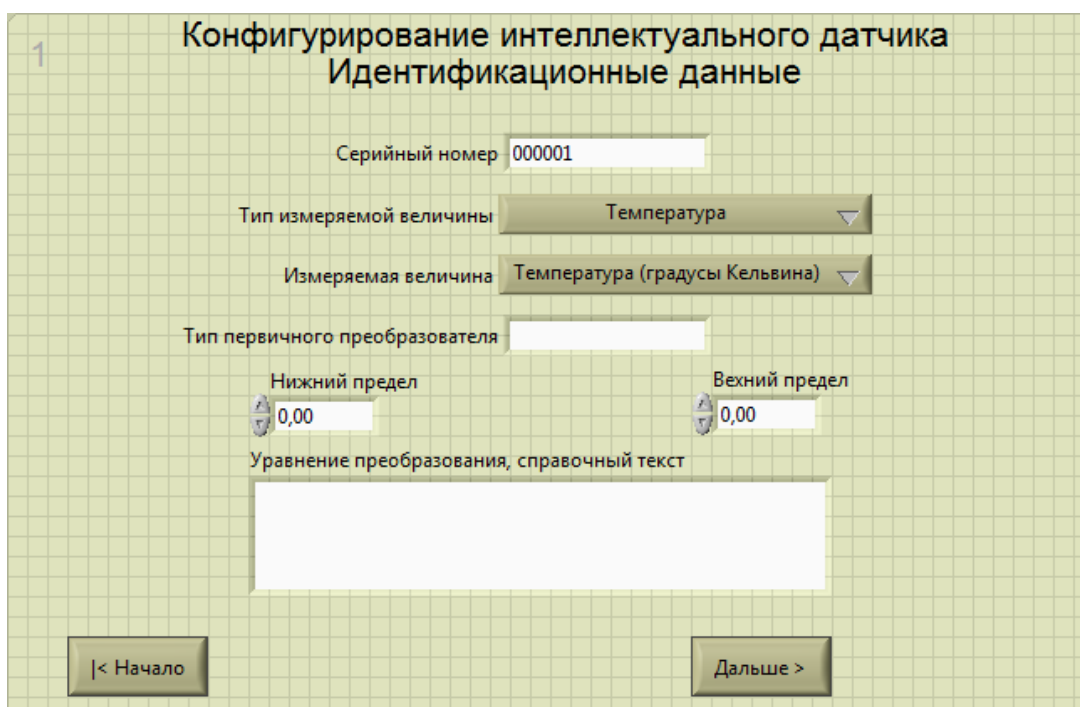


Рисунок 4.5 - Экран первого шага – конфигурирование идентификационных параметров

В поле «Серийный номер» указывается серийный номер датчика. В ниспадающем списке «Тип измеряемой величины» выбирается основной тип датчика, например, температура, давление, ускорение. В ниспадающем списке «Измеряемая величина» задаётся конкретный тип и единица измерения главной выходной величины. В поле «Тип первичного преобразователя» указывается тип используемого первичного преобразователя. В полях «Нижний предел» и «Верхний предел» указываются пределы измерения по основной величине. В поле «Уравнение преобразования» указывается текст уравнения преобразования – для справки.

The screenshot shows a software interface titled "Конфигурирование интеллектуального датчика" (Configuring the intelligent sensor) with a subtitle "Конфигурационные данные" (Configuration data). The interface is divided into two main sections: "Номера и назначения вспомогательных каналов" (Numbers and assignments of auxiliary channels) and "Номера и назначения дискретных каналов" (Numbers and assignments of discrete channels). Each section has a header with a spinner control for the number of channels (set to 1) and a table with four rows. Each row contains a spinner for the channel number and a dropdown menu for the channel assignment (all set to "Измерение" - Measurement). At the bottom, there are three buttons: "< Начало" (Start), "< Назад" (Back), and "Дальше >" (Next).

Номера и назначения вспомогательных каналов		Номера и назначения дискретных каналов	
1	Измерение	1	Измерение
0	Измерение	0	Измерение
1	Измерение	1	Измерение
2	Измерение	2	Измерение
3	Измерение	3	Измерение

Рисунок 4.6 - Экран конфигурационных данных

В поле «Количество вспомогательных каналов» указывается количество вспомогательных измерительных каналов, которые используются для измерения, коррекции основной величины. В поле «Количество дискретных каналов» указывается количество дискретных каналов в данной конфигурации, используемых для контроля, сигнализации. В полях «Номера и назначения вспомогательных каналов» и «Номера и назначения дискретных каналов» указываются номера и конкретное назначение задействованных каналов.

3

### Конфигурирование интеллектуального датчика Калибровочные данные

Параметры сегментов

Степень	Коэф-т
3	5,4
2	10,2
1	-9,1
0	0,3

Тип калибровочных данных  
Калибровочная кривая

Номер канала  
0

Обновить

< Начало < Назад Дальше >

Рисунок 4.7 - Экран калибровочных данных

В выпадающем списке «Тип калибровочных данных» выбирается способ задания калибровочных данных: таблица, кривая, АЧХ. В поле «Параметры сегментов» задаются характеристики кривой – для типа «Калибровочная кривая». В поле «Номер канала» указывается номер канала, для которого будут обновляться данные. Обновление производится при нажатии на кнопку «Обновить».

4

### Конфигурирование интеллектуального датчика Уравнения датчиков

Параметры уравнений

Коэф-т	Базовая функция
5,4	ln
10,2	ln
-9,1	exp
0,3	x^y

Номер канала  
1

Обновить

< Начало < Назад Дальше >

Рисунок 4.8 - Экран уравнений датчиков

В поле «Параметры уравнений» задаётся последовательность базовых функций уравнения и их коэффициентов. В поле «Номер канала» задаётся номер канала, для которого хотим задать уравнение преобразования. Обновление производится при нажатии на кнопку «Обновить».

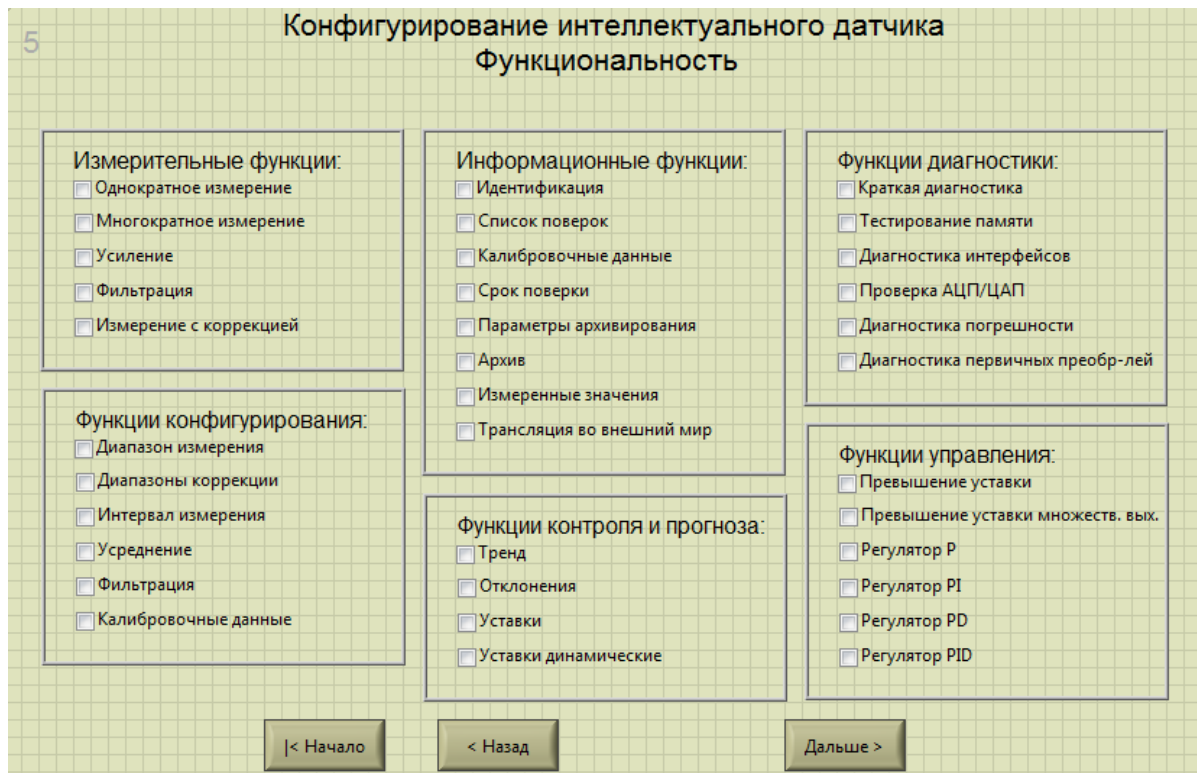


Рисунок 4.9 - Экран функциональности интеллектуального датчика

Здесь задаётся конкретная функциональность экземпляра интеллектуального датчика. Выставление флага в какой либо позиции включает вывод экрана конфигурирования соответствующей функции при продолжении редактирования конфигурации.

В поле «Измерительные параметры» задаётся частота дискретизации, количество отсчётов за цикл измерения, коэффициент усиления на измерительном канале. Номер обновляемого канала задаётся в поле «Номер канала». Обновление данных производится при нажатии на кнопку «Обновить».

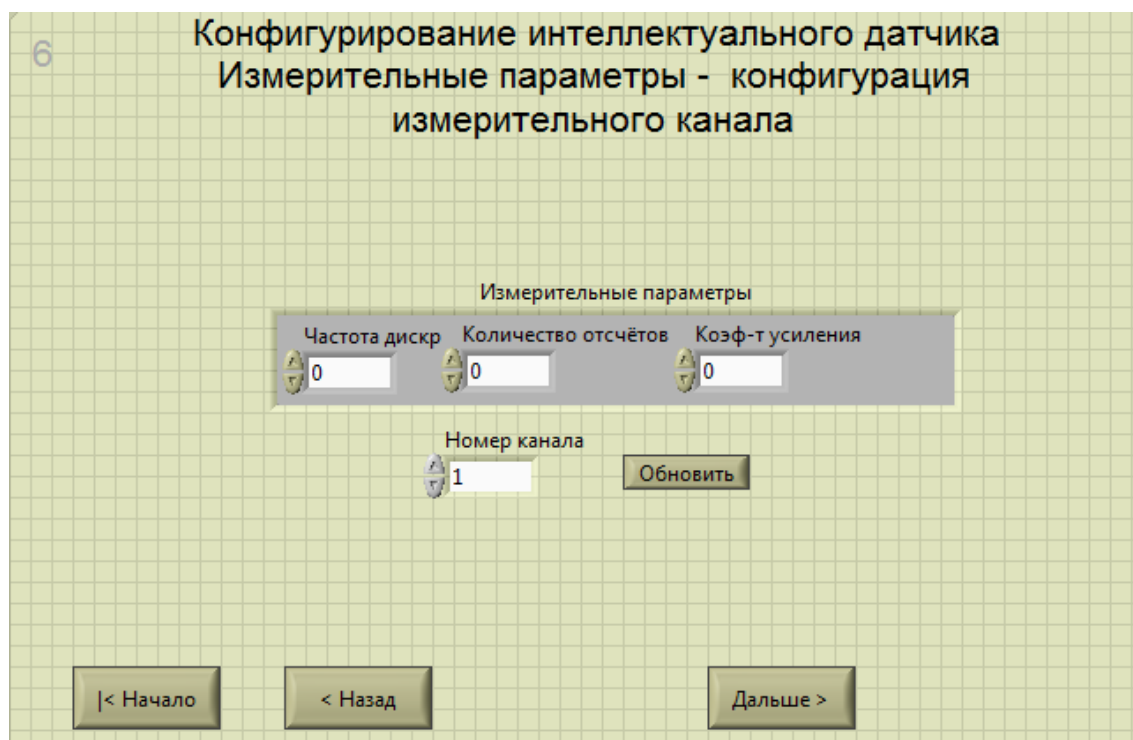


Рисунок 4.10 - Экран измерительных параметров

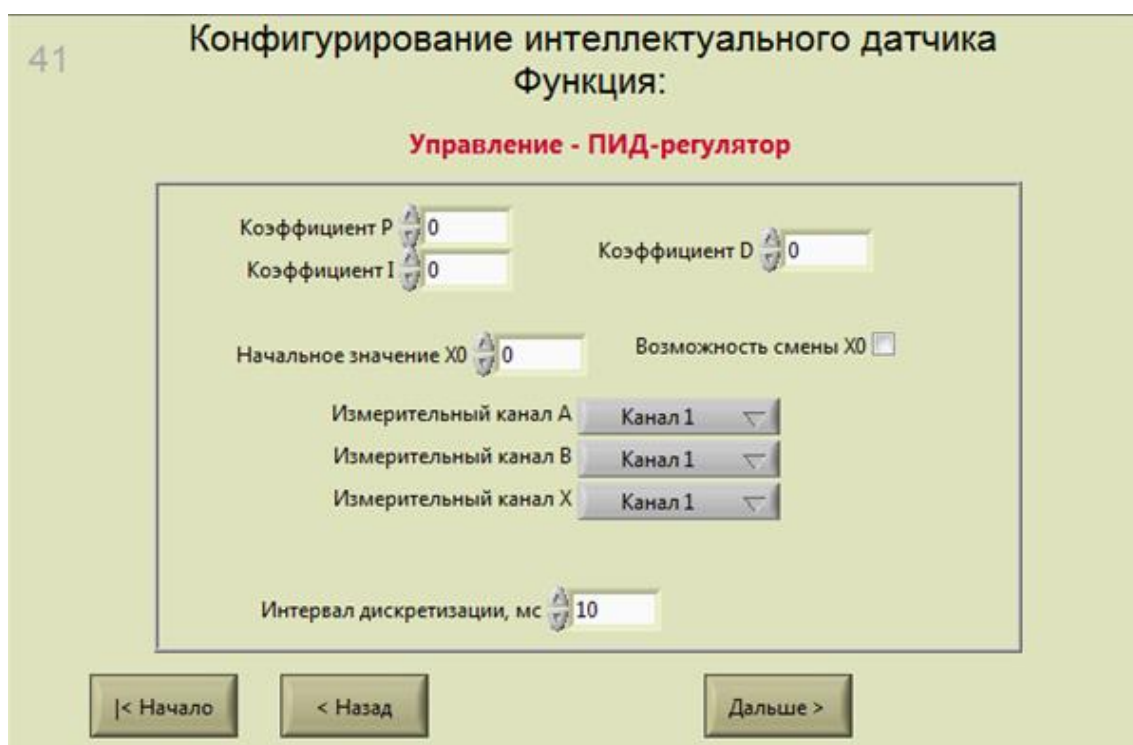


Рисунок 4.11 - Экран функции ПИД-регулятора

В полях «Коэффициент Р», «Коэффициент I», «Коэффициент D» задаются одноимённые коэффициенты регулятора. В поле «Начальное значение X0» задаются начальные значения опорной величины. Флажок «Возможность смены

X0» позволяет задать возможность отработки смены этого значения устройством в процессе своей работы. В списках «Измерительный канал ...» выбирается конкретный из сконфигурированных ранее каналов для измерения величины. В поле «Интервал дискретизации, мс» задаётся интервал дискретизации для отработки всего ПИД-регулятора.

#### **4.2.2 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛА ОБМЕНА**

В аппаратной части МРИД уже была заложена реализация протокола обмена Modbus.

Данный протокол был выбран за его распространённость, относительную простоту реализации и то, что он уже давно стандартизован.

Согласно документации [76], в протоколе различаются два варианта Modbus ASCII и Modbus RTU.

Modbus был разработан компанией Modicon (в настоящее время принадлежит Schneider Electric) для использования в её контроллерах с программируемой логикой. Впервые спецификация протокола была опубликована в 1979 году [77]. Это был открытый стандарт, описывающий формат сообщений и способы их передачи в сети состоящей из различных электронных устройств.

Первоначально контроллеры MODICON использовали последовательный интерфейс RS-232 [77]. Позднее стал применяться интерфейс RS-485, так как он обеспечивает более высокую надёжность, позволяет использовать более длинные линии связи и подключать к одной линии несколько устройств.

Многие производители электронного оборудования поддержали стандарт, на рынке появились сотни использующих его изделий. В настоящее время развитием Modbus занимается некоммерческая организация Modbus-IDA, созданная производителями и пользователями электронных приборов.



Modbus относится к протоколам прикладного уровня сетевой модели OSI. Контроллеры на шине Modbus взаимодействуют, используя клиент-серверную модель, основанную на транзакциях, состоящих из запроса и ответа.

Обычно в сети есть только один клиент, так называемое, «главное» (англ. master) устройство, и несколько серверов — «подчинённых» (slaves) устройств. Главное устройство инициирует транзакции (передаёт запросы). Подчинённые устройства передают запрашиваемые главным устройством данные, или производят запрашиваемые действия. Главный может адресоваться индивидуально к подчинённому или инициировать передачу широковещательного сообщения для всех подчинённых устройств. Подчинённое устройство формирует сообщение и возвращает его в ответ на запрос, адресованный именно ему. При получении широковещательного запроса ответное сообщение не формируется.

Спецификация Modbus описывает структуру запросов и ответов. Их основа — элементарный пакет протокола, так называемый PDU (Protocol Data Unit). Структура PDU не зависит от типа линии связи и включает в себя код функции и поле данных. Код функции кодируется однобайтовым полем и может принимать значения в диапазоне 1...127. Диапазон значений 128...255 зарезервирован для кодов ошибок. Поле данных может быть переменной длины. Размер пакета PDU ограничен 253 байтами.

Для передачи пакета по физическим линиям связи PDU помещается в другой пакет, содержащий дополнительные поля. Этот пакет носит название ADU (Application Data Unit). Формат ADU зависит от типа линии связи.

Существуют три основных реализации протокола Modbus, две для передачи данных по последовательным линиям связи, как медным EIA/TIA-232-E (RS-232), EIA-422, EIA/TIA-485-A (RS-485), так и оптическим и радио:

Modbus ASCII — для обмена используются только ASCII символы. Для проверки целостности используется алгоритм en:Longitudinal redundancy check. Сообщение разделяется на столбцы с помощью символа «:» и заканчивается символами новой строки CR/LF.

Общая структура ADU следующая (в зависимости от реализации, некоторые из полей могут отсутствовать): адрес ведомого устройства, код функции, данные, блок обнаружения ошибок.

Где адрес ведомого устройства — адрес подчинённого устройства, к которому адресован запрос. Ведомые устройства отвечают только на запросы, поступившие в их адрес. Ответ также начинается с адреса отвечающего ведомого устройства, который может изменяться от 1 до 247. Адрес 0 используется для широковещательной передачи, его распознаёт каждое устройство, адреса в диапазоне 248...255 — зарезервированы. Номер функции — это следующее однобайтное поле кадра. Оно говорит ведомому устройству, какие данные или выполнение какого действия требует от него ведущее устройство. Данные — поле содержит информацию, необходимую ведомому устройству для выполнения заданной мастером функции или содержит данные, передаваемые ведомым устройством в ответ на запрос ведущего. Длина и формат поля зависит от номера функции. Блок обнаружения ошибок — контрольная сумма для проверки отсутствия ошибок в кадре.

Максимальный размер ADU для последовательных сетей RS232/RS485 — 256 байт, для сетей TCP — 260 байт.

Для Modbus TCP ADU выглядит следующим образом: ид транзакции, ид протокола, длина пакета, адрес ведомого устройства, код функции, данные.

Где ид транзакции — два байта, обычно нули, ид протокола — два байта, нули, длина пакета — два байта, старший затем младший, длина следующей за этим полем части пакета, адрес ведомого устройства — адрес подчинённого устройства, к которому адресован запрос. Обычно игнорируется, если соединение установлено с конкретным устройством. Может использоваться, если соединение установлено с мостом, который выводит нас, например, в сеть RS485.

Одно из типичных применений протокола — чтение и запись данных в регистры контроллеров. Спецификация протокола определяет четыре таблицы данных, которые наглядно представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Четыре таблицы данных протокола Modbus

Таблица	Тип элемента	Тип доступа
Дискретные входы ( <i>Discrete Inputs</i> )	один бит	только чтение
Регистры флагов ( <i>Coils</i> )	один бит	чтение и запись
Регистры ввода ( <i>Input Registers</i> )	16-битное слово	только чтение
Регистры хранения ( <i>Holding Registers</i> )	16-битное слово	чтение и запись

Доступ к элементам в каждой таблице осуществляется с помощью 16-битного адреса, первой ячейке соответствует адрес 0. Таким образом, каждая таблица может содержать до 65536 элементов. Спецификация не определяет, что физически должны представлять собой элементы таблиц и по каким внутренним адресам устройства они должны быть доступны. Например, допустимо организовать перекрывающиеся таблицы, В этом случае команды работающие с дискретными данными и с 16-битными регистрами будут фактически обращаться к одним и тем же данным.

Следует отметить, что со способом адресации данных связана определённая путаница. Modbus был первоначально разработан для контроллеров Modicon. В этих контроллерах для каждой из таблиц использовалась специальная нумерация. Например, первому регистру ввода соответствовал номер ячейки 30001, а первому регистру хранения — 40001. Таким образом, регистру хранения с адресом 107 в команде Modbus соответствовал регистр № 40108 контроллера. Хотя такое соответствие адресов больше не является частью стандарта, некоторые программные пакеты могут автоматически «корректировать» вводимые пользователем адреса, например, вычитая 40001 из адреса регистра хранения.

#### Чтение данных

Для чтения значений из перечисленных выше таблиц данных используются функции с кодами 1—4 (шестнадцатеричные значения 0x01—0x04):

1 (0x01) — чтение значений из нескольких регистров флагов (Read Coil Status)

2 (0x02) — чтение значений из нескольких дискретных входов (Read Discrete Inputs)

3 (0x03) — чтение значений из нескольких регистров хранения (Read Holding Registers)

4 (0x04) — чтение значений из нескольких регистров ввода (Read Input Registers)

Запрос состоит из адреса первого элемента таблицы, значение которого требуется прочитать, и количества считываемых элементов. Адрес и количество данных задаются 16-битными числами, старший байт каждого из них передается первым.

В ответе передаются запрошенные данные. Количество байт данных зависит от количества запрошенных элементов. Перед данными передается один байт, значение которого равно количеству байт данных.

Значения регистров хранения и регистров ввода передаются начиная с указанного адреса, по два байта на регистр, старший байт каждого регистра передаётся первым.

Значения флагов и дискретных входов передаются в упакованном виде: по одному биту на флаг. Единица означает включённое состояние, ноль — выключенное. Значения запрошенных флагов заполняют сначала первый байт, начиная с младшего бита, затем следующие байты, также от младшего бита к старшим. Младший бит первого байта данных содержит значение флага, указанного в поле «адрес». Если запрошено количество флагов, не кратное восьми, то значения лишних битов заполняются нулями

Запись одного значения:

5 (0x05) — запись значения одного флага (Force Single Coil);

6 (0x06) — запись значения в один регистр хранения (Preset Single Register).

Команда состоит из адреса элемента (2 байта) и устанавливаемого значения (2 байта).

Для регистра хранения значение является просто 16-битным словом.

Для флагов значение 0xFF00 означает включённое состояние, 0x0000 — выключенное, другие значения недопустимы.

Если команда выполнена успешно, ведомое устройство возвращает копию запроса.

Запись нескольких значений:

15 (0x0F) — запись значений в несколько регистров флагов (Force Multiple Coils);

16 (0x10) — запись значений в несколько регистров хранения (Preset Multiple Registers).

Команда состоит из адреса элемента, количества изменяемых элементов, количества передаваемых байт устанавливаемых значений и самих устанавливаемых значений. Данные упаковываются так же, как в командах чтения данных.

Ответ состоит из начального адреса и количества изменённых элементов.

Конкретная реализация протокола Modbus, которая использована в интеллектуальном датчике — это Modbus ASCII. При этом из всего множества используются функция 03h — Read Holding Registers — для чтения данных из устройства, а для записи — 10h — Preset Multiple Registers.

В таблице 4.2 приведено краткое описание реализации Modbus с указанием адресов и размеров посылок и назначением каждого запроса.

Таблица 4.2 - Запросы и параметры запросов на конфигурирование

Запрос	Адрес	Количество слов	Примечание
<u>Идентификационные данные</u>			
Серийный номер	0x0000	8	Текст
Тип измеряемой величины	0x0001	1	Код
Измеряемая величина	0x0002	1	Код
Тип основного первичного преобразователя	0x0003	1	Код

Продолжение таблицы 4.2

Диапазон измерений	0x0004	4	Float, два значения
Основное уравнение преобразования	0x0005	80	Текст ASCII
<u>Конфигурационные данные</u>			
Количество вспомогательных каналов	0x0010	1	Int число
Номера и назначения вспомогательных каналов	0x0011	8	На каждый канал пара – число-код по одному байту
Количество дискретных каналов	0x0012	1	Int число
Номера и назначения дискретных каналов	0x0013	8	На каждый канал пара - число-код по одному байту
<u>Калибровочные данные</u>			
Калибровочные данные для основного канала	0x0020– 0x0400	4-80	Первое слово – вид калибровочных данных (таблица, кривая, АЧХ)  Второе слово – номер канала (0 – основной канал) Далее – данные калибровки
<u>Уравнения датчиков</u>			
Основное уравнение	0x0410- 0x0418	80	Float – коэффициент, слово – код базовой функции

Продолжение таблицы 4.2

Вспомогательное уравнение	0x0420-0x0428	80	Первое слово – номер канала, для которого указывается уравнение  Float – коэффициент, слово – код базовой функции  Если после первого слова – нулевое слово, значит, для этого канала уравнение сбрасывается
Вспомогательное уравнение временной коррекции	0x0430-0x0438	80	Float – коэффициент, слово – код базовой функции
<u>Функциональность интеллектуального датчика</u>			
Состав функций по группам	0x0500	8	Битовое поле на 128 опций максимум
<u>Измерительные параметры</u>			
Конфигурация измерительного канала	0x0600	16	Номер канала, частота дискретизации, количество отсчётов, коэффициент усиления
Фильтрация	0x0601	16	Номер канала, тип фильтра, частота среза1, частота среза2, количество отсчётов в выборке
Линеаризация	0x0602	32-80	Номер канала, коэффициент, пара значений диапазона, коэффициент, пара значений диапазона

Продолжение таблицы 4.2

Архивация	0x0603	4	Номер канала, глубина архивации
Усреднение	0x0604	8	Номер канала, тип усреднения, выборка усреднения
Уставки	0x0605	8	Номер канала, флаг контроля превышения, верхняя уставка, нижняя уставка
Динамические уставки	0x0606	10	Номер канала, флаг контроля превышения, верхняя уставка, нижняя уставка, интервал анализа
Тренд	0x0607	8	Номер канала, тип уравнения, глубина анализа
<u>Диагностические параметры</u>			
Диагностика	0x0700	4	Флаги включения внутренних диагностик, интервал диагностирования
<u>Функции управления</u>			
Превышение уставки на дискретный канал	0x0800	4	Номер канала контролируемого, номер канала дискретного, начальное состояние, начальная задержка, длительность импульса, тип сигнала
Превышение уставки на несколько дискретных каналов	0x0801	16	Номер канала контролируемого, номер канала дискретного, начальное состояние, начальная задержка, длительность импульса, тип сигнала



Продолжение таблицы 4.2

ПИД-регулятор	0x0802	24	Значения коэффициентов P, I, D, значение X0, интервал дискретизации, назначение каналов A, B, X, флаги типа регулятора –П-, ПИ-, ПИД
---------------	--------	----	--

Кроме этого, был проведён анализ достаточности этих функций для использования с интеллектуальным датчиком. Для этого было оценено, какой объём данных можно адресовать в устройстве, исходя из того, что параметр адреса в запросе Modbus интерпретируется не явным образом, а косвенным, то есть, адресация не является прямым отображением внутренней адресации устройства.

Адреса, доступные в функциях 03h и 10h: 0x0000...0xFFFF – всего 64K двоичных.

Размер посылки будем варьировать от 0x02 до 0x80 слов.

Перемножив эти значения, получим в пределе адресуемую ёмкость в 16 мегабайт. Учитывая, что первые варианты интеллектуального датчика содержат память до 1 мегабайта, то этого более чем достаточно на ближайшую перспективу.

Для реализации протокола обмена была создана небольшая иерархия виртуальных приборов LabVIEW (рисунок 4.12), выполняющих запись и чтение строки из последовательного порта, разбор и формирование строки в соответствии со стандартом Modbus ASCII, вычисление контрольной суммы LRC, обработку исключений Modbus, формирование посылки в целом на запись и на чтение.

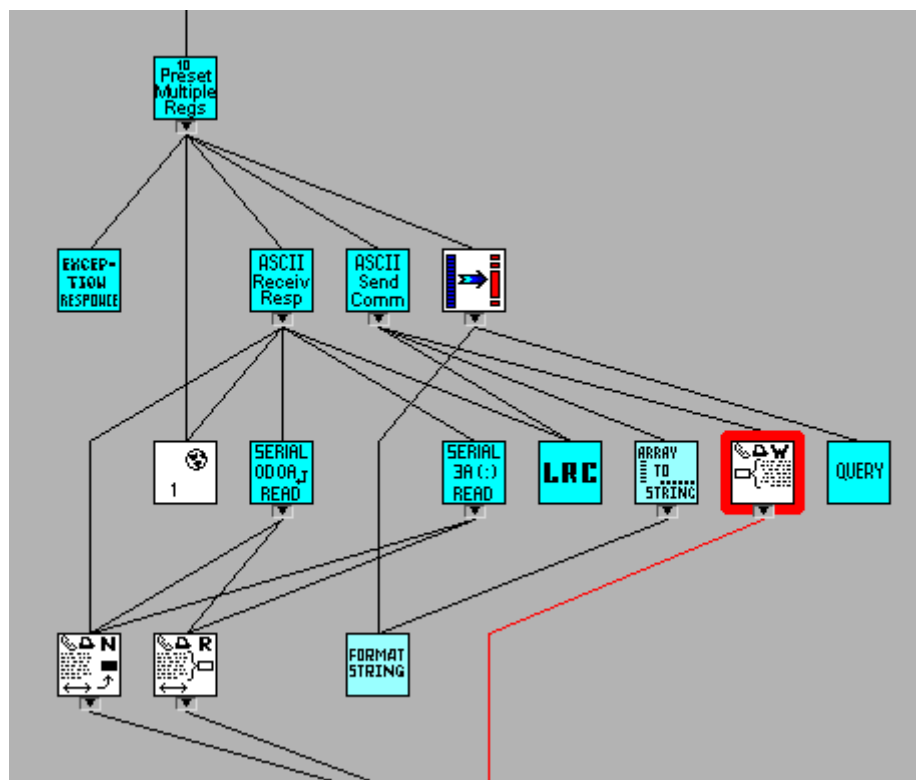


Рисунок 4.12 - Часть иерархии виртуальных приборов в реализации функции 10h Modbus

Рассмотрим подробнее устройство трёх основных приборов: Command\_10\_PresetMultipleRegs.vi (реализация функции 10h), ReceiveResponse\_ASCII.vi (обработка ответа), SendCommand\_ASCII.vi (формирование посылки).

Блок-диаграмма прибора Command\_10\_PresetMultipleRegs.vi представлена на рисунках 4.13 – 4.16.

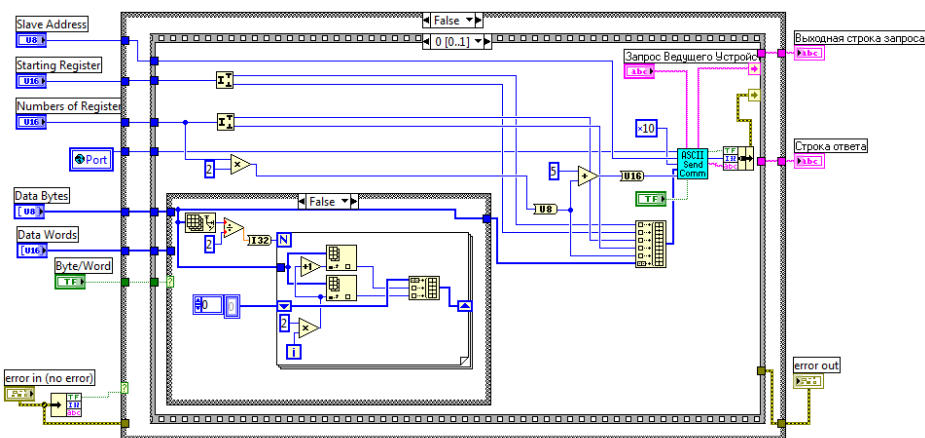


Рисунок 4.13 - Блок диаграмма главного виртуального прибора (Command\_10\_PresetMultipleRegs.vi) реализации функции 10h Modbus

Здесь производится формирование посылки к устройству путём вызова SendCommand\_ASCII.vi и передаче ему всех параметров. На этом рисунке показан вариант формирования посылки из массива байт.

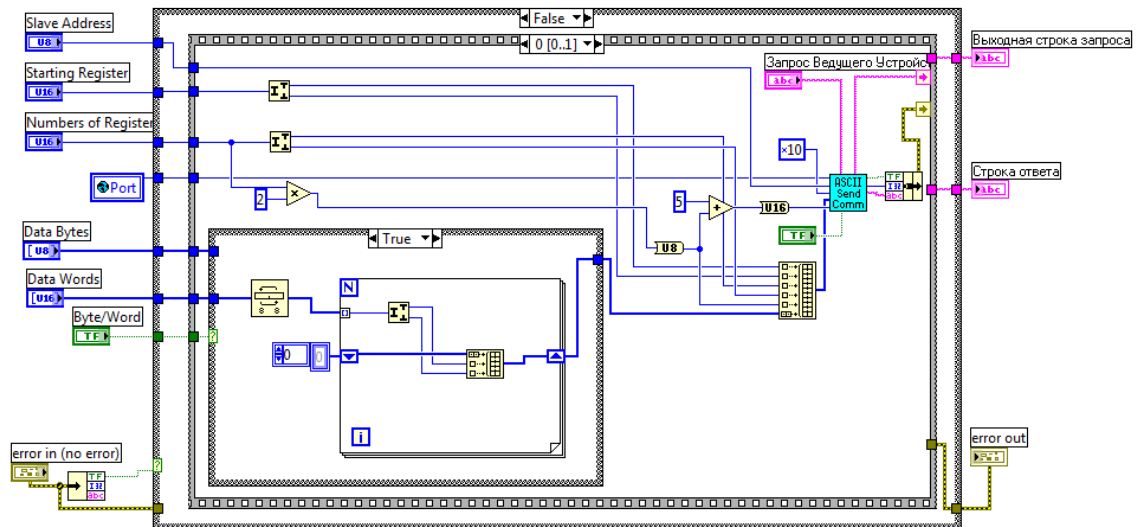


Рисунок 4.14 - Блок диаграмма главного виртуального прибора (Command\_10\_PresetMultipleRegs.vi) реализации функции 10h Modbus

На этом рисунке показан вариант формирования посылки из массива слов, при этом слова расщепляются на байты и из них формируется массив байт.

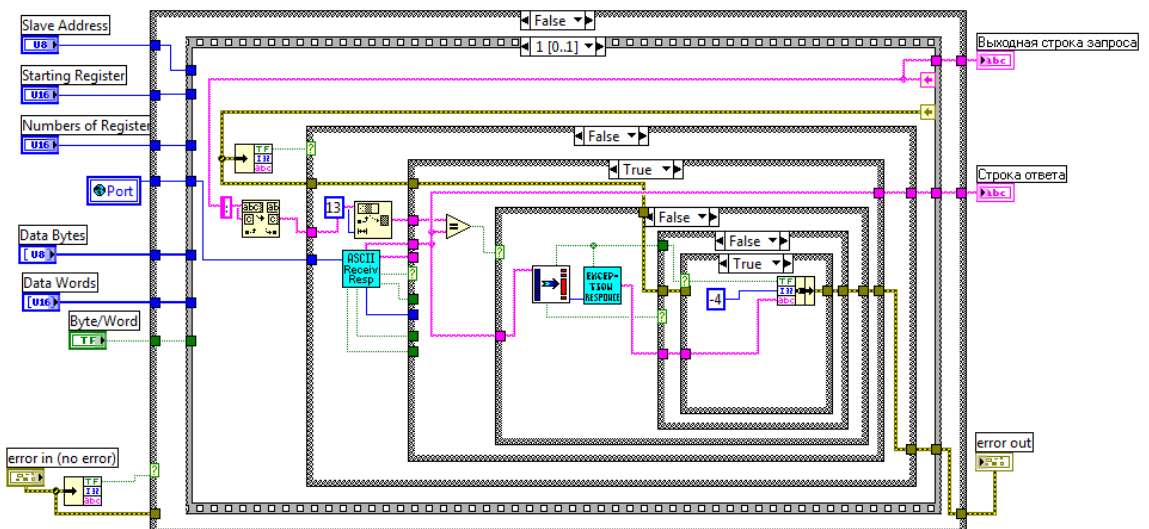


Рисунок 4.15 - Блок диаграмма главного виртуального прибора (Command\_10\_PresetMultipleRegs.vi) реализации функции 10h Modbus

Далее – стадия получения подтверждающего ответа от устройства путём вызова `ReceiveResponse_ASCII.vi` и разбора возвращаемых значений, для удачного приёма ответ устройства анализируется с помощью прибора `Exception.vi` на наличие исключений.

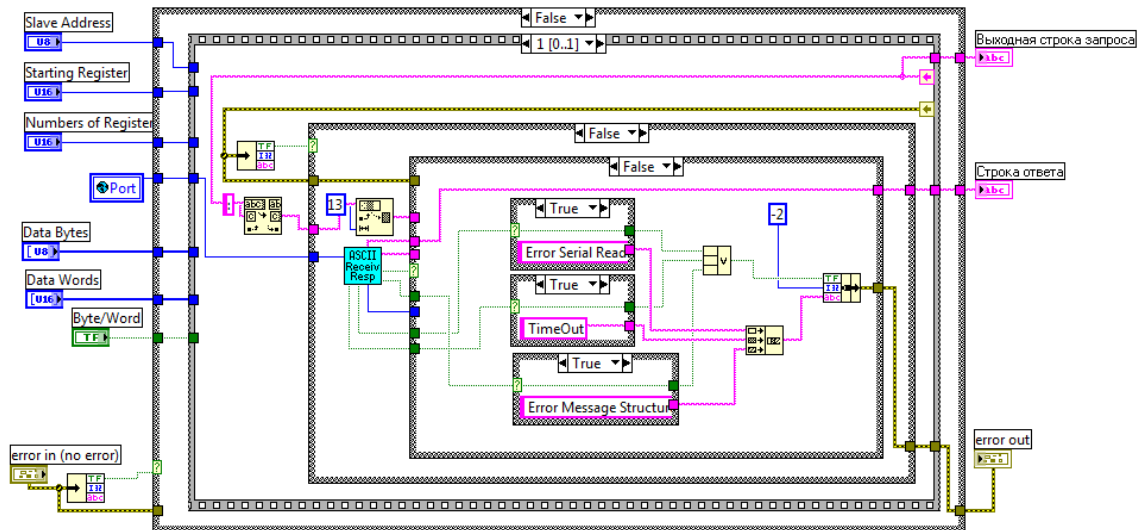


Рисунок 4.16 - Блок диаграмма главного виртуального прибора (`Command_10_PresetMultipleRegs.vi`) реализации функции 10h Modbus

Либо для неудачного приёма ответа анализируется конкретная причина этого – ошибка чтения порта, таймаут, ошибка структуры посылки.

Рассмотрим прибор формирования посылки `SendCommand_ASCII.vi` (рисунок 4.17).

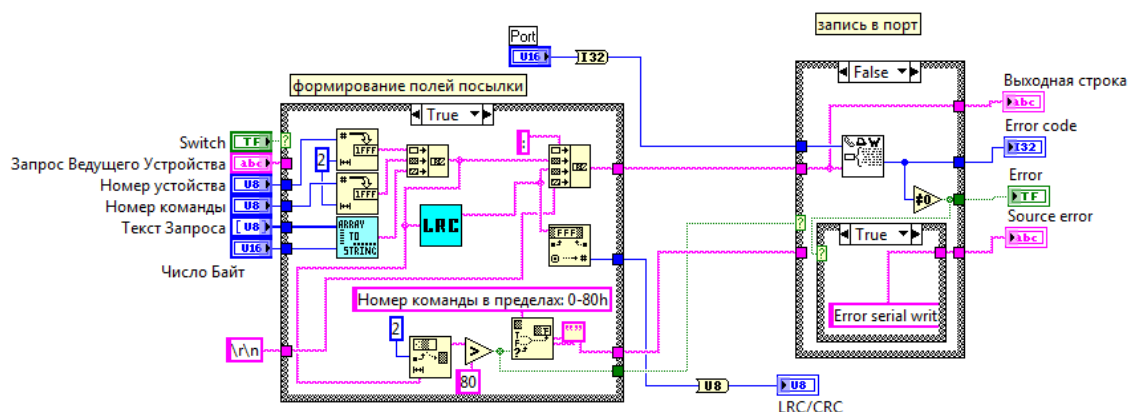


Рисунок 4.17 - Прибор формирования посылки `SendCommand_ASCII.vi`

Прибор состоит всего из двух стадий – формирования полей строки послыки: номер функции, адрес, количество, контрольная сумма LRC, и непосредственно записи в последовательный порт.

Устройство прибора получения подтверждения от устройства ReceiveResponse\_ASCII.vi имеет более сложную структуру (рисунок 4.18).

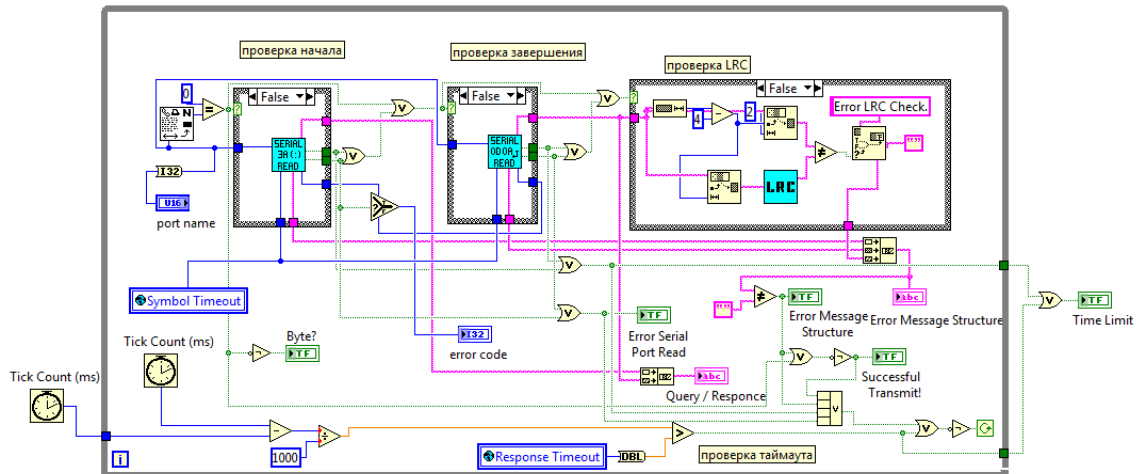


Рисунок 4.18 - Прибор получения подтверждения от устройства ReceiveResponse\_ASCII.vi

В цикле с условием While проводится постоянное чтение байт из последовательного порта, при появлении очередной порции она анализируется на соответствие структуре послыки Modbus – наличие открывающей и закрывающей последовательности символов, правильность циклической контрольной суммы LRC. Также постоянно проверяется общее время выполнения, и при превышении таймаута работа прекращается.

### 4.2.3 РЕАЛИЗАЦИЯ КОНФИГУРИРОВАНИЯ МРИД

На рисунке 4.19 показан граф состояний программы при записи конфигурации в устройство.

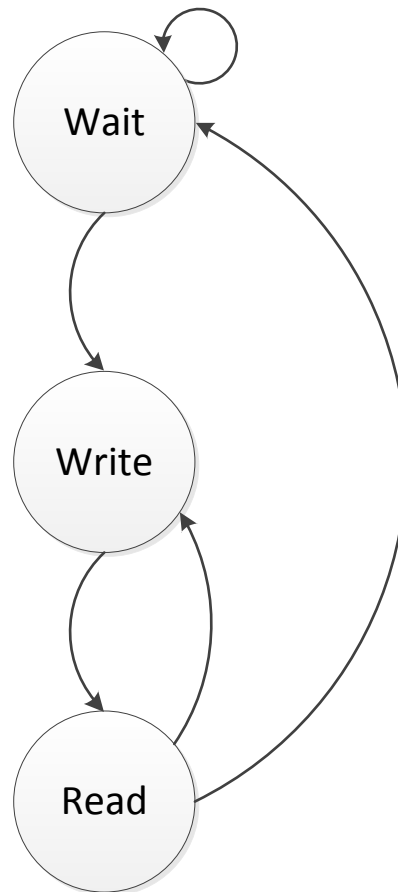


Рисунок 4.19 - Граф состояний программы при записи конфигурации в устройство

Wait – временная пауза между операциями чтения и записи.

Write – запись текущей порции данных.

Read – чтение подтверждения об успешной записи текущей порции данных.

На каждом экране мастера свой набор параметров, так же как и в описании реализации протокола. Можно было бы для каждого экрана создать свой обработчик данных, который бы преобразовывал конкретный состав числовых, булевых, строковых данных в массив значений типа беззнаковое целое, требующийся для записи в устройство. Это означало бы крайне негибкую структуру программы – при любых изменениях в протоколе пришлось бы переделывать программу.

Был найден способ, с использованием типа данных Variant, поддерживаемого LabVIEW, позволяющий элегантно решить эту проблему и

ввести уровень абстракции, при изменениях в протоколе требующий меньших и более ясных для понимания переделок.

Это особый тип данных, который может сохранять любые типы, за исключением типа Object. Например, VBA использует этот тип данных для всех переменных, если только они не объявлены явно.

Данные типа Variant принимают характеристики определенного типа, который они сохраняют в данный момент. Например, если данные типа Variant содержат строковые данные, Variant принимает характеристики типа String, так же для целых чисел, чисел с плавающей запятой, массивов. По сути, это удобный контейнер-обёртка для всех типов данных [78, 79].

В программе для хранения параметров конфигурации используется массив пользовательского типа – абстракция данных для каждого запроса (рисунки 4.20 – 4.22).

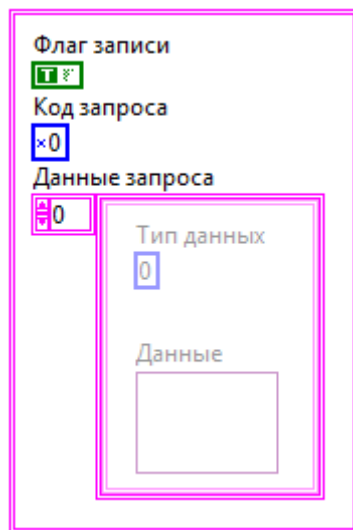


Рисунок 4.20 - Константа пользовательского типа данных для описания параметров запроса

(cluster of 3 elements)  
 Флаг записи (boolean (TRUE or FALSE))  
 Код запроса (long [32-bit integer (-2147483648 to 2147483647)])  
 Данные запроса (1-D array of)  
 (cluster of 2 elements)  
 Тип данных (long [32-bit integer (-2147483648 to 2147483647)])  
 Данные (Variant)

Рисунок 4.21 - Описание типа данных

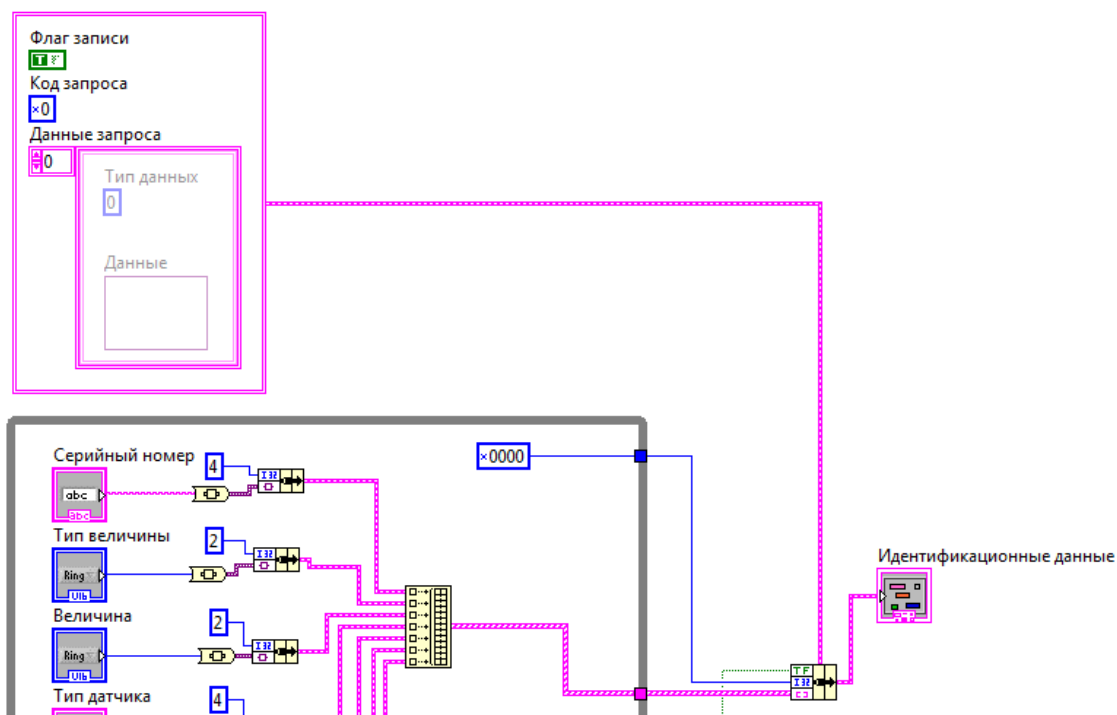


Рисунок 4.22 - Работа с типом данных для описания параметров

Данные запроса состоят из двух полей – поле типа данных, и поле собственно данных. Поле типа данных – числовое, здесь кодируется тип данных для будущего использования во время записи (таблица 4.3).

Таблица 4.3 - Кодирование типа данных

Тип данных	Код для типа данных
Boolean	1
Integer number	2
Float number	3
String	4
Boolean Array	5
Integer Number Array	6
Float Number Array	7
String Array	8

В процессе конфигурирования формируется массив значений обсуждаемого типа. Этот массив подаётся в прибор, реализующий запись конфигурации в устройство.





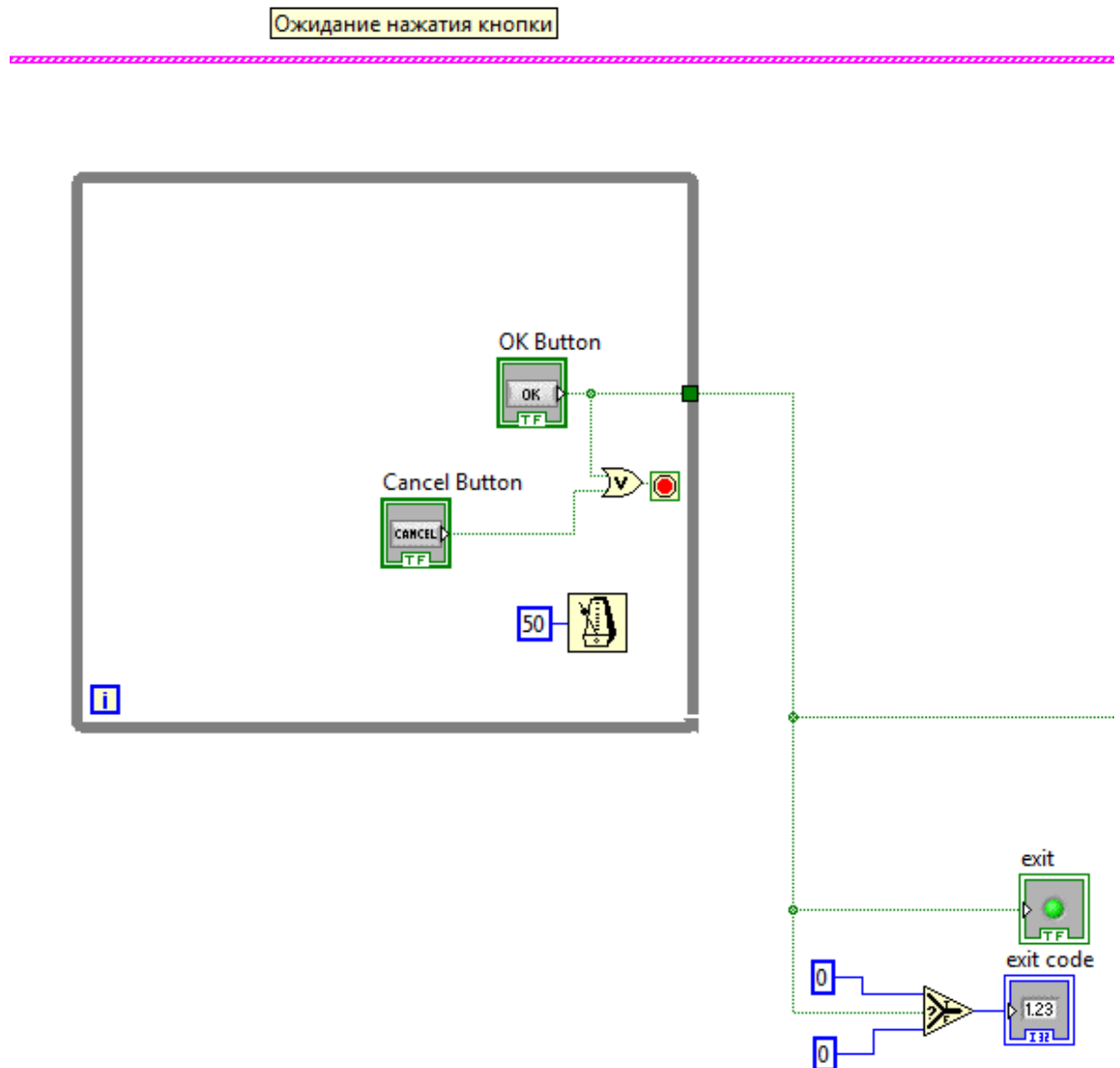


Рисунок 4.24 - Стадия ожидания подтверждения от пользователя в приборе записи конфигурации

На этой стадии ожидается нажатие пользователем кнопок на экране. Здесь ещё не поздно отказаться от записи в устройство. Используется цикл с условием While, он завершается при нажатии любой кнопки.

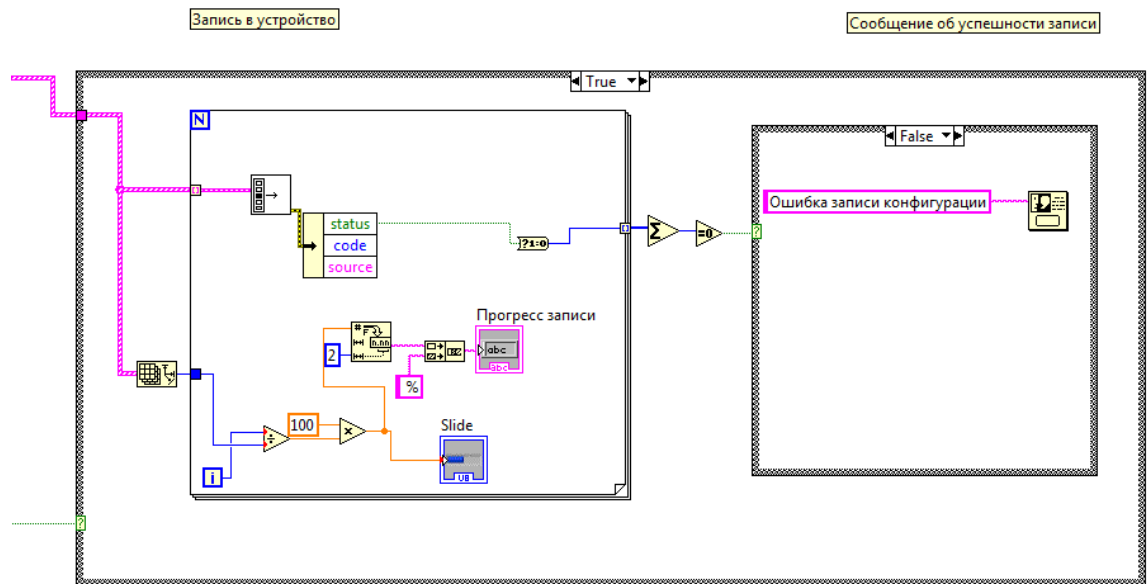


Рисунок 4.25 - Стадия записи в устройство

Эта стадия выполняется при согласии пользователя с записью конфигурации. Массив параметров обрабатывается поэлементно с помощью автоиндексации, каждый параметр передаётся субприбору для непосредственной записи в устройство. Кроме этого, исходя из размера массива (количества параметров) и текущей итерации, вычисляется и отображается на передней панели прогресс записи конфигурации.

Субприбор непосредственной записи возвращает кластер ошибки, если после наличия ошибки установлено, то выходной числовой массив уже будет содержать ненулевые элементы, соответственно, это будет означать неуспешность записи, что используется для отображения пользователю сообщения по итогам записи конфигурации – успешно или неудачно она прошла.

Прибор непосредственной записи производит разбор параметра, преобразования данных из типа Variant в байтовый массив, вызов прибора реализации функции 10h Modbus, а также анализ возможных ошибок записи (рисунок 4.26).

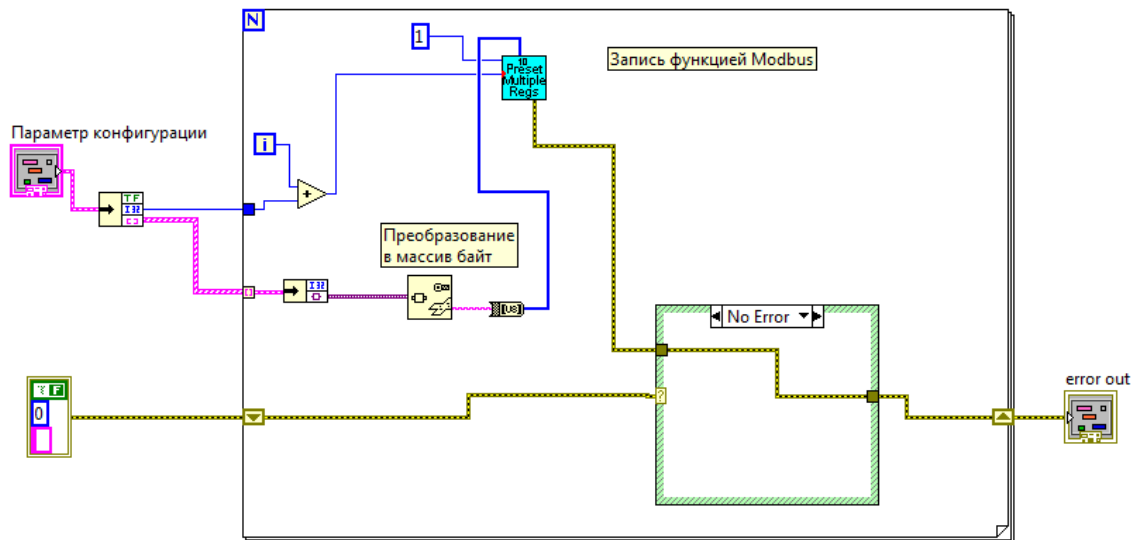


Рисунок 4.26 - Блок-диаграмма прибора непосредственной записи в устройство

### 4.3 ИНФОРМАЦИОННАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основной сложностью при проектировании явилось представление общего уравнения преобразования датчика в базе данных. Данная задача решена с помощью описания величин по каждой из осей и представления зависимостей как двумерных графиков величин.

Информационная система содержит сведения о следующих вещах.

Графики основной и влияющей зависимостей получаются с помощью подсистемы испытаний датчиков. Здесь проводится статистическая оценка для семейств датчиков. В информационную систему графики заносятся в числовом виде, исключаяем приблизительное определение «на глазок» характеристик семейства датчиков.

Калибровочные данные поступают из подсистемы калибровки и поверки, и актуальны только для конкретного экземпляра первичного преобразователя.

Паспортные данные заполняются на каждый экземпляр первичного преобразователя, и включают в себя как данные о семействе, так и калибровочные данные и другие уникальные для экземпляра преобразователя сведения.

Ключевой сущностью, вокруг которой построена информационная система, является конкретный экземпляр первичного преобразователя.

Структуры таблиц базы данных системы показаны в таблицах 4.4 – 4.17

Таблица 4.4 - Единицы измерений Units

Название поля	Тип данных	Описание
UnitID	Счётчик	
UnitTypeID	Числовой	Идентификатор типа измеряемой величины
UnitAbbreviation	Текстовый	Аббревиатура измеряемой величины
UnitDescription	Текстовый	Описание измеряемой величины

Таблица 4.5 - Вендоры (производители) датчиков Vendors

Название поля	Тип данных	Описание
VendorID	Счётчик	
VendorName	Текстовый	Название производителя первичных преобразователей
VendorDescription	Текстовый	Описание производителя преобразователей

Таблица 4.6 - Типы датчиков SensorTypes

Название поля	Тип данных	Описание
SensorTypeID	Счётчик	
SensorTypeName	Текстовый	Описание типа датчика

Таблица 4.7 - Датчики Sensors

Название поля	Тип данных	Описание
SensorID	Счётчик	
SensorModelID	Числовой	Идентификатор модели датчика
SensorName	Текстовый	Название датчика
SensorSerialNumber	Текстовый	Серийный номер датчика
SensorDate	Дата/время	Дата производства датчика

Таблица 4.8 - Измеренные значения Values

Название поля	Тип данных	Описание
ValueID	Счётчик	
ValueDataX	Числовой	Числовое значение по оси X
ValueDataY	Числовой	Числовое значение по оси Y
TimeStamp	Дата/время	Дата и время снятия отсчёта

DataSetID	Числовой	Идентификатор выборки, к которой относится этот отсчёт
-----------	----------	--

Таблица 4.9 - Типы величины для оси X VariablesX

Название поля	Тип данных	Описание
VariableID	Счётчик	
VariableName	Текстовый	Название величины
VariableDescription	Текстовый	Описание величины
VariableUnit	Числовой	Единица измерения
VariableType	Числовой	Тип величины
TimeSupport	Числовой	Является ли величина временной
TimeUnit	Числовой	Единица измерения времени

Таблица 4.10 - Типы величины для оси Y VariablesY

Название поля	Тип данных	Описание
VariableID	Счётчик	
VariableName	Текстовый	Название величины
VariableDescription	Текстовый	Описание величины
VariableUnit	Числовой	Единица измерения
VariableType	Числовой	Тип величины

TimeSupport	Числовой	Является ли величина временной
TimeUnit	Числовой	Единица измерения времени

Таблица 4.11 - Методы измерений Methods

Название поля	Тип данных	Описание
MethodID	Счётчик	
MethodName	Текстовый	Название метода измерений (принципа действия)
MethodDescription	Текстовый	Описание метода измерений

Таблица 4.12 - Измеренные выборки DataSeries

Название поля	Тип данных	Описание
DataSetID	Счётчик	
VariableX	Числовой	Идентификатор величины по оси X
VariableY	Числовой	Идентификатор величины по оси Y
DateTime	Дата/время	Дата и время начала серии отсчётов



Таблица 4.13 - Значения основной зависимости GenericDependency

Название поля	Тип данных	Описание
GenericDependencyID	Счётчик	
DataSetID	Числовой	Идентификатор серии данных, в которой записаны параметры уравнения

Таблица 4.14 - Влияющие зависимости InfluencingDependency

Название поля	Тип данных	Описание
InfluencingDependencyID	Счётчик	
DataSetID	Числовой	Идентификатор серии данных, в которой записаны параметры уравнения

Таблица 4.15 - Влияющие параметры InfluencingValue

Название поля	Тип данных	Описание
InfluencingValueID	Счётчик	
InfluencingValueName	Текстовый	Название влияющей величины
InfluencingValueUnit	Числовой	Единица измерения влияющей величины

## Продолжение таблицы 4.15

InfluencingValueSensorType	Числовой	Идентификатор типа первичного преобразователя для измерения данной величины
----------------------------	----------	---

Таблица 4.16 - Список влияющих величин для моделей датчиков InfluencingValueForModel

Название поля	Тип данных	Описание
InfluencingValueForModelID	Счётчик	
SensorModelID	Числовой	Идентификатор модели (семейства) датчиков
InfluencingValueID	Числовой	Идентификатор влияющих величин

Таблица 4.17 - Модели (семейства) датчиков SensorModels

Название поля	Тип данных	Описание
SensorModelID	Счётчик	
SensorModelName	Текстовый	Название семейства датчиков
SensorModelUnit	Числовой	Идентификатор единицы измерения
SensorModelMethod	Числовой	Идентификатор метода измерения

Продолжение таблицы 4.17

SensorModelVendor	Числовой	Идентификатор производителя датчиков
SensorModelSensorType	Числовой	Идентификатор типа первичного преобразователя
SensorModelMinValue	Числовой	Минимальное измеряемое значение
SensorModelMaxValue	Числовой	Максимальное измеряемое значение
SensorModelGenericDependen cy	Числовой	Идентификатор основной зависимости
SensorModelInfluencingValue s	Числовой	Идентификатор влияющих величин
SensorModelMinTemp	Числовой	Минимальная температура окружающей среды
SensorModelMaxTemp	Числовой	Максимальная температура окружающей среды
SensorModelInfluencingDepen dency	Числовой	Идентификатор влияющей зависимости

Общая схема данных БД показана на рисунке 4.27.

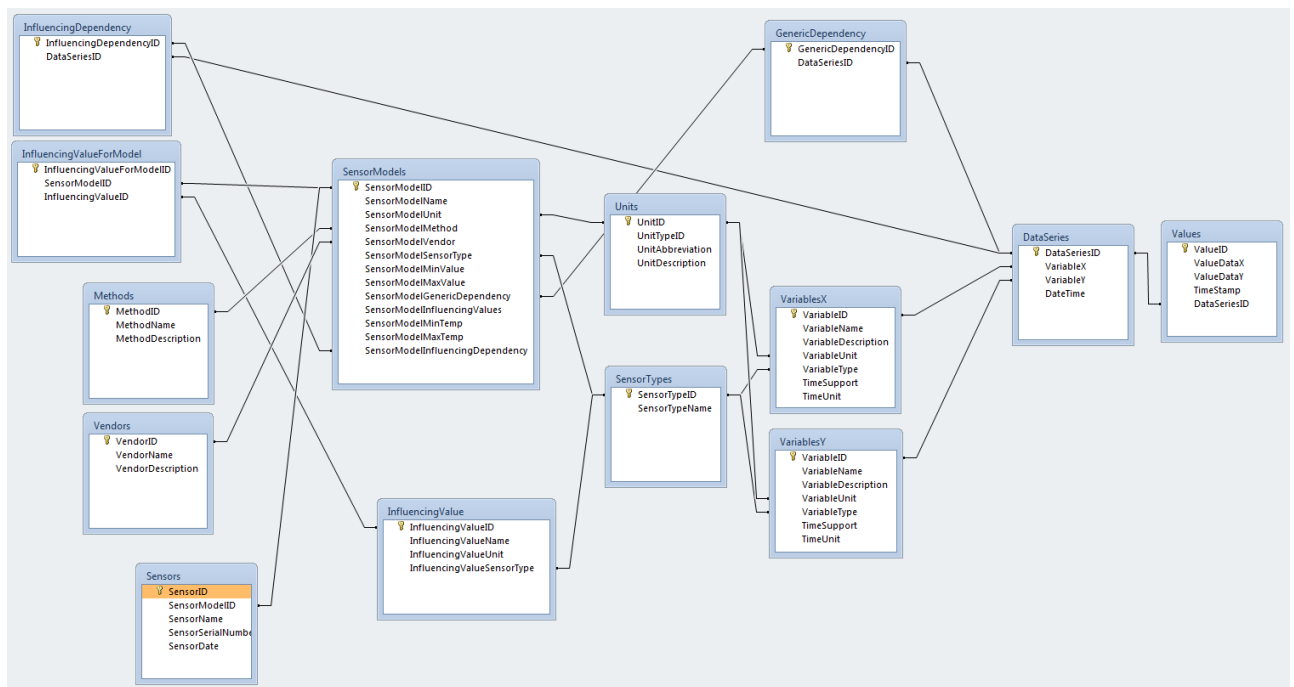


Рисунок 4.27 - Общая схема данных БД

## **ГЛАВА 5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

### **5.1 ОЦЕНКА КОРРЕКЦИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОБОБЩЁННОГО УРАВНЕНИЯ МРИД**

#### **5.1.1 ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ОБОБЩЁННЫМ УРАВНЕНИЕМ**

Первый пункт испытательной программы – оценка погрешности вычислений обобщённым уравнением без учёта погрешностей первичных преобразователей.

Цель испытаний заключается в определении метрологических параметров обобщённого уравнения.

Схема испытаний состоит из двух этапов. На первом этапе производится оценка характеристик многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика с исключением влияющих факторов для измеряемой величины, то есть, при постоянных внешних условиях. На втором этапе производится оценка характеристик МРИД с учётом влияющего фактора измеряемой величины. На первом этапе используется эталонный измеритель и задание входной величины с помощью источника напряжения (рисунок 5.1), на втором этапе таким же образом задаётся и значение влияющего фактора, а в качестве эталонных приняты значения с датчика, полученные на первом этапе (рисунок 5.2). Результаты эталонного измерителя использовались для вычислений с помощью ЭВМ, по рекомендациям из работ [80, 81].

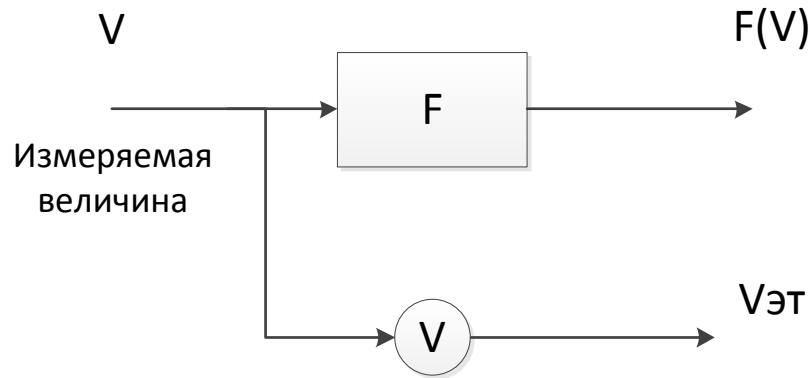


Рисунок 5.1 - Оценка погрешности вычислений обобщённым уравнением без учёта влияющих факторов

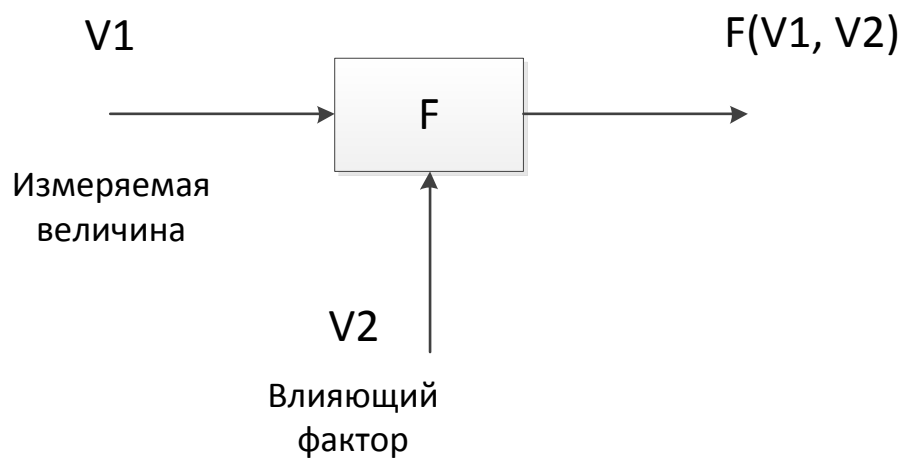


Рисунок 5.2 - Оценка погрешности вычислений обобщённым уравнением с учётом влияющих факторов

На первом этапе проводилось  $N$  испытаний.

На втором этапе проводилось  $N$  испытаний при  $K$  значениях влияющего фактора.

Для каждой выборки в  $N$  показаний проводилось отбрасывание минимального и максимального значения, усреднение, и коррекция с учётом заранее известной погрешностью квантования АЦП.

В этом испытании анализировалась не погрешность, а разница показаний, так как для второго этапа получение эталонного значения связано со значительными трудностями.

Для первого этапа оценивалась разница показаний по формуле [82, 83]

$$\Delta = F(V) - V_{\text{эт}} \quad (5.1)$$

Где  $F(V)$  и  $V_{\text{эт}}$  – усреднённые значения результатов измерений.

Относительная разница показаний по формуле

$$\delta = \frac{F(V) - V_{\text{эт}}}{V_{\text{эт}}} * 100\% \quad (5.2)$$

Для второго этапа абсолютная разница показаний оценивалась как

$$\Delta = F(V_1, V_2) - F(V) \quad (5.3)$$

Где  $F(V_1, V_2)$  и  $F(V)$  – усреднённые значения результатов измерений.

Относительная разница показаний оценивалась как

$$\delta = \frac{F(V_1, V_2) - F(V)}{F(V)} * 100\% \quad (5.4)$$

Результаты испытаний на первом этапе представлены на рисунке 5.3.

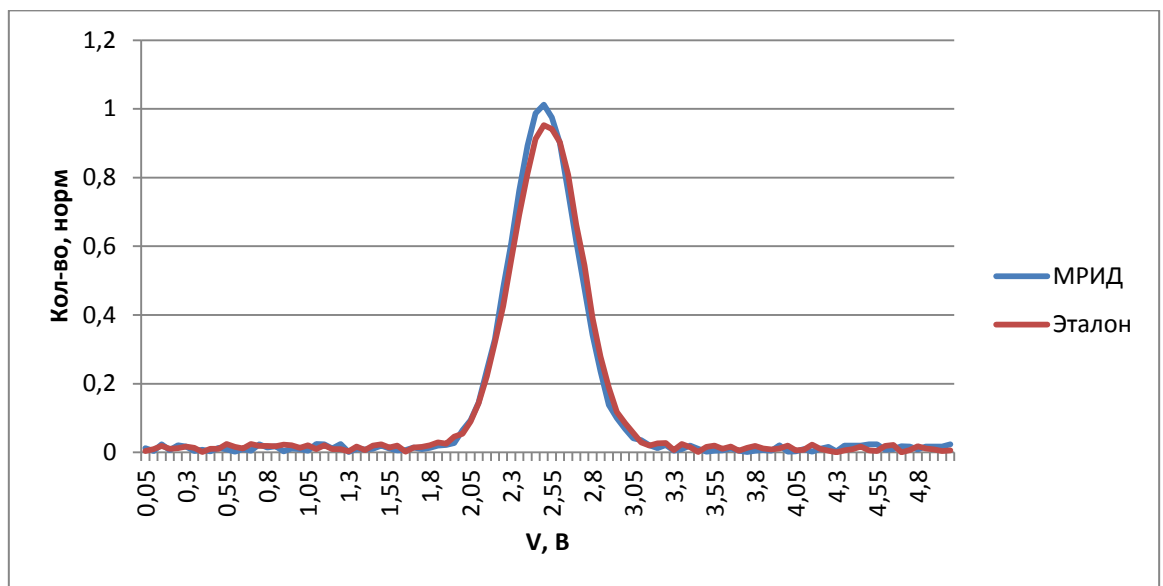


Рисунок 5.3 - Результаты испытаний на первом этапе

Ось X – результаты измерений. Вход 0-5В. Значения в районе 2.5В.

Значение генерировалось имитатором уровня напряжения (реостат).

Измерялось с помощью МРИД и эталонным вольтметром.

Ось Y – количество отсчётов.

Минимальная разница между пиками распределения результатов говорит о хорошей корреляции результатов с эталонным измерителем и, следовательно, о минимальной погрешности вычисления МРИД.

Результаты испытаний на втором этапе представлены на рисунке 5.4.

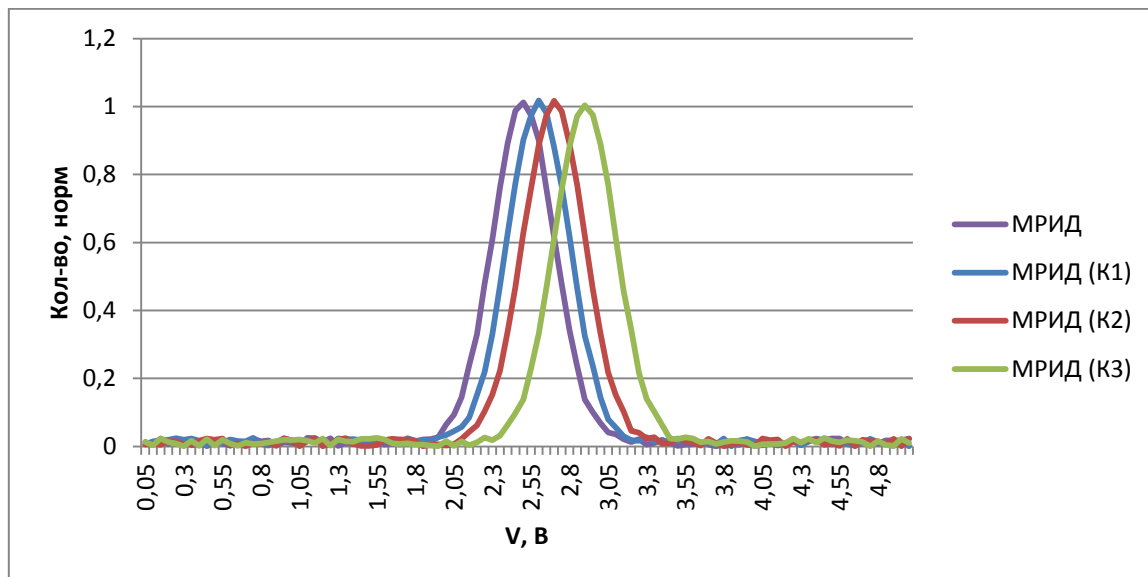


Рисунок 5.4 - Результаты испытаний на втором этапе

Ось X – результаты измерений. Вход 0-5В. Значения в районе 2.5В.

Ось Y – количество отсчётов.

Значение генерировалось имитатором уровня напряжения (реостат). Измерялось с помощью МРИД и эталонным вольтметром.

Значительное расстояние между пиками говорит об успешной коррекции влияющего фактора с помощью МРИД, а также о величине искажения результатов измерений при воздействии влияющего фактора.

### 5.1.2 ОЦЕНКА КОРРЕКЦИИ ВЛИЯЮЩЕГО ФАКТОРА

Оценка коррекции влияющего фактора направлена на выяснение качества коррекции показаний МРИД с первичными преобразователями при воздействии влияющего фактора.

Испытания проводятся в два этапа. В первом эксперименте к МРИД подключаются два первичных преобразователя, для одного из них



конфигурируется использование коррекции влияющего фактора, для другого конфигурируется отключение коррекции. На втором этапе коррекция отключается для первого преобразователя, и включается для второго. Измерения проводятся для каждого преобразователя независимо по собственному каналу (рисунок 5.5).

Для эксперимента использовался фоторезистор VT20N фирмы PerkinElmer Optoelectronics. Температура менялась в диапазоне от +10 до +40 градусов Цельсия, освещение было постоянным на уровне 100 люкс.

Проводится N измерений по K значениям влияющего фактора.

Результаты испытаний усреднялись с предварительным исключением минимального и максимального значения.

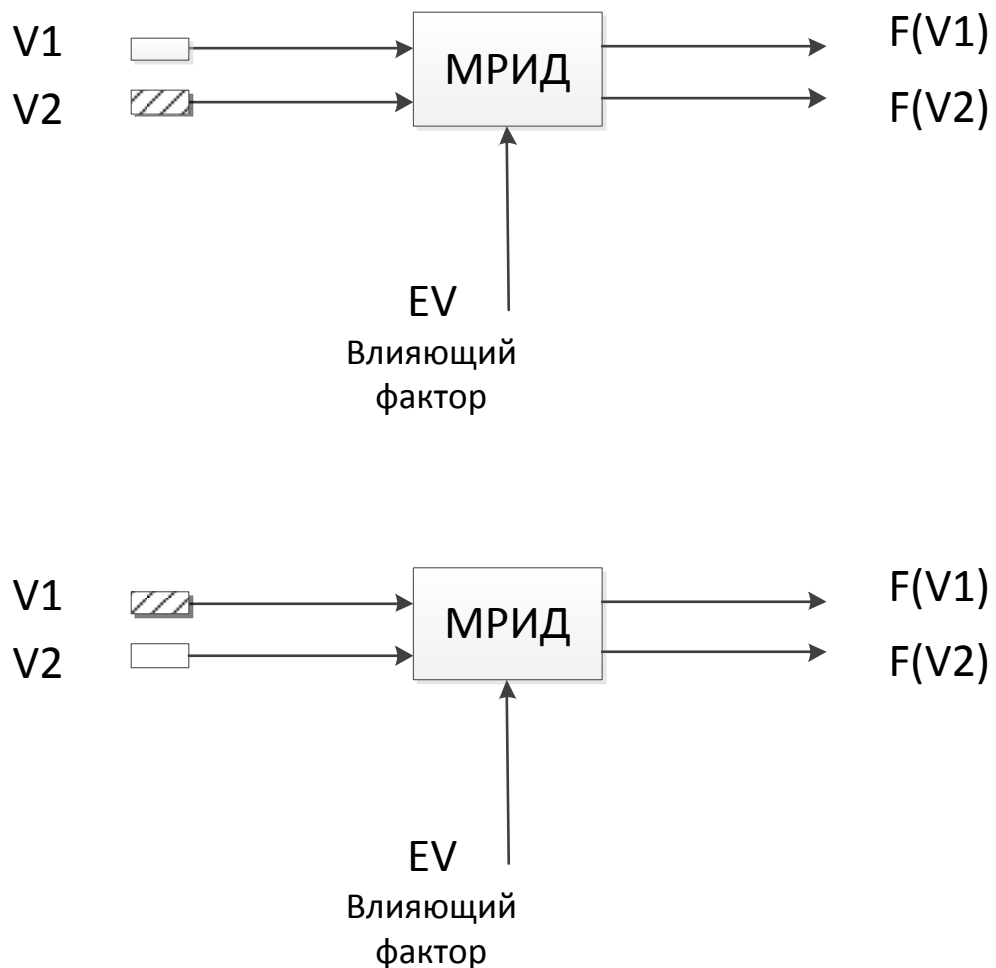


Рисунок 5.5 - Оценка коррекции влияющего фактора

В этом испытании также анализировалась разница показаний. Разность абсолютная определялась по следующей формуле:

$$\Delta_{K1} = \langle V_1 \rangle_{K1} - \langle V_2 \rangle_{K1} \quad (5.5)$$

Где  $K1$  означает значение для влияющего фактора в точке  $K1$ ,  $\langle V_1 \rangle_{K1}$  - усреднённые значения по  $N$  отсчётов в точке  $K1$ .

Результаты испытаний.

Для каждого конкретного значения влияющего фактора построена пара графиков, где выведено распределение отсчётов.

Здесь указаны графики для начального (рисунок 5.6), среднего (рисунок 5.7) и конечного значений влияющего фактора (рисунок 5.8).

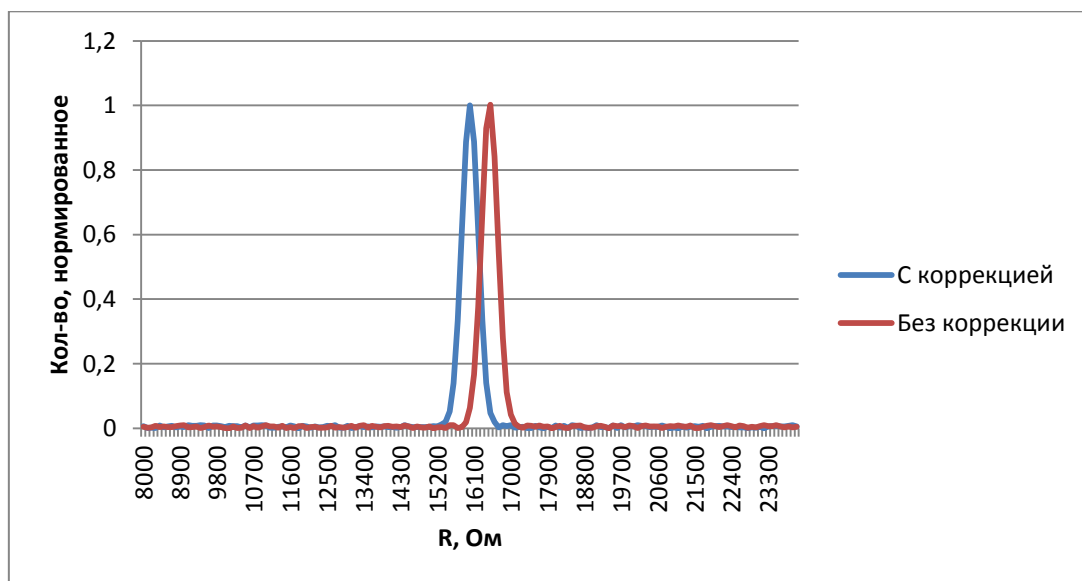


Рисунок 5.6 - Результаты при начальном значении влияющего фактора

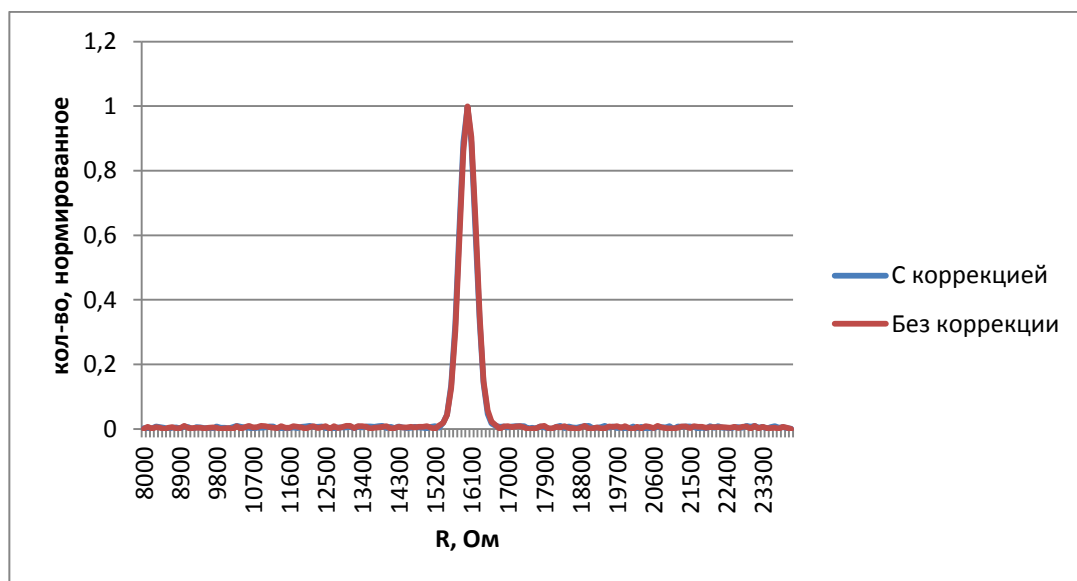


Рисунок 5.7 - Результаты при среднем значении влияющего фактора

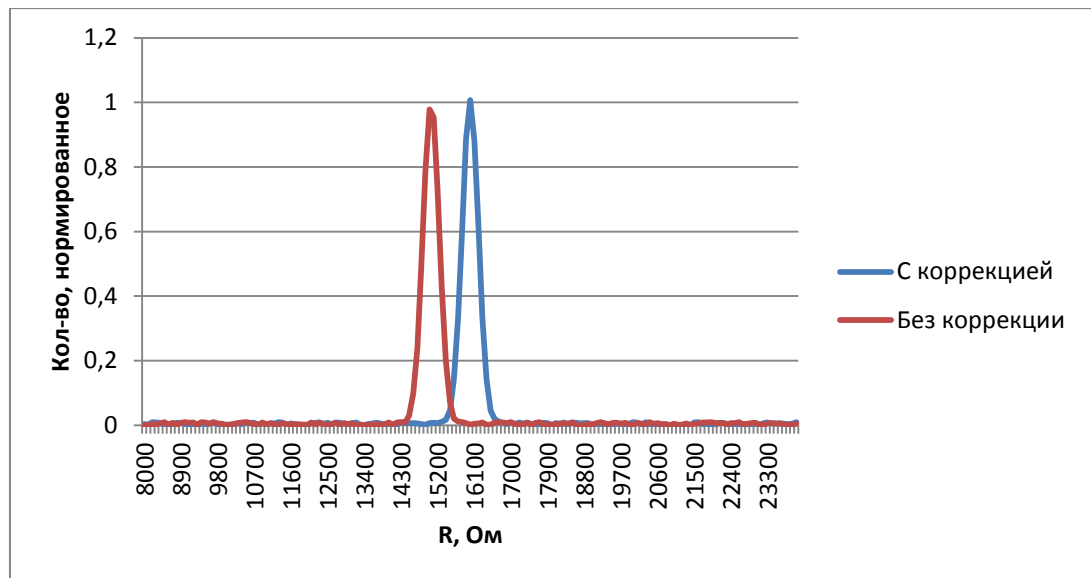


Рисунок 5.8 - Результаты при конечном значении влияющего фактора

Номинальное значение использованного преобразователя составляет 16 кОм, при изменении температуры окружающей среды (в пределах от 10 градусов до 40 градусов по Цельсию) это сопротивление изменяется на 3-6% от номинала в ту или иную сторону. При использовании коррекции результаты меняются в пределах 1%.

### 5.1.3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННОГО ДРЕЙФА

Данные испытания проводились с целью оценки составляющей коррекции временного дрейфа в обобщённом уравнении МРИД. Оценка проводилась в течение 2 суток со стабилизацией параметров окружающей среды, с использованием первичных преобразователей. Для одного преобразователя коррекция временного дрейфа включалась, для другого – выключалась.

Для задания корректирующих значений проводилась предварительная оценка временного дрейфа для конкретного первичного преобразователя. Затем коэффициенты вводились в МРИД и эксперимент проводился во второй раз – с подключением ещё одного первичного преобразователя с отключенной коррекцией временного дрейфа для сравнения.

Для оценки характера временного дрейфа построены графики отдельно для испытуемого и сравнительного измерителей.

Схема испытаний представлена на рисунке 5.9.

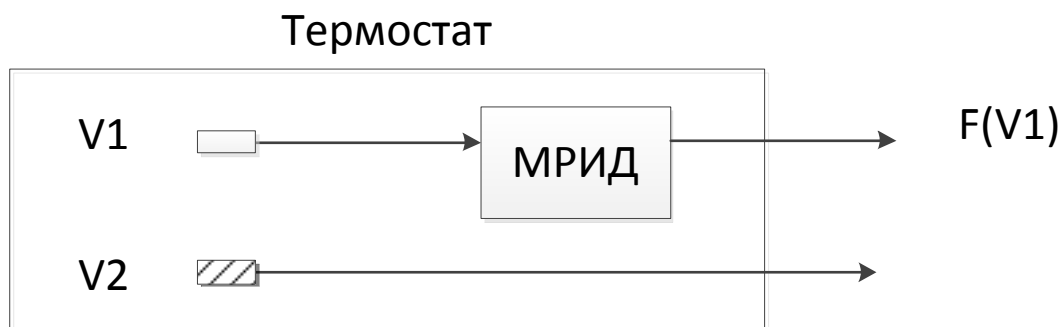


Рисунок 5.9 - Схема испытаний оценки влияния временного дрейфа  
Результаты испытаний.

На рисунке 5.10 показаны графики для испытуемого и сравнительного измерителей.

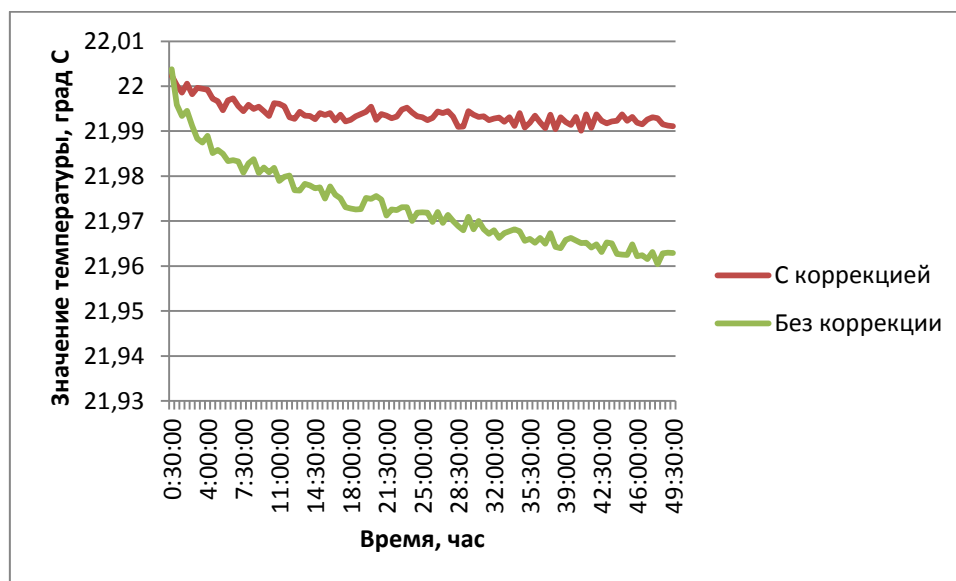


Рисунок 5.10 - Результаты оценки влияния временного дрейфа

Соотношение площадей под кривой для датчика с коррекцией и датчиком без коррекции составляет в процентном выражении 100,09%, т.е. разница менее одной десятой процента.

#### 5.1.4 ОЦЕНКА КОРРЕКЦИИ КАЛИБРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Данное испытание имело целью определение влияния калибровочных характеристик на общий результат обобщённого уравнения МРИД.

Схема испытаний представлена на рисунке 5.11.

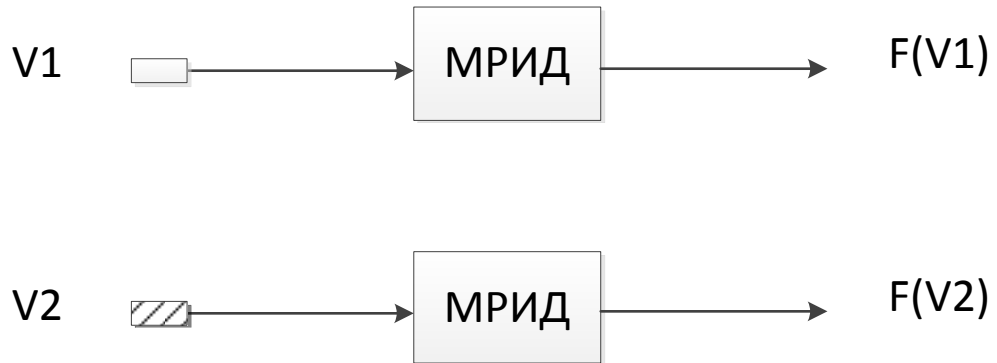


Рисунок 5.11 - Схема испытаний оценки коррекции калибровочных характеристик

В рамках данного эксперимента проводилось сравнение одного и того же датчика с включением и отключением коррекции по калибровочной характеристике. Для опыта был использован имитатор датчика давления с токовым входом. Имитатор был настроен на  $P_{\max}=1.6$  Мпа и использование диапазона 0-5 мА. Для режима исправного датчика выдавался ток, соответствующий значениям 0,1Мпа-0,2Мпа-0,3Мпа и т.д. с шагом 0,1Мпа. Для режима некалиброванного датчика выдавался ток с отклонениями от номинальных величин в этих точках.

Для каждого из режимов проводился опыт с отключением и включением коррекции по калибровочной характеристике. Для режима некалиброванного датчика сначала проводилось измерение на идеальной характеристике (с коэффициентами по умолчанию), затем находились калибровочные коэффициенты и измерение повторялось со включённой коррекцией.

Результаты испытаний представлены на рисунке 5.12.

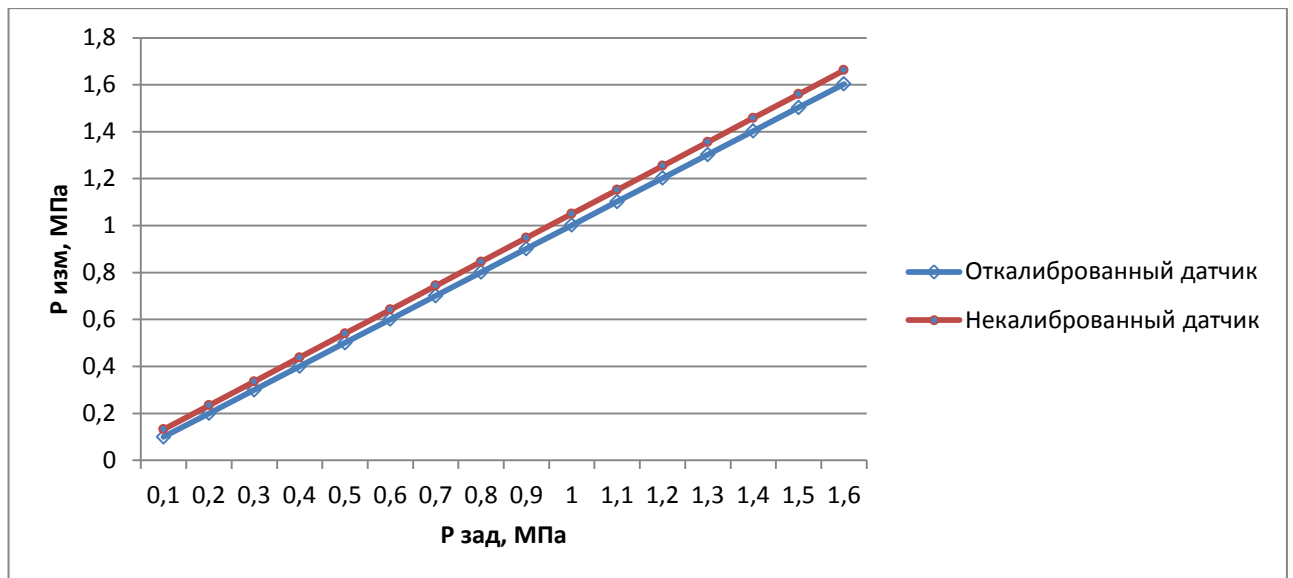


Рисунок 5.12 - Результаты испытаний для режима некалиброванного датчика

Для  $P_{\text{зад}}=0,8\text{МПа}$  разница показаний без и с учётом калибровочных данных в процентном соотношении составила 5,5%.

## 5.2 ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ МРИД В УЧЕБНОМ И ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССАХ

### 5.2.1 СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В учебных лабораториях все шире используются технические компоненты и среда графического программирования LabVIEW для создания современных рабочих мест, ориентированных на обучение различным естественнонаучным и техническим дисциплинам. Однако, для того, чтобы процесс обучения стал более увлекательным, наглядным и приближенным к практическим задачам, в состав лабораторных стендов должны быть включены реальные объекты или их

физические модели. Приобретение или изготовление подобных, зачастую весьма специфичных, объектов и моделей требуют не меньше ресурсов и времени, чем приобретение стандартных технических устройств и программного обеспечения. В этой связи представляет интерес обмен информацией о работах, проводимых в разных университетах с целью оснащения учебных лабораторий нестандартным оборудованием, прикладными программно-техническими комплексами и учебно-методическими материалами.

В учебном центре «Центр технологий National Instruments» Новосибирского государственного технического университета разрабатываются и предлагаются для применения в лабораториях других университетов ряд специализированных блоков, лабораторных стендов и практикумов [84 - 89]. Эти работы выполняются как в инициативном порядке, так и в рамках образовательной программы, реализуемой и координируемой Российским филиалом корпорации National Instruments.

Стенд «Мониторинг параметров окружающей среды» предназначен для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности», и «Охрана окружающей среды» и им подобных, а также может использоваться для обучения принципам проектирования измерительных систем. В состав стенда входят: блок датчиков физических величин, измерительная система (CompactDAQ или аналогичная) и прикладная программа измерения и регистрации данных «Ecology». Внешний вид стенда представлен на рисунке 5.13.

Датчики воспринимают ряд параметров атмосферы внутри бокса. В пассивном режиме исследований эти параметры характеризуют окружающую среду, в активном – в бокс через гибкие трубки могут нагнетаться определенные газовые компоненты, изменяться давление, влажность или температура.

Измеряемые величины преобразуются в сигналы электрического напряжения постоянного тока, которые после согласующих устройств поступают на входы модуля ввода-вывода NI-9201 измерительной системы CompactDAQ.

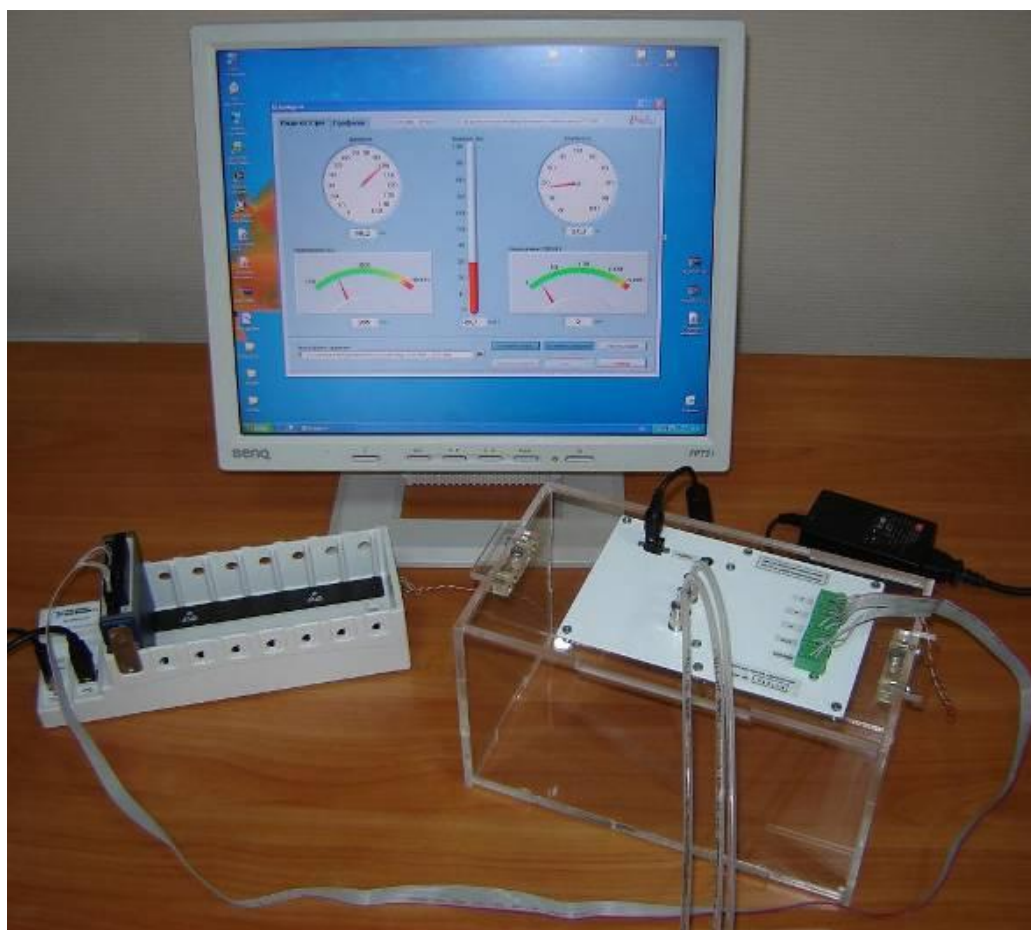


Рисунок 5.13 - Лабораторный стенд «Ecology»

Программа «Ecology» управляет процессом преобразования электрических напряжений в код, выполняет масштабирование, фильтрацию результатов измерений, отображает их на шкальных, цифровых и графических индикаторах, а также регистрирует в архивных файлах.

Данные сохраняются в формате электронных таблиц и могут быть загружены в Excel для последующей обработки.

Контролируемые параметры приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Контролируемые параметры окружающей среды и погрешности измерения

№	Параметр	Диапазон измерения	Погрешность измерения
1	Температура	+10 °C ÷ +50 °C	± 2°C



## Продолжение таблицы 5.1

2	Давление	20 кПа ÷ 110 кПа	± 2 %
3	Влажность	10 % ÷ 100 %	± 5 % <sup>1</sup>
4	Содержание углекислого газа <sup>2</sup>	350 ÷ 6000 ppm	Не нормируется
5	Содержание органических испарений <sup>2,3</sup>	100 ÷ 4000 ppm	Не нормируется

<sup>1</sup> – приведенная погрешность измерений

<sup>2</sup> – используется для сравнительных измерений

<sup>3</sup> – датчик реагирует на угарный газ, водород, метан, изобутан, пары спирта

Интерфейс оператора (рисунок 5.14) позволяет визуализировать изменение параметров окружающей среды в реальном времени, просматривать архивные данные, оценивать с помощью курсоров значения параметров в произвольных точках графиков, изменять режимы сбора данных и т.п.

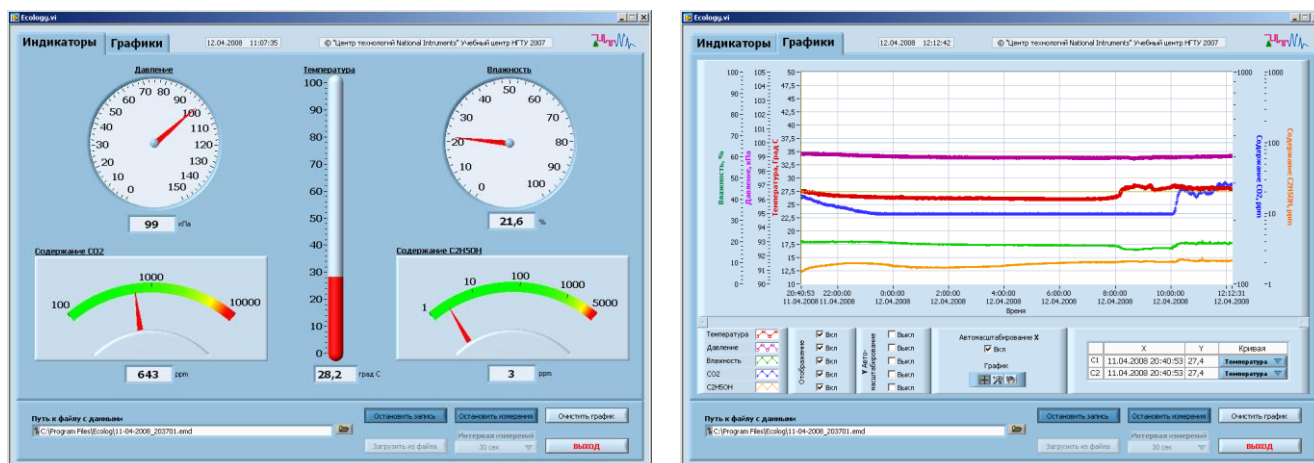


Рисунок 5.14 - Рабочие окна программы *Ecology*

Данный стенд был взят за основу для отработки решений и технологий многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика. В пользу такого решения говорят следующие моменты:

- разнообразие измеряемых величин в пределах одного стенда;
- относительная простота создания такого стенда;
- актуальность в свете обеспечения безопасности жизнедеятельности;
- компактные размеры стенда.

Доработанная версия стенда вместо CompactDAQ использует прототип МРИД в качестве измерительной части, при этом, датчики (первичные преобразователи), использованные в стенде, были оставлены прежними.

### 5.2.2 ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД

Проанализировав рынок средств проектирования датчиков TEDS и систем на их основе, было решено спроектировать многофункциональный программно-аппаратный комплекс, основанный на стандартах IEEE 1451, который бы мог использоваться для проектирования интеллектуальных датчиков TEDS, создания измерительных систем на основе созданных датчиков и для обучения принципам проектирования. При этом данный комплекс должен быть недорогим и иметь возможность использования совместно с оборудованием и программным обеспечением сторонних компаний.

Разработанный программно-аппаратный комплекс "Интеллектуальные датчики с электронными таблицами" предназначен для проектирования интеллектуальных датчиков TEDS, выполненных в соответствии со стандартом IEEE 1451.4, изучения программных средств проектирования – библиотеки функций TEDS LabVIEW и специальных утилит, обучения принципам проектирования каналов измерения в системах автоматизации экспериментальных исследований, испытаний и управления с использованием интеллектуальных датчиков [90].

Данный комплекс представляет собой систему проектирования, как интеллектуальных датчиков TEDS, так и измерительных систем, реализованную с использованием оборудования и программного обеспечения корпорации

National Instruments, дополненную набором интеллектуальных датчиков и адаптером интерфейсов "1-Wire  $\leftrightarrow$  RS-232".

Структурная схема стенда представлена на рисунке 5.15.

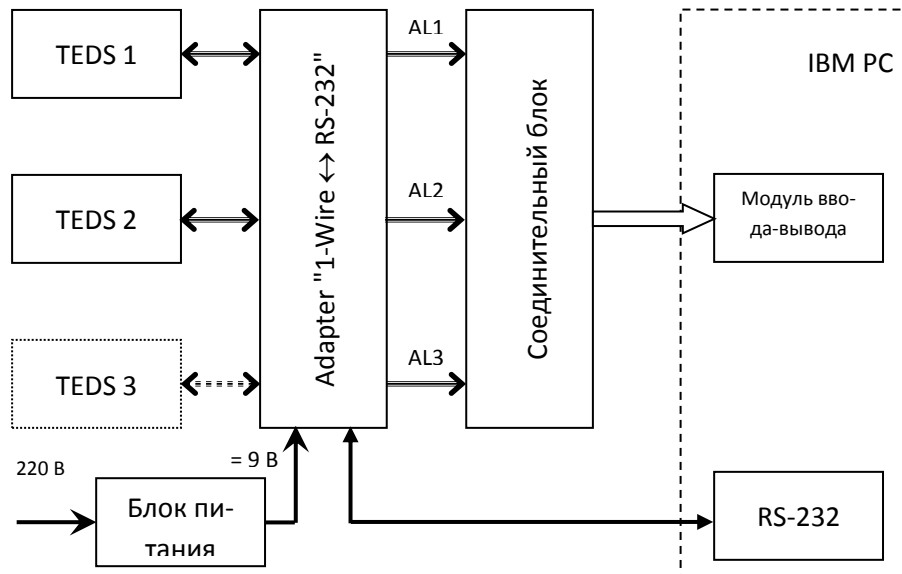


Рисунок 5.15 - Структурная схема лабораторного стенда

Основой системы может служить:

- универсальная лабораторная станция ELVIS
- встраиваемый в персональный компьютер многофункциональный модуль ввода-вывода с коннекторным блоком (например, типа BNC-2120)
- компактная модульная система типа Compact DAQ
- система реконфигурируемого ввода-вывода Compact RIO
- системы ввода-вывода других производителей

При изучении свойств и проектировании электронных таблиц интеллектуальных датчиков используется программа TEDS\_Labor.exe (рисунок 5.16).

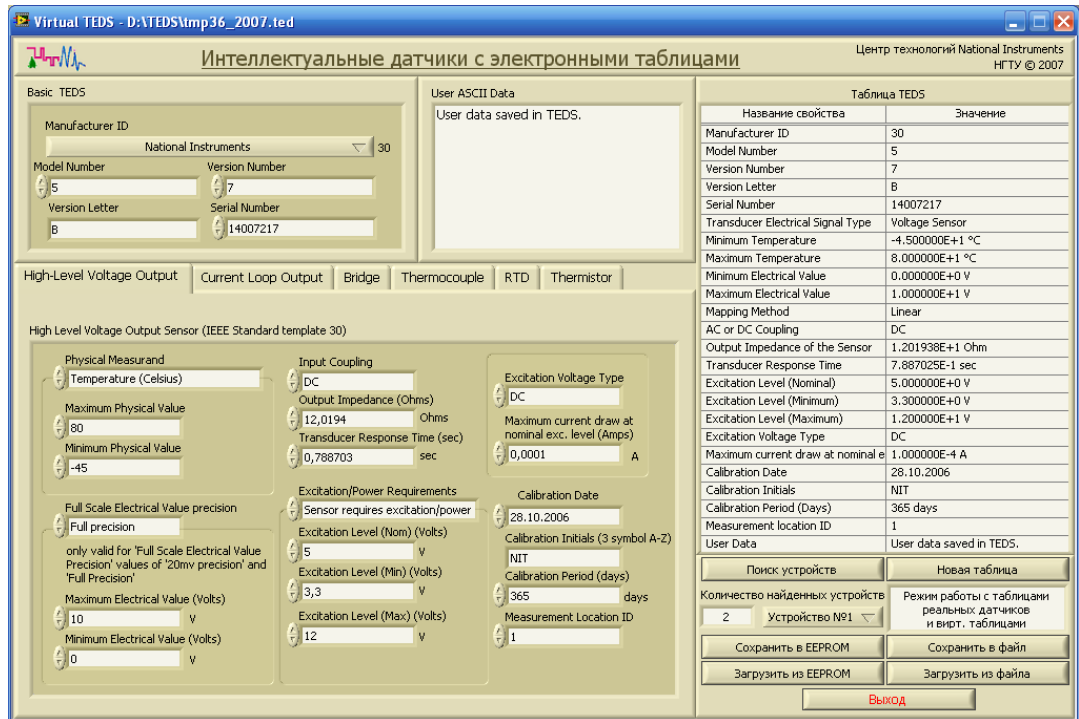


Рисунок 5.16 - Рабочая панель программы TEDS\_Labor.exe

Проектирование каналов измерения с интеллектуальными датчиками осуществляется с помощью графической системы программирования LabVIEW корпорации National Instruments, библиотеки функций TEDS LabVIEW [91], библиотеки стандартных шаблонов электронных таблиц NI\_IEEE\_Standard.tdl или all.tdl, файлов виртуальных электронных таблиц \*.ted.

Интеллектуальные датчики TEDS 1 со встроенными электронными таблицами выполнены в интерфейсе класса 2 с разделёнными каналами передачи аналоговых и цифровых сигналов.

Воспринимаемые чувствительными элементами датчиков физические величины преобразуются в сигналы электрического напряжения постоянного тока, которые по отдельным линиям AL1 из адаптера "1-Wire ↔ RS-232" через макетную плату настольного блока лабораторной станции ELVIS подаются на аналоговые входы модуля ввода-вывода PCI-6221 (или модуля другого типа).

Внутри адаптера "1-Wire ↔ RS-232" цифровые выходы/входы датчиков объединены в сеть 1-Wire, а сигналы, передаваемые по линиям 1-Wire, преобразуются в сигналы стандарта RS-232 для взаимодействия с компьютером.

Цифровые данные, содержащиеся в электронной таблице (TEDS) каждого датчика, по линиям DL через последовательный порт компьютера RS-232 считываются программой TEDS\_Labor и могут использоваться для визуализации и исследования свойств датчика или для выполнения соответствующей обработки результатов измерений с помощью прикладного программного обеспечения измерительной системы, разрабатываемой в процессе выполнения лабораторной работы.

С помощью редактора электронных таблиц, входящего в состав программы TEDS\_Labor, можно создавать новые или модифицировать существующие электронные таблицы, сохранять их в файлах (Virtual TEDS) или записывать в микросхемы энергонезависимой памяти, встроенные в датчики (Smart TEDS).

В левой части панели расположены закладки, на которых отображаются шаблон базовой секции таблицы, стандартные шаблоны электронных таблиц для ряда типов датчиков, окно для ввода пользовательских данных. В правой части расположена «Таблица TEDS», в которой отображаются значения свойств в более удобной для восприятия и документирования форме, линейка кнопок для поиска устройств, создания, чтения или записи электронных таблиц в файл или в память датчика, а также список найденных устройств и индикатор режима работы программы.

Реализованы следующие режимы работы:

1. Чтение виртуальных электронных таблиц из файла (Virtual TEDS)
2. Чтение электронных таблиц из памяти EEPROM, встроенной в датчик (Smart TEDS)
3. Сохранение электронных таблиц в файл
4. Запись электронных таблиц в память EEPROM датчика
5. Редактирование свойств датчика
6. Создание новой таблицы

При запуске программы TEDS\_Labor.exe производится поиск устройств в сети 1-Wire и отображается количество подключенных устройств. В процессе

работы поиск устройств может быть инициирован в любое время кнопкой "Поиск".

Если к адаптеру не подключены датчики Smart TEDS, ни одно устройство 1-Wire не будет обнаружено в сети, на индикатор режима работы выводится сообщение "Работа с датчиками Virtual TEDS" и работа может продолжаться только с файлами виртуальных электронных таблиц.

Если программа обнаружила устройства в сети 1-Wire, то на индикатор режима работы выводится сообщение "Работа с датчиками Smart TEDS". Уникальный идентификационный номер датчика отображается в поле таблицы "User ASCII Data".

Далее можно редактировать свойства датчика (полей таблицы) с помощью управляющих элементов шаблонов – переключателей и выпадающих списков, сохранять отредактированную таблицу в файле или в памяти датчика и т.д.

Кнопкой "Новая таблица" инициируется процесс создания новой таблицы, при этом поля таблицы устанавливаются в значение по умолчанию.

Разработанный программно-аппаратный комплекс используется для обучения студентов старших курсов технических специальностей проектированию интеллектуальных датчиков и измерительных систем на основе них. Для этого был разработан курс лабораторных работ:

- Интеллектуальные датчики с электронными таблицами Стандарт IEEE P1451.4. Структура электронных таблиц.
- Устройство и разновидности интеллектуальных датчиков. Инструментальные средства проектирования датчиков.
- Проектирование измерительных систем с интеллектуальными датчиками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были получены следующие основные результаты.

1. Показано, что семейство стандартов IEEE 1451 затрагивает вопросы хранения в основном паспортных характеристик датчиков как первичных преобразователей и организации канала связи с памятью в датчике, в то время как вопросам описания более сложных датчиков уделяется мало внимания. Даны определения многофункционального интеллектуального датчика и многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика. Предложена классификация функций интеллектуальных датчиков.

2. Показано, что предложенное обобщённое уравнение многофункционального реконфигурируемого интеллектуального датчика позволяет учитывать влияющие зависимости от различных факторов, а также описывать данные зависимости в цифровом виде, благодаря чему возможно формирование датчиков с требуемыми параметрами, с использованием большого количества типов первичных преобразователей. Также показано, что разработанный на основе обобщённого уравнения алгоритм работы МРИД существенно упрощает проектирование многофункциональных реконфигурируемых датчиков. На основе обобщённого уравнения и обобщённого алгоритма разработана система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков.

3. Выполнено исследование тестовых образцов МРИД для проверки эффективности коррекции влияющих факторов и общего тестирования функционирования образцов, показавшее успешность принятого подхода.

4. Разработаны, апробированы и внедрены в учебный процесс нескольких университетов программно-аппаратные комплексы по обучению проектированию интеллектуальных датчиков с TEDS и мониторингу параметров окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алейников А.Ф. Датчики (перспективные направления развития): учеб. пособие для вузов/ А.Ф. Алейников, В.А. Гридчин, М.П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 285 с.
2. Ицкович, Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства / Э.Л. Ицкович // Датчики и Системы. –2002. – №2. – С. 42.
3. Тесленко В.А. Датчики в системах сбора данных и управления / В.А.Тесленко // ПиКАД: Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика – 2004. – №2. С. 50–56.
4. Тайманов, Р.Е. Метрологический самоконтроль датчиков /Р.Е. Тайманов, К.В. Сапожникова // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ'10): тр. конф. с междунар. участием (18–20 окт. 2010 г., Москва, Россия). ИПУ РАН. – М., 2010. – CD-ROM. – С. 1088–1099.
5. Рейзман А.Я. Интеллектуальные датчики: новые средства разработки и новый уровень полевой автоматики / А.Я. Рейзман, М.А. Островский, В. Е. Красовский. // Датчики и Системы. – 2007. – № 10, стр. 8–11.
6. IEEE 1451.2-1997 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats.
7. IEEE 1451.1-1999 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators- Network Capable Application Processor Information Model.
8. IEEE 1451.3-2003 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems.



9. IEEE 1451.4-2004 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators- Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats.
10. David Potter, IEEE P1451.4 Working Group and National Instruments. IEEE P1451.4's Plug-and-Play Sensors. Sensors. [Электронный ресурс] / December 2002 г. – Режим доступа: <http://archives.sensorsmag.com/articles/1202/14/main.shtml>. (Дата обращения 15.12.2014).
11. ГОСТ 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2010 – 12 с.
12. ГОСТ Р 8.734-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – Москва: Стандартинформ, 2012 – 20 с.
13. ГОСТ Р 8.825-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2014 – 17 с.
14. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. Изд. 2-е, испр. — СПб.: НПО "Профессионал", 2010. — 82 с. ISBN 978-5-91259-057-3, УДК 006.91(038) М43.
15. Иванов В.Н. Интеллектуальные средства измерения // Приборы и системы управления. - 1986. - № 2. - С.21-23.
16. Орнатский П.П., Туз Ю.М. Интеллектуальные измерительные комплексы // Приборы и системы управления. - 1989. - № 7. - С.15-16.

- 17.Соболев В.С. Актуальные вопросы развития теории интеллектуальных измерительных систем // Приборы и системы управления. - 1989. - № 3. - С. 16-19.
- 18.Цветков Э.И. Уровни интеллекта процессорных измерительных средств // Приборы и системы управления. - 1988. - № 4. - С. 15-17.
- 19.Бунин В.И. О термине «интеллектуальные средства измерений» // Приборы и системы управления. – 1992. - № 7. - С. 14-15.
- 20.Цапенко М.П. Интеллектуальные функции измерительных информационных систем (ИИС) // Приборы и системы управления.-1992. - № 2. - С.16-19.
- 21.Романов В.Н., Соболев В.С., Цветков Э.И. Интеллектуальные средства измерений. - М.: РИЦ Татьянин день, 1994.
- 22.Стасенко, К. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. / Стасенко Константин Сергеевич. - Тамбов: б.н., 2014. - 234 с.
- 23.Артемова, С.В. Методология построения интеллектуальных информационно-управляющих систем тепло-технологическими аппаратами [Текст]: дисс. докт. техн. наук: 05.11.16. / Артемова Светлана Валерьевна. - Тамбов: б.н., 2013. - 347 с.
- 24.Слепцов В.В., Подбельский А.Н. Задачи проектирования интеллектуальных измерительных датчиков. Вестник МГУПИ - М.: МГУПИ. 2012, №38 - с. 81-84.
- 25.Сапронов П.В. Проблема понимания, определения или терминологии интеллектуальных средств измерений? / Труды международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии». Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2011. - вып. 14. - с. 123-125.
- 26.Селиванова З.М., Третьяков В.В. Моделирование и оптимизация параметров измерительного канала информационно-измерительных

- систем. / Вестник Тамбовского государственного технического университета. Тамбов: Издательство ТГТУ, 2012. - Том 18. - №1. - с. 65-73.
27. Удод Е.В. Формирование градуировочных характеристик интеллектуальных датчиков давления: Учебно-методическое пособие. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. - 28 с.
28. Пьявченко О.Н., Крутчинский С.Г., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Панич А.Е. Пути создания импортозамещающих интеллектуальных датчиков давления // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем - 2006. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. М.:ИППИМ РАН, 2006. С. 212-216.
29. Сапронов П.В. Интеллектуальные средства измерений: определения или терминология / Вестник Саратовского государственного технического университета. Саратов: Издательство Саратовского государственного технического университета, 2012. - №2 (65), вып. 1. - с. 127-129.
30. Интеллектуальные датчики, их сети и информационные системы / В.А. Васильев, П.С. Чернов / Материалы Международной научно-технической конференции 3-7 декабря 2012 г
31. Васильев, В.А. Интеллектуальные датчики, их сети и информационные системы / В.А. Васильев, П.С. Чернов // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2012 3-7 декабря 2012 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. - М.: МГТУ МИРЭА - ИРЭ РАН, - 2012. - часть 4. - с. 119-122
32. Бельчанская Е.Н. Интеллектуальная система диагностики информационно-измерительных систем асботехнического производства [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. / Бельчанская Елена Николаевна. - Волгоград: б.н., 2008. - 175 с.
33. Стучебников В.М., Николайчук О. Л. и др. Двухпроводный интеллектуальный датчик избыточного давления // Датчики и системы №11, 2005. – стр.21–23.

34. Сенсор + интеллект = интеллектуальный датчик. pressure.ru. [Электронный ресурс] / 2007–2009 – Режим доступа: [http://www.pressure.ru/intellectual\\_sensors.shtml](http://www.pressure.ru/intellectual_sensors.shtml). (Дата обращения 15.12.2014).
35. Ivanov S.Yu., Kartalova T.E. Analysis of information processing algorithms for intellectual pressure sensors / Izmeritel'naya Tekhnika, №3, 1990. – pp. 26–29.
36. Субчев, С.А. Интеллектуальные средства измерений. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://plasma.karelia.ru/~ekostq/PUBLIC/IntSrIzm\\_NEW/page4/page3.html](http://plasma.karelia.ru/~ekostq/PUBLIC/IntSrIzm_NEW/page4/page3.html). (Дата обращения 15.12.2014).
37. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. – 96 с: ил. – (Массовая радио-библиотека; Вып. 1277).
38. Вульвет, Дж. Датчики в цифровых системах [Текст] / Вульвет Дж. – М.: Энергоиздат, 1981 — 200 с.
39. Когельман, Л.Г. Интеллектуальный датчик давления / Л.Г. Когельман, М.Ю. Михеев, А.В. Куц, С.А. Исаков, И.В. Головин // Датчики и системы – 2006: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (Россия, г. Москва, 30-31 мая 2006г.) / Под ред. д.т.н., профессора, академика Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Мокрова Е.А., д.т.н., профессора, академика Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Носенко Ю.И., к.т.н., генерал-лейтенанта Алфимова С.М. – Пенза: ФНПЦ ФГУП "НИИ физических измерений", 2006. – С.159–161.
40. Селиванова З.М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 184 с.
41. Войтович И.Д., Корсунский В.М. Интеллектуальные сенсоры [Электронный ресурс] / ISBN: 978-5-9963-0124-9, 26.05.2010 – Режим

- доступа: <http://www.intuit.ru/department/hardware/intensors/>. (Дата обращения 15.12.2014).
42. Ivanov, Dentcho V. Advanced sensors for multifunctional applications [Электронный ресурс] / October 2000 – Режим доступа: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0010/Ivanov/Ivanov-0010.html>. (Дата обращения 15.12.2014).
43. Многофункциональный датчик вибрации HAUBER 648. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.pribor.ru/npf/ispytatelnoe\\_oborudovanie/promyshlennyj\\_vibrokontrol/datchik\\_vibracii/#1044](http://www.pribor.ru/npf/ispytatelnoe_oborudovanie/promyshlennyj_vibrokontrol/datchik_vibracii/#1044) (Дата обращения 15.12.2014).
44. Датчик давления DS 200. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.bdsensors.ru/products/product\\_info.php?id=23](http://www.bdsensors.ru/products/product_info.php?id=23). (Дата обращения 15.12.2014).
45. NASA. High-Temperature Thin Film Multifunctional Sensor [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/sensors/PhySen/docs/TOP3-00207.pdf>. (Дата обращения 15.12.2014).
46. RKI Instruments, Inc. GD-70D Intelligent Gas Detector [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rkiinstruments.com/pages/gd70d.htm>. (Дата обращения 15.12.2014).
47. Интегральные датчики температуры (IC temperature sensors) [Электронный ресурс] / Информационный портал "Всё о датчиках температуры" – Режим доступа: [http://temperatures.ru/pages/integralnye\\_datchiki\\_temperature](http://temperatures.ru/pages/integralnye_datchiki_temperature). (Дата обращения 15.12.2014).
48. Maxim IC. DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18S20.pdf>. (Дата обращения 15.12.2014).
49. Дорожный радар Wavetronix HD Digital Wave Radar [Электронный ресурс] – Режим доступа:

- <http://www.wavetronix.com/en/products/smartsensor/hd/specs> (Дата обращения 15.12.2014).
50. Маломощный датчик освещённости с повышенной чувствительностью Maxim Integrated MAX44007 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX44007.pdf> (Дата обращения 15.12.2014).
51. 16-битный цифровой датчик температуры с интерфейсом I2C Analog Devices ADT7420 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADT7420.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADT7420.pdf) (Дата обращения 15.12.2014).
52. TGS 4160 - for the detection of Carbon Dioxide [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheets-UD1/DSAUD006885.pdf> (Дата обращения 15.12.2014).
53. TGS 2610 - for the detection of LP Gas [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.datasheetarchive.com/dl/Datasheet-027/DSA00472353.pdf> (Дата обращения 15.12.2014).
54. TGS 2442 - for the detection of Carbon Monoxide [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.datasheetarchive.com/dlmain/Datasheets-11/DSA-218249.pdf> (Дата обращения 15.12.2014).
55. Humidity and Temperature Sensor IC [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion\\_Humidity\\_SHT7x\\_Datasheet\\_V5.pdf](http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf) (Дата обращения 15.12.2014).
56. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. - Москва: Стандартинформ, 2014 - 60 с.
57. Фрайден, Дж.. Современные датчики. Справочник. Москва: Техносфера, – 2005. – 592 с. ISBN 5-94836-050-4

58. Промышленные датчики давления. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pressure.ru/sensors.shtml> (Дата обращения 15.12.2014).
59. Figaro Engineering Inc web site. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.figarosensor.com> (Дата обращения 15.12.2014).
60. Данилов, Н.А. Синтез функций преобразования измерительных приборов для контроля давления по заданному пределу приведенной погрешности [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.11.13. / Данилов Николай Анатольевич. – СПб : б.н., 2007. – 121 с.
61. Марченко, И.О. Обобщённое уравнение многофункционального интеллектуального датчика [Текст] / И.О. Марченко. // Сборник научных трудов НГТУ №3 (65), – Новосибирск: НГТУ, 2011. – С. 14-21.
62. Хеерко Груневеген. Конфигурирование или адаптация? [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2008/06/5343884/>. (Дата обращения 15.12.2014).
63. 8-bit Atmel Microcontroller with 128KBytes In-System Programmable Flash [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf> (Дата обращения 15.12.2014).
64. Atmel Corporation. SAM7S Series Complete. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.atmel.com/Images/doc6175.pdf>. (Дата обращения 15.12.2014).
65. 32-megabit 2.7-volt Only Serial Firmware DataFlash® Memory [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.atmel.com/images/doc3633.pdf> (Дата обращения 15.12.2014).
66. Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf) (Дата обращения 15.12.2014).

67. Чип и Дип. NTC термисторы. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.chipdip.ru/catalog/ntc-thermistors.aspx> (Дата обращения 15.12.2014).
68. Марченко И.О. Система проектирования реконфигурируемых интеллектуальных датчиков [Текст] / И.О. Марченко // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 2–5.
69. Островский М.А., Рейзман Я.А. ИНЭУМ представляет инструментальную систему нового поколения ConField v2.0. – «КИП и автоматика: обслуживание и ремонт» – 2006 – № 11.
70. Евдокимов, Ю.К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW (+CD) / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков. – Москва : ДМК-Пресс, 2007. – 400 с. – ISBN 5-94074-346-3.
71. Трэвис, Дж. LabVIEW для всех (+ CD-ROM) / Дж. Трэвис, Дж. Кринг. – Москва : ДМК-Пресс, – 2008. – 880 с. – ISBN 5-94074-401-X.
72. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям / А.Я., Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с. – ISBN 5-94074-207-6.
73. Головач, Влад В. Дизайн пользовательского интерфейса 2. Искусство мыть слона. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://uibook2.usethics.ru>. (Дата обращения 15.12.2014).
74. Купер, А. Алан Купер об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия. / Алан Купер, Роберт Рейман, Дэвид Кронин. Пер. Зислис М. – СПб : Символ-Плюс, 2009. – 688 с. – ISBN 978-5-93286-132-5.
75. Тидвелл, Дженифер. Разработка пользовательских интерфейсов / Дженифер Тидвелл. Пер. Е. Шикарева. – СПб: Питер, 2008. – 416 с. – ISBN 978-5-91180-073-4.
76. Modbus. Wikipedia. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Modbus>. (Дата обращения 15.12.2014).



77. Bies, Lammert. Modbus Interface Tutorial. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lammertbies.nl/comm/info/modbus.html>. (Дата обращения 15.12.2014).
78. Variant type. Wikipedia. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Variant\\_type](http://en.wikipedia.org/wiki/Variant_type).) (Дата обращения 15.12.2014).
79. Microsoft. VARIANT structure. Microsoft Developer Network. [В Интернете] [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/e305240e-9e11-4006-98cc-26f4932d2118%28VS.85%29>. (Дата обращения 15.12.2014).
80. Цветков Э.И. Методические погрешности статистических измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 144 с.
81. Математическое обеспечение сложного эксперимента. В 5 т. Т.1. Обработка измерений при исследовании сложных систем / Белов Ю. А., Диденко В. П., Козлов Н. Н., Ляшко И. И., Макаров В. Л., Цитрицкий О. Е. — Киев: Наук. думка. — 1982. - 304 с.
82. Новицкий П.В., Зограф. И.А. Оценка погрешностей результатов измерений.- Л.: Энергоатомиздат, 1991 - 300 с.
83. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика- М.: Высшая школа, 1998 - 478 с.
84. Марченко, И. О. Преимущества многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков / И. О. Марченко // Материалы XII международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2014 в 7 томах. Новосибирск, 22–24 сентября : б.н., 2014. – Т. 3. – с. 198–200.
85. Баран Е.Д., Лабораторные стенды "Мониторинг параметров окружающей среды" и "Система автоматического регулирования" / Е.Д.Баран, А.В.Кухто, И.О.Марченко, В.Б.Хархота, С.В.Черкашин // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments. Сборник трудов VII научно-практической конференции. М : РУДН, – 2008. – стр. 7–10.

86. Baran, Efim. Laboratory Test Benches Development for Engineer's / Efim Baran, Andrew Kukhto, Ilya Marchenko, Sergey Cherkashin // Education International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering "SIBIRCON 2008". Proceedings Novosibirsk: Publishing house of NSTU, – 2008. – p. 68–72.
87. Баран, Е. Д. Исследование и построение интеллектуальных датчиков с электронными таблицами / Е. Д. Баран, И. О. Марченко, В. Л. Полубинский // Научный вестник НГТУ. – 2010. – Т. 1. – с. 23–34.
88. Марченко, И. О. Система проектирования многофункциональных реконфигурируемых датчиков в учебном процессе [Электронный ресурс] / "Инженерный вестник Дона" – 2013 – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1916> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения 15.12.2014).
89. Марченко, И. О. Применение системы проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков в учебном процессе / И. О. Марченко // Виртуальные и интеллектуальные системы-2013. Ползуновский альманах. Барнаул: Издательство АлтГТУ им. И. И. Ползунова, – 2013. – с. 127–130.
90. Марченко, И. О. Система проектирования интеллектуальных датчиков с электронными таблицами / И. О. Марченко, В. Л. Полубинский, Е. Д. Баран // Материалы X международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2010 в 7 томах. Новосибирск: НГТУ, – 2010. – Т. 3. – с. 143–148.
91. Sensor Calibration with TEDS Technology. National Instruments Developer Zone. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4043>. (Дата обращения 15.12.2014).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТАБЛИЦА РАЗНОВИДНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ ПО СТАНДАРТУ IEEE 1451.4

Таблица А1 – Разновидности датчиков

Case	Value (unit)	Физическая величина (единица измерения)
0	Temperature (Kelvin)	Температура (градус Кельвин)
1	Temperature (Celsius)	Температура (градус Цельсия)
2	Strain	Деформация
3	Microstrain	микродеформация
4	Force/Weight (Newton)	Сила / Вес (Ньютон)
5	Force/Weight (pounds)	Сила / Вес (фунт)
6	Force/Weight (kilogram-force/kilopond)	Сила / Вес (кг силы/килофунт)
7	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	Ускорение (м/с <sup>2</sup> )
8	Acceleration (g)	Ускорение (g)
9	Torque (Nm/radian)	Вращающий момент (Ньютон*метр/радиан)
10	Torque (Nm)	Вращающий момент (Ньютон*метр)
11	Torque (oz-in)	Вращающий момент (унция-дюйм)
12	Pressure (Pascal)	Давление (Паскаль)
13	Pressure (PSI)	Давление (psi – фунт на квадратный дюйм)
14	Mass (kg)	Масса (кг)
15	Mass (g)	Масса (г)
16	Distance (m)	Расстояние (м)
17	Distance (mm)	Расстояние (мм)
18	Distance (inches)	Расстояние (дюймы)
19	Velocity (m/s)	Скорость (м/с)
20	Velocity (mph)	Скорость (миль в час)
21	Velocity (fps)	Скорость (кадров в секунду)
22	Angular Position (radian)	Угловое положение (радианы)
23	Angular Position (degrees)	Угловое положение (угловой градус)
24	Rotational Velocity (radian/s)	Угловая скорость (радиан/с)
25	Rotational Velocity (rpm)	Угловая скорость (обороты в минуту)
26	Frequency	Частота
27	Concentration (gram/liter)	Концентрация (грамм/л)
28	Concentration (kg/liter)	Концентрация (кг/л)
29	Molar Concentration (mole/m <sup>3</sup> )	Молярная концентрация (моль/м <sup>3</sup> )
30	Molar Concentration (mole/L)	Молярная концентрация (моль/литр)
31	Volumetric Concentration (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Объемная концентрация (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> )
32	Volumetric Concentration (L/L)	Объемная концентрация (литр/литр)
33	Mass Flow	Массовый расход
34	Volumetric Flow (m <sup>3</sup> /s)	Объемный поток (м <sup>3</sup> /с)
35	Volumetric Flow (m <sup>3</sup> /hr)	Объемный поток (м <sup>3</sup> /час)
36	Volumetric Flow (gpm)	Объемный поток (галлонов в минуту)
37	Volumetric Flow (cfm)	Объемный поток (кубических футов в минуту)
38	Volumetric Flow (L/min)	Объемный поток (литр в минуту)

## Продолжение таблицы А1

39	Relative Humidity	Относительная влажность
40	Ratio (Percent)	Коэффициент (%)
41	Voltage (Volts)	Напряжение (В)
42	RMS Voltage (V rms)	Напряжение - действующее значение (V rms)
43	Current (Amps)	Ток (А)
44	RMS Current (A rms)	Ток - действующее значение (A rms)
45	Power (Watts)	Мощность (Вт)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРИМЕР ЭЛЕКТРОННОЙ ТАБЛИЦЫ АКСЕЛЕРОМЕТРА

Таблица Б1 – Пример электронной таблицы акселерометра

Секция	Свойство (англ.)	Свойство (рус.)	Значение
<b>BasicTEDS</b> (базовая секция)	ManufacturerID	Идентификатор изготовителя	43 (Acme Accelerometer Company)
	Modelnumber	Номер модели	7115
	Version letter	Символ версии	B
	Serialnumber	Серийный номер	X001891
<b>Standard and Extended TEDS</b> (fields will vary according to transducer type)  Стандартная и расширенная секция электронной таблицы (содержание полей определяется типом преобразователя)	Calibration Date	Дата калибровки	Jan 29, 2000
	Sensitivity @ ref. condition (S ref)	Чувствительность $S_{ref}$ в номинальных условиях	1.0094E+03mV/g
	Physical measurement range	Диапазон изменения измеряемой величины	±50 g
	Electrical output range	Диапазон изменения выходной электрической величины	±5 V
	Reference frequency (fref)	Номинальная частота $f_{ref}$	100.0 Hz
	Quality factor @ fref (Q)	Добротность Q на номинальной частоте	300 E-3
	Temperature coefficient	Температурный коэффициент	-0.48 %/°C
	Reference temperature (Tref)	Номинальная температура ( $T_{ref}$ )	23 °C
	Sensitivity direction (x,y,z)	Направление чувствительности (x, y, z)	x
<b>UserArea</b> (Секция пользователя)	Sensor Location	Местоположение датчика	Strut 3A
	Calibration due date	Срок калибровки	April 15, 2002

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. СТАНДАРТНЫЕ ШАБЛОНЫ ДАТЧИКОВ TEDS

В таблице В1 перечислены стандартные шаблоны для всех типов датчиков (Transducer Type Templates) и стандартные шаблоны для калибровки (Calibration TEDS Template) с указанием соответствующих числовых идентификаторов (Template ID). Расшифровка идентификатора устанавливает тип шаблона. Например, если из таблицы считан Template ID = 36, значит, в секции типа приведены характеристики термопары, а значению Template ID = 40 соответствует набор пар чисел (таблица) в секции калибровки. Для любого типа датчика в принципе может использоваться любой способ калибровки.

Таблица В1 – Стандартные шаблоны

Type	TemplateID	Nameoftemplate	Наименование шаблона
TransducerTypeTemplates	25	Accelerometer&Force	Датчик вибраций и усилия
	26	Charge Amplifier (w/ attached accelerometer)	Электрометрический усилитель с акселерометром
	43	Charge Amplifier (w/ attached force transducer)	Электрометрический усилитель с датчиком усилия
	27	Microphone with built-in preamplifier	Микрофон со встроенным предусилителем
	28	Microphone Preamplifiers (w/ attached microphone)	Микрофонный предусилитель с встроенным микрофоном
	29	Microphones (capacitive)	Микрофоны (емкостные)
	30	High-Level Voltage Output Sensors	Датчики с выходом по напряжению высокого уровня
	31	Current Loop Output Sensors	Датчики с выходом по току
	32	Resistance Sensors	Резистивные датчики
	33	Bridge Sensors	Мостовые датчики
	34	AC Linear/Rotary Variable Differential Transformer (LVDT/RVDT) Sensors	Линейный / вращающийся дифференциальный трансформатор
	35	Strain Gauge	Датчик деформации
	36	Thermocouple	Термопара
	37	Resistance Temperature Detectors (RTDs)	Резистивный датчик температуры
	38	Thermistor	Термистор
Calibration Templates	39	Potentiometric Voltage Divider	Потенциометрический делитель напряжения
	40	Calibration Table	Калибровочная таблица
	41	Calibration Curve (Polynomial)	Калибровочная кривая (заданная полиномом)
	42	Frequency Response Tables	Таблица частотного отклика

Для стандартных шаблонов всех типов датчиков (Transducer Type Templates) и стандартных шаблонов для калибровки (Calibration TEDS Template) указаны соответствующие числовые идентификаторы (Template ID). Расшифровка идентификатора устанавливает тип шаблона. Для любого типа датчика в принципе может использоваться любой способ калибровки.

Наибольший объем в электронной таблице занимают собственно значения параметров датчиков. Для экономного представления разнообразных параметров при описании таблиц применяются специальные типы данных (таблица B2).

Таблица B2 - Типы данных TEDS

<b>Datatype</b> (Тип данных)	<b>Description</b> (Описание)	
UNINT	Unsigned integer	Беззнаковое целое
Chr5	5-bit character	Символ 5-ти разрядный
ASCII	Standard 7-bit ASCII	Стандартный 7-разрядный код ASCII
Date	Number of days since January 1, 1998	Дата, количество дней, начиная с 1 января 1998 г.
Single	Single-precision floating point	Число с плавающей точкой одинарной точности
ConRes	Constant resolution. This is a custom data type for compressed floating point values that provides a linear mapping of a defined interval	Константа разрешающей способности. Пользовательский тип данных для сжатия чисел с плавающей точкой. Используется с линейной шкалой чисел как фиксированный интервал между соседними значениями.
ConRelRes	Constant relative resolution. This is a custom data type for compressed floating point values that provides a logarithmic mapping of a defined interval	Константа относительной разрешающей способности. Пользовательский тип данных для сжатия чисел с плавающей точкой. Используется с логарифмической шкалой чисел.
Enumeration	References a defined enumerated data type defined in the template	Ссылка по данным перечислительного типа, определенным в шаблоне

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ДАННЫЕ TEDS

Шаблон таблицы калибровки (Calibration Table Template, идентификатор ID = 40) может содержать произвольное ( $n < 128$ ) количество пар значений входной и выходной величин, которые задаются в процентах от границ диапазонов изменения входной и выходной величин, определённых в секции стандартного шаблона типа датчика.

Шаблон калибровочной кривой (Calibration Curve Template, идентификатор ID = 41) позволяет использовать кусочно-полиномиальную аппроксимацию функции преобразования датчика. Максимальное количество интервалов аппроксимации равно 255, степень аппроксимирующего полинома может принимать значения в диапазоне  $-32 \div +32$  с шагом 0,5. Границы интервалов также задаются в процентах от минимального и максимального значений входной и выходной величин, определённых в секции стандартного шаблона типа датчика.

Шаблон калибровки по таблице частотного отклика (The Frequency Response Table Template, идентификатор ID = 42) состоит из набора пар значений, описывающих амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) датчика. Эта секция таблицы может содержать до 127 точек АЧХ, максимальная частота составляет 1,3 МГц.



Рисунок Д.1 – Принципиальная схема вычислительной части МРИД

Принципиальная схема части первичного преобразователя МРИД представлена на рисунке Д.2.

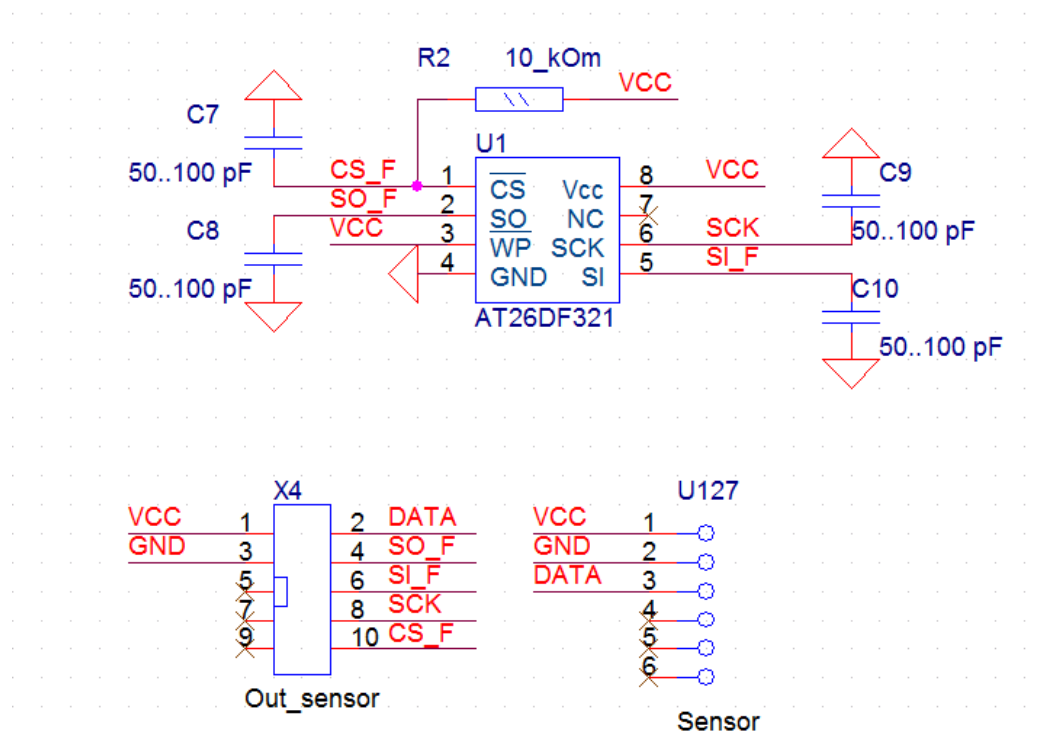


Рисунок Д.2 – Принципиальная схема части первичного преобразователя МРИД

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е. СХЕМЫ РАЗВОДКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ПРОТО- ТИПА МРИД

Разводка платы вычислительной части МРИД представлена на рисунке Е.1.

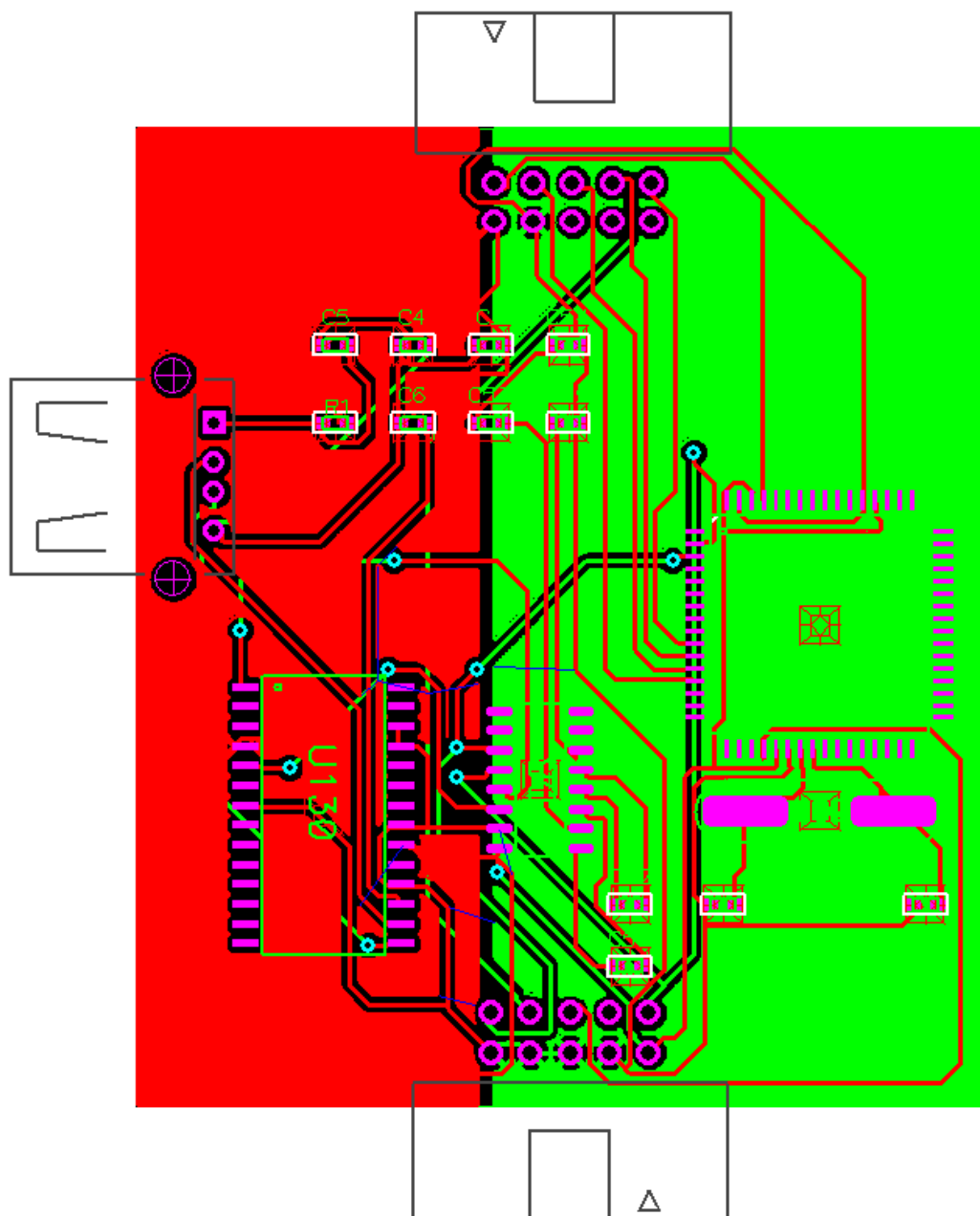


Рисунок Е.1 – Разводка платы вычислительной части МРИД

Разводка платы части первичного преобразователя МРИД представлена на рисунке Е.2.

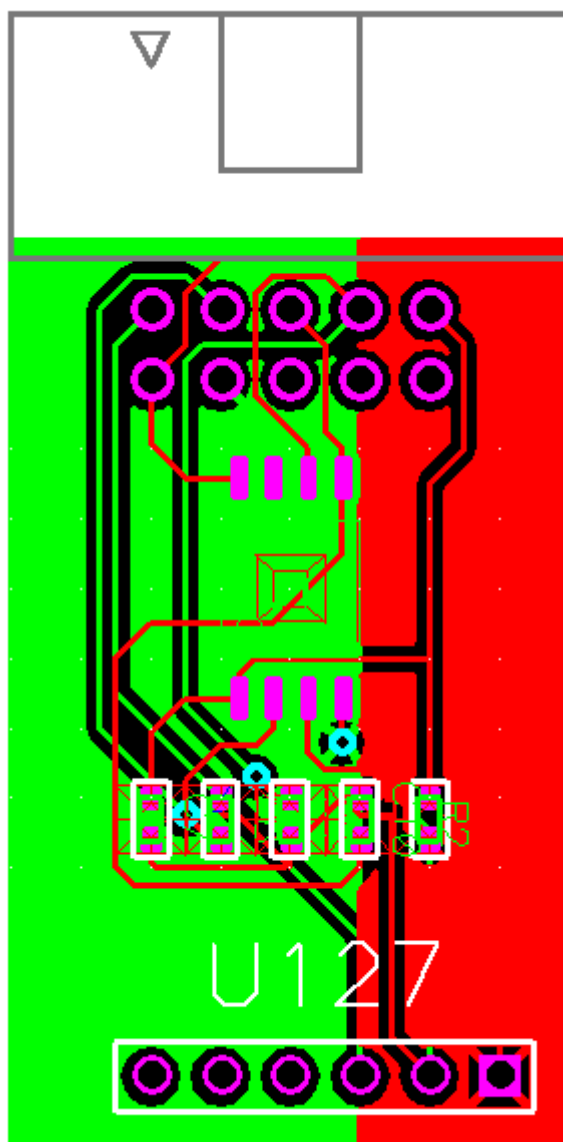


Рисунок Е.2 – Разводка платы части первичного преобразователя МРИД

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе НГТУ

Заслуженный деятель науки РФ

 д.т.н., проф. А.Г. Вострецов

«15»

12

2014

**АКТ**

внедрения результатов научных исследований  
в учебный процесс факультета автоматики и  
вычислительной техники НГТУ

Настоящим подтверждаю, что результаты научных исследований, полученных в диссертационной работе «Система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков» старшего преподавателя кафедры систем сбора и обработки данных Марченко И.О. были использованы в учебном процессе НГТУ при подготовке бакалавров по направлению «Приборостроение». Отдельные материалы работы нашли следующее применение.

1. В курсе «Интеллектуальные средства измерений», читаемом для студентов кафедры систем сбора и обработки данных АВТФ направления подготовки 200100 – «Приборостроение».
2. В курсе «Информационные технологии в приборостроении», читаемом для студентов кафедры систем сбора и обработки данных АВТФ направления подготовки 200100 – «Приборостроение».

По соответствующим курсам были подготовлены рабочие программы и учебно-методические материалы.

Заведующий кафедрой ССОД

Декан АВТФ НГТУ


Е.В. Прохоренко

И.Л. Рева