

Министерство образования и науки Российской Федерации
Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
в г. Нижневартовске

Кафедра «Информатика»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

« ____ » _____ 2016 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав.кафедрой «Информатика»

к.т.н., доцент

Александр Т.С.Г. Пономарев /
« 30 » МАЯ 2016 г.

Цифровой датчик давления для сенсорных сетей передачи данных ZigBee

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-200100.2016.158. ПЗ ВКР

Консультанты

Экономическая часть

к.э.н., доцент

А. В. Прокопьев /
« 10 » мая 2016 г.

Безопасность жизнедеятельности

к.т.н., доцент

А. Б. Тряпицын /
« 22 » мая 2016 г.

Руководитель работы

к.т.н., доцент

Е.В. Юрасова /
« 30 » мая 2016 г.

Автор работы

студент группы НвФд-431

А.Д. Кеданов /
« 30 » мая 2016 г.

Нормоконтролер

старший преподаватель

Л.Н. Буйлушкина /
« 30 » МАЯ 2016 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФИЛИАЛ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
В Г. НИЖНЕВАРТОВСКЕ
КАФЕДРА «ИНФОРМАТИКА»

НАПРАВЛЕНИЕ 200100.62 Приборостроение

(шифр и полное наименование направления)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой «Информатика»
К.Т.Н., доцент

/ С.Г. Пономарева /

/личная подпись/

« 05 » февраля 2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента

Кеданова Александра Дмитриевича

1. Тема работы Цифровой датчик давления для сенсорных сетей передачи данных ZigBee

Утверждена приказом ректора университета от «15» Апреля 2016 г. № 661

2. Срок сдачи студентом законченного проекта (работы) «30» мая 2016 г.

3. Исходные данные к работе

1. Структурное обеспечение преобразователей «давление–напряжение–код»

2. Описание первичного преобразователя ёмкостная ячейка

3. Описание микросхемы микроконтроллер: MSP430F148

4. Нормативно-технические документы по метрологическому обеспечению цифровых измерительных устройств: ПР50.2.006-94; ГОСТ8.401-80; Р50.2.038-2004; МИ 222-80МХ.

4. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

1 Аналитический обзор

2 Разработка функциональной схемы цифрового датчика давления

3 Разработка принципиальной электрической схемы цифрового датчика давления

4 Расчет погрешности измерительного канала цифрового датчика давления

5 Алгоритм работы микроконтроллера при измерениях

6 Экономическое обоснование проекта

7 Безопасности жизнедеятельности

7. Дата выдачи задания « 20 » января 2016г.

Задание выдал руководитель Е.В. Юрасова

Задание принял к исполнению студент-дипломник А.Д. Кеданов

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапа	Отметки о выполнении этапа
Введение	01.02. – 02.02.2016	выполнено
1 Аналитический обзор	02.02. – 29.02.2016	выполнено
2 Разработка функциональной схемы цифрового датчика давления	01.03.– 15.03.2016	выполнено
3 Разработка принципиальной электрической схемы	15.03.– 30.03.2016	выполнено
4 Расчет погрешности измерительного канала цифрового датчика давления	01.04.–20.04.2016	выполнено
5 Алгоритм работы микроконтроллера при измерениях	20.04 – 30.04.2016	выполнено
6 Экономическая часть	01.05. – 10.05.2016	выполнено
7 Безопасность жизнедеятельности	11.05. – 22.05.2016	выполнено
Заключение	22.05. – 23.05.2016	выполнено
Библиографический список	24.05. – 25.05.2016	выполнено
Приложения	26.05. – 27.05.2016	выполнено
Презентация доклада защиты работы	27.05. – 28.05.2016	выполнено
Оформление работы	28.05. – 30.05.2016	выполнено
Защита работы	10.06.2016	

И.о зав. кафедрой  / С.Г. Пономарева /

/личная подпись/

Руководитель работы  / Е.В. Юрасова /

/личная подпись/

Студент-дипломник  / А.Д. Кеданов /





/личная подпись/

АННОТАЦИЯ

Кеданов А.Д. Цифровой датчик давления для сенсорных сетей передачи данных ZigBee. – Нижневартовск: филиал ЮУрГУ, Информатика: 2016, 118с., 33ил., 17 табл., библиограф. список – 30наим.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью разработки цифрового датчика давления для контроля уровня давления в промышленных трубопроводах и передачи информации о состоянии по беспроводной сенсорной сети на удаленный персональный компьютер.

В выпускной квалификационной работе произведен обзор и принципы работы аналогичных устройств. Разобраны функциональная и принципиальная электрическая схемы, рассчитана полная погрешность измерительных каналов, разработана методика выполнения поверки цифрового датчика давления, описан алгоритм работы микроконтроллера.

200100.2016.158 ПЗ									
	Из	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
	Разраб.		Кеданов А.Д.		30.05.16	Цифровой датчик давления для сенсорных сетей передачи данных ZigBee	Лит.	Лист	Листов
	Проверил		Юрасова Е.В.		30.05.16		30	6	118
	Н.контр.		Буйлукина Л.Н.		30.05.16		Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в кафедра «Информатика»		
	Утвердил		Пажмурова С.Г.		30.05.16				

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	11
1.1 Понятие и обобщенная структура цифрового средства измерения.....	11
1.2 Первичные преобразователи давления.....	13
1.3 Первичные измерительные преобразователи температуры.....	21
1.4 Обзор современных датчиков давления.....	25
2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....	33
2.2 Выбор микроконтроллера. Технические характеристики МК.....	34
2.3 Беспроводные технологии передачи измерительной информации.....	48
3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....	65
4 РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....	71
4.1 Расчет погрешностей.....	71
4.2 Разработка методики выполнения измерений.....	78
4.3 Разработка методики поверки.....	84
5 АЛГОРИТМ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ.....	95
6 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА.....	97
6.1 Расчёт себестоимости. Определение оптовой цены.....	98
6.2 Расчёт эксплуатационных расходов.....	103
7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	105
7.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	105
7.2 Анализ условий эксплуатации.....	106

					200100.2016.158 ПЗ	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Под-	Да-		7

7.3 Соответствие требованиям безопасности.....	107
7.4 Эргономика.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	114
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СПЕЦИФИКАЦИЯ.....	118

					200100.2016.158 ПЗ	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Под-	Да-		8

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выпускной квалификационной работы (далее – ВКР):

В современной нефтяной промышленности широко используются различные технические системы автоматизации производства, которые представляют собой совокупность технологий, позволяющих управлять производственными процессами без человеческого участия с помощью цифровых измерительных устройств и автоматических устройств. В основу таких систем заложено перераспределение энергетических, материальных и информационных возможностей согласно принятому критерию оптимальности управления в нефтегазовой отрасли.

Автоматизация производства, в общем, позволяет решать следующие задачи: высвобождается труд человека; сокращаются затраты энергии и материалов на изготовление продукции; повышается коэффициент использования основного оборудования; увеличивается производительность труда за счёт увеличения скорости выполнения операций; повышается качество выпускаемой продукции за счёт увеличения точности; обеспечивается выполнение работ и функционирование таких объектов, где непосредственное участие человека невозможно. Современные системы автоматизации позволяют интегрировать единичное оборудование в автоматический порядок, обеспечивающий оптимальную производительность.

В автоматизированных системах нефтяной промышленности, как и любой другой, используется большое количество цифровых приборов, для сбора, хранения и обработки измерительной информации о состоянии отдельных элементов системы. Для обеспечения правильной работы датчиков, с целью получения достоверной информации, используется алгоритм «соединения с главной системой», состоящей из полевой (для получения первичных данных), управляющей (для фильтрации полученной информации) и информационной (для обработки полученной информации) подсистем. На данный момент широко используются датчики с проводной передачей данных, что влечёт за собой возникновения ряда проблем: невозможность установки его в труднодоступных

местах, риск аварийной ситуации при обрыве и износе кабеля, передающего информацию, дороговизны обслуживания в целом. Поэтому, актуальной является задача разработки цифрового измерительного устройства измерения избыточного давления с выходом на беспроводную сеть передачи данных.

Проектируемый цифровой датчик давления осуществляет передачу измерительных данных по протоколу ZigBee(англ. applicationsupportsublayer, поддержка подуровень приложения). Для данной технологии характерна безопасная передача данных, защищенность, способность к самоорганизации и самовосстановлению, ячеистая (mesh)–топология, высокая помехоустойчивость, низкое энергопотребление и отсутствие необходимости получения частотного разрешения при относительно небольших скоростях передачи данных.

Цель ВКР:

Исследование принципов работы существующих сенсоров для измерения избыточного давления, проектирование цифрового устройства для измерения избыточного давления в промышленных трубопроводах.

Задачи работы:

1. Провести анализ принципов работы приборов, рассмотреть аналогичные устройства.
2. Разобрать функциональную схему цифрового датчика давления (далее – ЦДД).
3. Разобрать электрическую принципиальную схему ЦДД.
4. Рассчитать погрешности измерительных каналов ЦДД.
5. Разработать методику выполнения измерения ЦДД.
6. Разработать методику выполнения поверки ЦДД.
7. Описание алгоритма работы микроконтроллера.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Понятие и обобщенная структура цифрового средства измерения

Цифровое средство измерения (далее – ЦСИ) – это измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровом коде [1].

В ЦСИ автоматически выполняются следующие операции:

- 1) Квантование измеряемой величины по уровню;
- 2) Дискретизация ее по времени;
- 3) Кодирование информации.

Представление измерительной информации в виде кода обеспечивает удобство ее регистрации и обработки, возможность длительного хранения в запоминающих устройствах без потерь, передачу на значительные расстояния без искажений практически по любым каналам связи, непосредственный ввод в электронно-вычислительную машину (далее – ЭВМ) для обработки, а также исключает вносимые оператором при отсчете субъективные погрешности.

В современной науке и технике цифровые средства измерения используются для точных измерений электрических и неэлектрических величин (например, давления) и в качестве промежуточных измерительных преобразователей аналоговых величин в цифровой код в информационно-измерительные системы (далее – ИИС) и автоматизированных системах контроля и управления с цифровой обработкой информации.

Преимуществами ЦСИ перед аналоговыми являются:

- удобство и объективность отсчета;
- высокая точность результатов измерения, практически недостижимая для аналоговых приборов;
- широкий динамический диапазон при высокой разрешающей способности;

- высокое быстродействие за счет отсутствия подвижных электромеханических элементов;

- возможность автоматизации процесса измерения, включая такие операции, как автоматический выбор полярности и пределов измерения;

- высокая устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям;

- возможность использования новейших достижений микроэлектронной технологии при конструировании и изготовлении.

К недостаткам ЦСИ следует отнести их схемную сложность и относительно высокую стоимость.

Малые габариты и высокое быстродействие приборов было достигнуто благодаря созданию аналоговых и цифровых интегральных микросхем. Применение интегральных микросхем средней и большой степеней интеграции значительно расширило функциональные возможности цифрового измерительного прибора (далее – ЦИП) и повысило их надежность, а также значительно снизило потребления энергии. В настоящее время разработаны и выпускаются малогабаритные универсальные цифровые вольтметры, выполненные всего на двух интегральных микросхемах повышенной степени интеграции и допускающие непрерывную работу от автономных источников в течение 200 ч.

Перспективным направлением развития ЦСИ является применение микропроцессоров, которые автоматически будут управлять процессом измерения, выполнять самодиагностику, а также первичную обработку результатов измерения (линеаризацию функции преобразования, коррекцию погрешностей, сжатие данных).

Таким образом, ЦСИ наиболее полно удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым в настоящее время к измерительной аппаратуре – высокая точность и быстродействие, автоматизация процессов измерения и обработки информации [2].

Обобщенная структурная схема ЦИП приведена на рисунке 1. Она содержит входной аналоговый преобразователь АП, аналого-цифровой

преобразователь (далее – АЦП), образцовую меру (далее – М), цифровое средство отображения информации (далее – ЦСОИ) и устройство управления (далее – УУ).

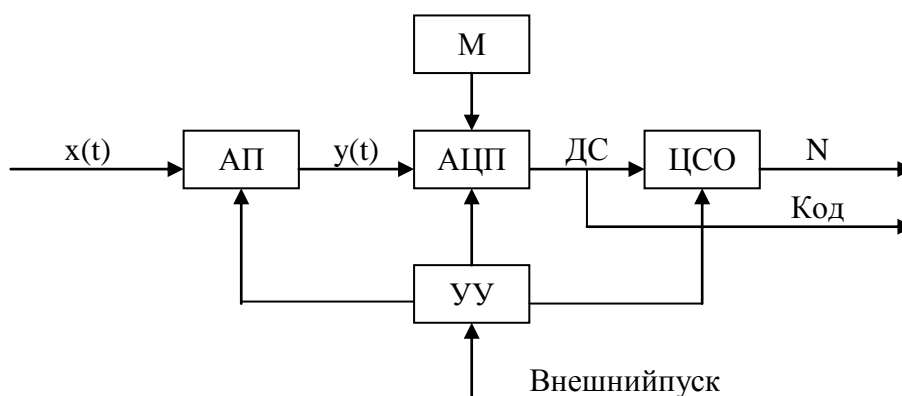


Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема

Аналоговый преобразователь преобразует измеряемую величину $x(t)$ в функционально с ней связанную аналоговую величину $y(t)$, более удобную для преобразования в цифровой код. В качестве АП используются усилители, делители, фильтры, преобразователи неэлектрических величин в электрические. АЦП преобразует электрическую величину в цифровой код, который далее обрабатывается и передается на ЦСОИ.

1.2 Первичные преобразователи давления

1.2.1 Физические принципы преобразования давления

Давление – сила, действующая на единицу площади. По своей физической природе она не может быть измерена прямыми методами, то есть непосредственным сравнением с эталоном. Распределенную по поверхности силу надо заменить равнодействующей силой, приложенной к математической точке и преобразовать в физическую величину, доступную для наблюдения.

Основным элементом любого датчика давления является механоэлектрический преобразователь «сенсор», то есть устройство, преобразующее давление, в электрический сигнал. Сенсор включает в себя

чувствительный элемент (далее –ЧЭ), который воспринимает распределенную по поверхности силу и преобразует механическую энергию в электрическую [3].

Исторически первую группу ЧЭ образуют устройства, в которых давлениепреобразуется в силу, вызывающую перемещение математической точки ее приложения. Наиболее распространенными ЧЭ этого типа являются трубка Бурдона,которая «разгибается» под действием давления, сильфон и мембранная коробка,жесткий центр которых совершает поступательное движение.

Традиционная конструкция механического манометра

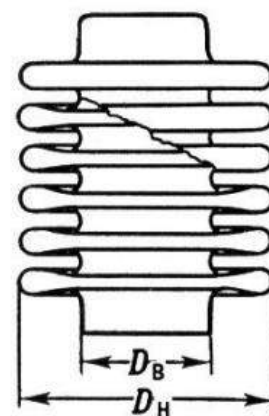
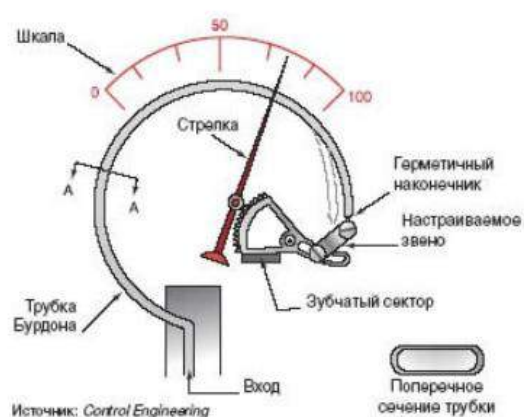


Рисунок 1.2 – Трубка Бурдона (а) и сильфон (б)

Итак, ЧЭ преобразует давление жидкости или газа в перемещение. Перемещение ЧЭ создает силу, которая в свою очередь вызывает перемещение соленоида в магнитной катушке (индуктивный датчик), перемещение контакта по поверхности резистора потенциометра, смещение обкладки конденсатора (емкостной датчик) и т.д. При сбросе давления трубка возвращается в исходное состояние. Величина невозврата называется упругим гистерезисом и является источником неустранимой погрешности прибора. Очевидно, что чем больше величина перемещения, тем больше значение выходного сигнала. Вместе с тем, чем больше перемещение, тем больше упругое последствие материала ЧЭ, а значит, и нелинейность, гистерезис, временная нестабильность. Преимуществами этой схемы преобразования являются простота реализации защиты от перегрузки

измеряемым давлением и относительно несложность изготовления датчиков невысокой точности.

Вторую группу (современную) образуют сенсоры, в которых давление преобразуется в деформацию упругой мембраны. Давление так и остается распределенной силой, а ЧЭ является вся поверхность мембраны, прогибающейся под действием давления.

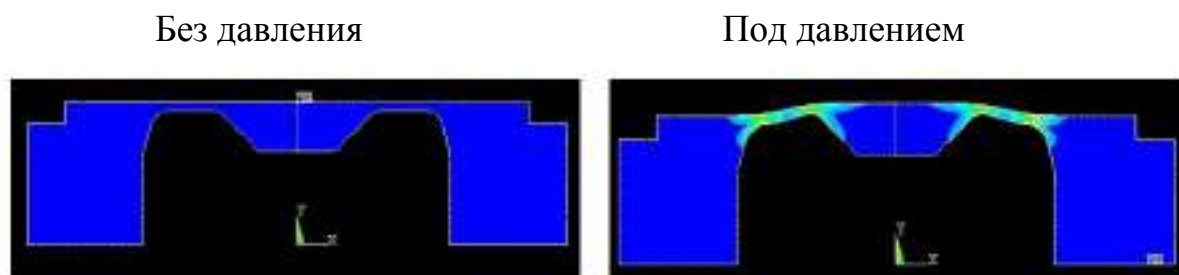


Рисунок 1.3 – Схема типичного кремниевого ЧЭ

Для того чтобы зависимость прогиба мембраны от давления была близка к линейной, центр мембраны «омертвляют», делая его «жестким», то есть несоизмеримо толстым по сравнению с рабочей поверхностью мембраны. Для расчета деформационной картины используют величину хода «жесткого центра».

Деформацию активной поверхности мембраны преобразуют в электрический параметр с помощью, так называемых тензорезисторов, то есть резисторов, значение сопротивления которых изменяется в результате их деформации.

Технология нанесения тензорезисторов может быть различной: от элементарного приклеивания до диффузионного внедрения. Изменение величины резисторов, обычно соединенных в мостовую схему, приводит к разбалансу моста, то есть, мы сразу получаем электрический выходной сигнал, изменяющийся пропорционально входному параметру.

Деформация в электрический выходной сигнал может быть преобразована двумя способами: либо с помощью тензорезисторов, либо за счет изменения

собственной частоты колебаний деформированной балки, жестко связанной с мембраной (Yokogawa). Малые перемещения можно преобразовать в изменение емкости конденсатора, одна из обкладок которого является упругой мембраной (Rosemount). Следует отметить, что это решение является единственной разработкой емкостного сенсора, выпускаемой в промышленных масштабах уже более полувека. Схема преобразователя Rosemount представлена на рисунке 1.4.

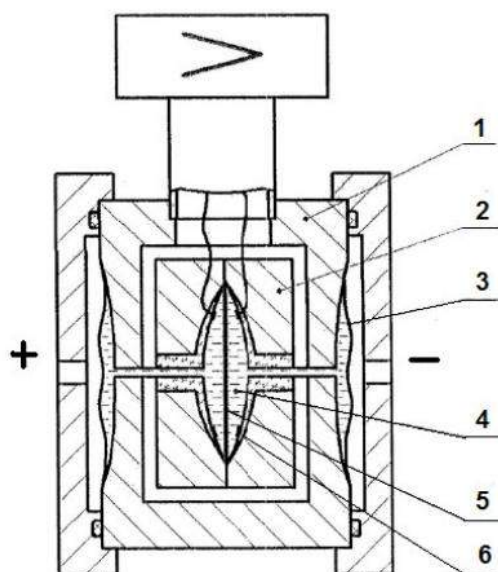


Рисунок 1.4 – Схема емкостного преобразователя Rosemount

Измерительный блок датчиков разности давления состоит из корпуса 1 и емкостной измерительной ячейки 2. Измеряемое давление передается через разделительные мембраны 3 и разделительную жидкость 4 к измерительной мембране 5, расположенной в центре емкостной ячейки.

Разберем физический принцип преобразования механического сигнала в электрический (аналоговый), для этого рассмотрим устройство и работу первичного преобразователя (ёмкостной ячейки).

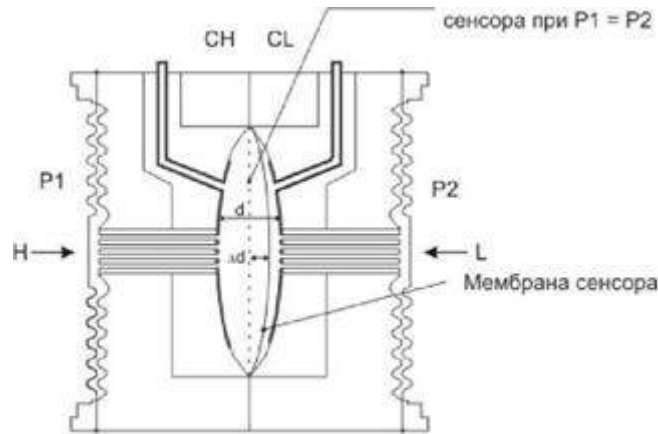


Рисунок 1.5 – Принцип действия емкостного сенсора

Δd – отклонение мембраны сенсора под воздействием разности давлений.

Емкость конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{s \cdot S}{d}, \quad (1.1)$$

где S – площадь обкладки конденсатора, d – расстояние между обкладками, s –диэлектрическая проницаемость.

$P1$ и $P2$ – давление в плюсовой (H) и минусовой (L) камерах; CH – ёмкость между неподвижной стенкой со стороны $P1$ и мембраной; CL – ёмкость между неподвижной стенкой со стороны $P2$ и мембраной; d – расстояние между неподвижными стенками [4].

Измерительные цепи ёмкостных ПИП.

Существует множество различных измерительных цепей ёмкостных преобразователей. Наиболее распространенными являются измерительные цепи: в виде делителя напряжения, измерительные мосты, ёмкостно- диодные цепи, контурные цепи [5].

Очень часто ёмкостные первичные измерительные преобразователи (далее – ПИП) включаются в мостовые измерительные цепи. На рисунке 1.6приведена схема мостовой цепи, в одно плечо которой включен емкостный преобразователь $C1$, во второе плечо – переменный конденсатор $C2$. Для исключения влияния паразитных емкостей датчика его экранирующий электрод 1 соединяется со средней точкой трансформатора, входящего в состав моста. С

помощью переменного конденсатора C_2 устанавливаем выходное напряжение мостовой цепи равным нулю: $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. В этом случае экран имеет потенциал земли. Так как паразитная емкость включена параллельно верхней половине вторичной обмотки трансформатора моста, то она не влияет на условие равновесия моста.

Мостовые измерительные цепи используются преимущественно с дифференциальными преобразователями. На рисунке 1.6 показан вариант выполнения мостовой цепи, в которой дифференциальный емкостной измерительный преобразователь (далее – ЕИП) (C_1 – C_2) включён в соседние плечи моста, в другие плечи моста включены низкоомные резисторы R_1 и R_2 . Две паразитные емкости между жилами и экранами кабелей шунтируются малыми сопротивлениями R_1 и R_2 нерабочих плеч моста и практически не влияют на работу мостовой схемы. Обычно выходной сигнал цепи подается на усилитель и для уменьшения влияния емкости экранированного провода, соединяющего ЕИП с усилителем, применяется схема эквипотенциальной защиты. Для этой цели используются провода с двойным экраном.

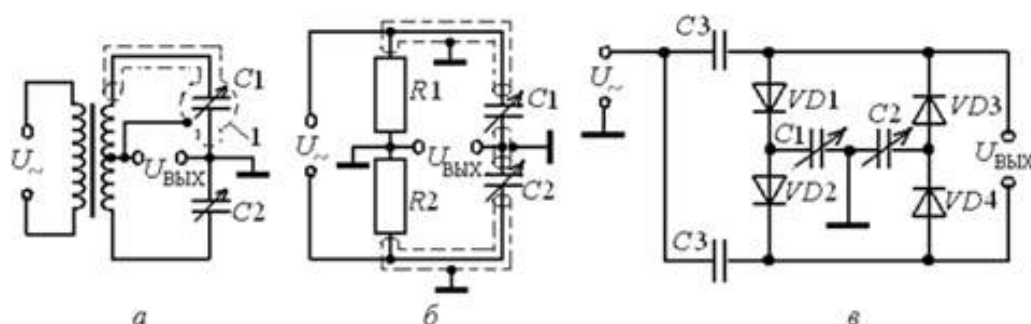
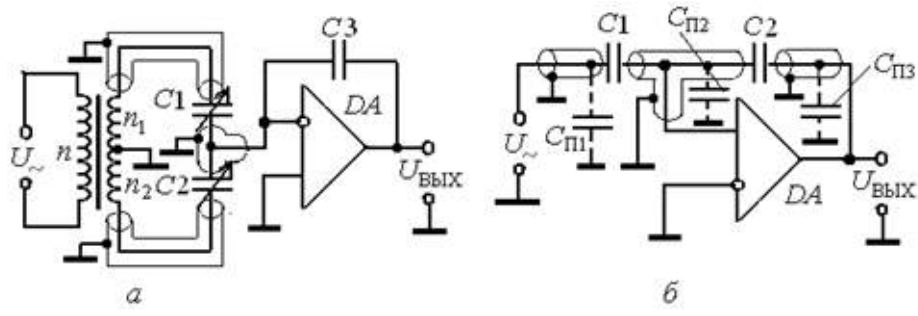


Рисунок 1.6 – Измерительные цепи ёмкостных ПИП

В настоящее время очень часто измерительные цепи содержат операционные усилители.

На рисунке 1.7 показаны схемы с использованием операционного усилителя (далее – ОУ), построенная по принципу делителя напряжения. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\tilde{U} \cdot C_1}{C_2}$ Емкостный преобразователь может быть включен вместо C_1 или C_2 в зависимости от того, на каком принципе построен ЕИП и какую функцию

преобразования измерительной цепи необходимо реализовать. В данной схеме паразитные ёмкости $\frac{C_{П1}}{C_{П2}}$ практически не влияют на работу измерительного устройства. Ёмкости $C_{П1}$ и $C_{П3}$ шунтируются низкими выходными сопротивлениями источника напряжения \tilde{U} и усилителя. Ёмкость $C_{П2}$ включена между входами ОУ, и напряжение на ней близко к нулю.



Рисунке 1.7 – Измерительные цепи ёмкостных ПИП с ОУ

При подсоединении выхода моста к инвертирующему входу ОУ необходимость в двух экранах отпадает. Выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{(C_1 - C_2) \cdot \tilde{U}}{C_3} \quad (1.2)$$

Недостатком рассмотренных схем является то, что они могут использоваться для ЕИП, у которых все пластины изолированы от корпуса. При заземлении одной из пластин (обычно общей подвижной пластины) желательно элементы измерительной цепи располагать в одном корпусе с датчиком. При работе дифференциального преобразователя с заземленной пластиной может использоваться ёмкостно-диодная измерительная цепь (см. рисунке 1.7 в). Если пренебречь падением напряжения на диодах, то выходное напряжение можно найти по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{(C_1 - C_2) \cdot \tilde{U}}{C_1 + C_2 + 2C_1 \frac{C_2}{C_3}} \quad (1.3)$$

1.2.2 Описание емкостной ячейки. Области применения емкостных ячеек

ЕИП состоит из электродов, между которыми располагается диэлектрический материал, выводов и конструктивных элементов. Диэлектрик находится в жидком состоянии. Электроды (обкладки) выполнены в виде прямоугольной формы и расположены параллельно друг к другу. Конструктивные элементы – различные электроизоляционные материалы и элементы защиты конденсатора от внешних факторов.

Ёмкостные ПИП давления используют метод изменения ёмкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Керамические ёмкостные первичные преобразователи давления, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости. В элементе из керамики пространство между обкладками заполнено органической жидкостью (маслом) [6].



Рисунок 1.8 – Сенсорная ячейка

Технические характеристики:

- Диапазоны давлений: от 0...413,7бар.
- Классточности: $\pm 0,1\%$.

- Диапазон рабочих температур: от -40С до +70С.
- Выходной сигнал—4...20 мА.

Возможные области применения емкостных датчиков чрезвычайно разнообразны. Они используются в системах регулирования и управления производственными процессами почти во всех отраслях промышленности. Емкостные датчики применяются для контроля заполнения резервуаров жидким, порошкообразным или зернистым веществом, как конечные выключатели на автоматизированных линиях, конвейерах, роботах, обрабатывающих центрах, станках, в системах сигнализации, для позиционирования различных механизмов. Наиболее часто емкостные датчики применяют для измерений, меняющихся давления или уровня, точных измерений механических перемещений.

1.3 Первичные измерительные преобразователи температуры

Температура— физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

Температура является основной величиной, которую чаще всего измеряют на практике. Соответствующим измерительным устройством называют термометром, если речь идет о невысоких температурах, или пирометрами, если речь идет о высоких температурах [7].

1.3.1 Методы измерения температуры. Описание принципа работы термопары

Все типы термометров принято разбивать на два класса в зависимости от методики измерений:

- Контактные термометры (наиболее массовый вид термометров), отличительной особенностью которых является необходимость теплового контакта между датчиком термометра и средой, температура которой измеряется.

- Неконтактные термометры, для измерения которыми нет необходимости в тепловом контакте среды и прибора, а достаточно измерений собственного теплового.

Контактные приборы и методы по принципу действия разделяются на:

а) термометры контактные волюметрические, в которых измеряется изменение объема (volume) жидкости или газа с изменением температуры;

б) термометры дилатометрические, в которых о температуре судят по удлинению различных материалов при изменении температуры. В ряде случаев датчиком служит пластинка, изготовленная из двух металлов с разными температурными коэффициентами расширения и изгибающаяся при нагревании или охлаждении;

в) термопары, представляющие из себя два разнородных, спаянных по концам проводника. При наличии разности температур спаев в термопаре возникает электрический ток, который и служит мерой изменения температуры. Температура измеряется по термоЭДС или по величине силы тока термопары;

г) термосопротивления – термометры, принципом действия которых является измерения сопротивления проводника с изменением температуры.

Неконтактные методы, в основе которых лежит регистрация собственного теплового или оптического излучения, можно представить следующими направлениями:

а) Радиометрия – измерение температуры по собственному тепловому излучению тел. Для невысоких и комнатных температур это излучение в инфракрасном диапазоне длин волн;

б) Тепловидение – радиометрическое измерение температуры с пространственным разрешением и с преобразованием температурного поля в телевизионное изображение иногда с цветовым контрастом. Позволяет измерять градиенты температуры, температуру среды в замкнутых объемах, например, температуру жидкостей в резервуарах и трубах;

в) пирометрия – измерение температуры самосветящихся объектов: пламен, плазмы, астрофизических объектов. Используется принцип сравнения либо

яркости объекта со стандартом яркости (яркостный пирометр и яркостная температура), либо цвета объекта с цветом стандарта (цветовой пирометр и цветовая температура), либо тепловой энергии, излучаемой объектом, с энергией, испускаемой стандартным излучателем (радиационный пирометр и радиационная температура).

Принцип действия термопары.

Согласно правилу Зеебека, если проводник подвергается воздействию, его сопротивление и напряжение изменяется — это называется термоэлектрический эффект или эффект Зеебека. Любая попытка измерить это напряжение обязательно включает подключение другого проводника к «горячему» концу термопары. Этот дополнительный гибкий провод, потом также может стать градиентом температуры, а также разработать собственное напряжение, которое будет противостоять текущему. Величина этой разности напрямую зависит от металла, который используется при работе. Использование разнородных сплавов для замыкания цепи создает новую цепь, в которой два конца могут генерировать различные напряжения, в результате чего образуется небольшое различие в напряжении, доступные для измерения. Это различие увеличивается с ростом температуры и составляет от 1 до 70 микровольт на градус Цельсия ($\mu\text{В} / ^\circ\text{C}$) для стандартных сочетаний металлов.

На рисунках 1.9 и 1.10 представлены два стандартных типа подключения термопары к измерительным приборам.

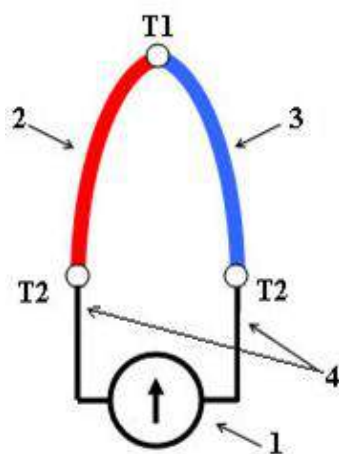


Рисунок 1.9 – Подключение к свободным концам термоэлектродов

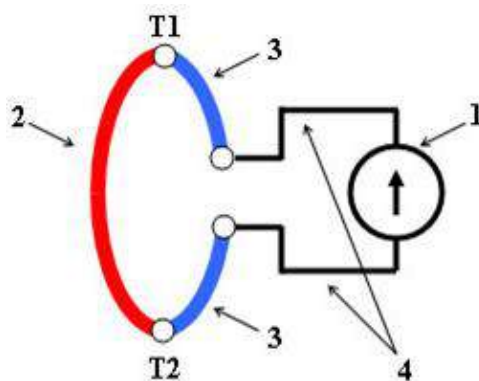


Рисунок 1.10 – Подключение в разрыв одной из дуг датчика: 1 – измерительный прибор; 2,3 – термоэлектроды; 4 – соединительные провода; T1, T2 – температура «горячего» и «холодного» спаев термопары.

1.3.1 Описание термопары ТХК типа L

Основными характеристиками для выбора термопары являются ее тип, изоляция и конструкция пробника, так как именно эти факторы определяют температурный диапазон, точность, а также достоверность проводимых измерений.

Наибольшее распространение получили термопары:

- Хромель-алюмелиевые (ХА).
- Хромель-копелевые (ХК).
- Железо-константановые (ЖК).
- Платинородиево-платиновые (ПП).

В данной ВКР воспользуемся термопарой типа L или ТХК, так как они имеют наибольшую дифференциальную чувствительность из всех промышленно выпускаемых термопар. Хромель-копелевые термопары применяются для более точных измерений температур, а также для измерений малых величин разности температур. Хромель-копелевые термопары обладают очень высокой термоэлектрической стабильностью в диапазоне до 600°С. Это объясняют тем, что изменения термоэдс хромелевого и копелевого термоэлектродов компенсируют

друг друга, так как направлены в одну и ту же сторону. Хромель-копелевая термопара может стабильно работать несколько десятков тысяч часов [8].

Технические характеристики (1 класс допуска):

- Диапазон температуры: От -40 до + 375.
- Предельное отклонение: 1,5%.
- Выходной сигнал: -1,27... +29,306 мВ.

1.4 Обзор современных датчиков давления

Emerson Process Management датчик давления метран-150.

Датчик давления серии Метран-150 – это улучшенная версия датчиков Метран-100 с расширенными возможностями. Он предназначен для работы в системах автоматического управления технологическими процессами и обеспечивает непрерывное преобразование входных величин либо в аналоговый, либо в цифровой сигнал. При этом входными величинами могут выступать избыточное, абсолютное давления или разница между ними [9].

Параметры и установки датчика можно регулировать несколькими способами:

- используя клавиатуру и ЖКИ датчика;
- используя HART-коммуникатор;
- удаленно с использованием HART-модема и необходимого ПО на компьютере.



Рисунок 1.11 – Внешний вид цифрового датчика давления Метран-150

Принцип работы датчика Метран-150.

Давление через разделительную мембрану и разделительную жидкость передается на чувствительный элемент тензомодуля. Под давлением чувствительный элемент деформируется, вызывая при этом изменение электрического сопротивления его тензорезисторов и разбаланс мостовой схемы. Электрический сигнал, образующийся при разбалансе мостовой схемы, измеряется АЦП. Устройство АЦП обрабатывает аналоговые сигналы измерительного блока, пропорциональные входной измеряемой величине давлению и температуре, и преобразовывает их в цифровые коды. Микроконтроллер принимает цифровые сигналы с устройства АЦП вместе с коэффициентами коррекции, производит коррекцию и линеаризацию характеристики сенсора, рассчитывает скорректированное значение выходного сигнала датчика и посылает его в цифро-аналоговый преобразователь (далее – ЦАП). Цифро-аналоговый преобразователь преобразует цифровой сигнал, поступающий с микроконтроллера, в выходной аналоговый сигнал. HART-модем, установленный на микропроцессорной плате, предназначен для выделения HART сигнала из токовой петли 4-20 мА и преобразование его в стандартный цифровой сигнал.

Датчики выпускаются в двух исполнениях:

- фланцевом (Метран-150 CD, CG);
- штуцерном (Метран-150 TG, TA).

Во фланцевых метрометрах серии Метран-150 применяются полностью изолированная от действия электрического сигнала, температуры и механических ударов емкостная измерительная ячейка. В штуцерных моделях тензомодуль с подложкой из кремния.

В таблице 1.2 представлены технические характеристики датчика Метран-150.

Таблица 1.2–Технические характеристики датчика Метран-150

Диапазон температур окружающей среды:	от -40 до 80 °С; от -55 до 80 °С (опция)
Диапазоны измеряемых давлений:	минимальный 0-0,025 кПа; максимальный 0-68 МПа.
Основная приведенная погрешность измерений:	до ±0,075%; ±0,2%(опции); ±0,5% от диапазона.
Также датчики разделяются по типу выходного сигнала:	4-20 мА (протокол HART), с кодом сигнала А; 0-5 мА с кодом сигнала В.

При этом после начала эксплуатации тип выходного сигнала может быть выбран любой, наиболее удобный.

Endress Hauser датчик давления Deltabar S PMD 70:

Прибор Deltabar S PMD70 с керамическими мембранами – это высокоточный и многофункциональный преобразователь давления, предназначенный для измерения разности давления между двумя точками [10].

Области применения:

- измерение дифференциального давления (например, в фильтрах или насосах);
- измерение расхода (массового и объемного) газа, жидкости и пара;
- определения уровня в закрытых резервуарах, измерение малых значений избыточного давления (от 25Па).



Рисунок 1.12 – Внешний вид цифрового датчика давления DeltabarSPMD 70

Принцип измерения датчика давления DeltabarSPMD 70:

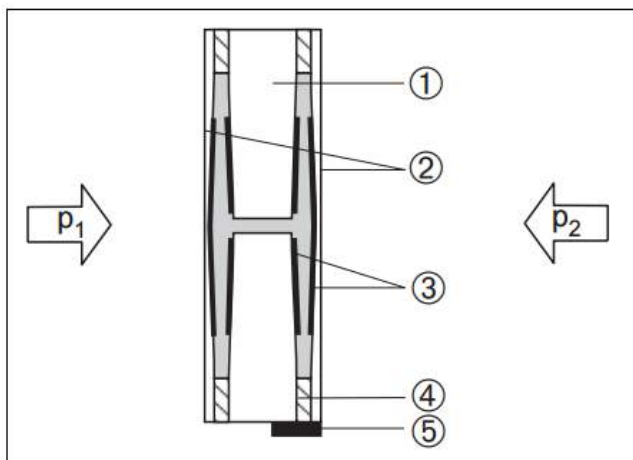


Рисунок 1.13–Керамические измерительные диафрагмы PMD 70: 1) Корпус; 2) Диафрагма; 3) Электроды; 4)Стеклошлак, фиксирующий диафрагму на основе; 5) Датчик температуры

Керамическая измерительная ячейка основана на принципе плоского конденсатора с электродом (1) и подвижным электродом на внутренней стороне диафрагмы (3). Обычно такая измерительная ячейка заполняется силиконовым или минеральным маслом. Разность давлений ($p_1 \neq p_2$) вызывает отклонение обеих

диафрагм. Оба значения электрической емкости конвертируются и передаются на микропроцессор трансмиттера в виде цифрового сигнала.

В таблице 1.3 представлены технические характеристики датчика давления Deltabar S PMD 70.

Таблица 1.3–Технические характеристики датчика давления Deltabar S PMD 70

Диапазоны измерения давления:	От -25...+25 мбар; До -3...+3 бар.
Температурный диапазон окружающей среды:	-20...+85 ⁰ С.
Базовая приведённая погрешность:	±0,075%; ±0,05% (опция).
Выходной сигнал:	4...20мА с наложенным цифровым сигналом по протоколу HART, 2-проводный.

YOKOGAWA датчик давления EJX430B:

Беспроводной датчик избыточного давления EJX430B предназначен для измерения избыточного давления различных сред: жидкости, газа и пара. Датчик работает от аккумуляторной батареи, вследствие чего стоимость установки датчика давления снижена в сравнение с проводным методом соединения. Использование беспроводного датчика дает возможность постоянной или временной установки в тех местах, где работа проводных устройств невозможна или неэкономична. Беспроводная связь с 128 битным шифрованием обеспечивает безопасное использование и многочисленные функции, включая самодиагностику и регулировку параметров устройства. Связь устанавливается по протоколу ISA 100.11a [11].



Рисунок 1.13 – Внешний вид датчика избыточного давления EJX430В

Отличительной особенностью преобразователей серий EJX является принцип измерения давления: в качестве чувствительного элемента в них используется кремниевый механический резонатор.

Принцип работы кремниевого резонатора:

В зависимости от знака приложенного давления резонатор растягивается или сжимается, в результате чего частота его собственных механических колебаний изменяется. Колебания механического резонатора в постоянном магнитном поле преобразуются в колебания электрического контура, и, в итоге, на выходе чувствительного элемента получается цифровой сигнал, точно отражающий величину измеряемого давления.

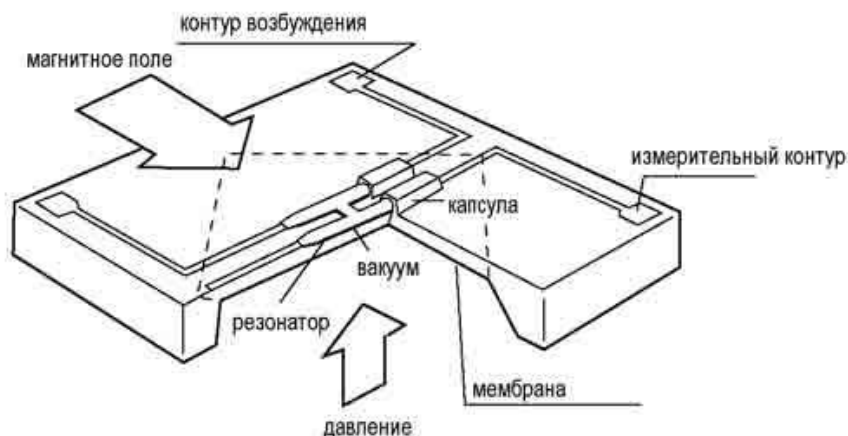


Рисунок 1.14 – Кремниевый резонатор датчика избыточного давления
EJX430B

В таблице 1.4 представлены основные технические характеристики датчика давления EJX430B.

Таблица 1.4–Технические характеристики датчика давления EJX430B.

Беспроводной выходной сигнал	ISA100.11a (128-битное шифрование AES, мощность 11,6 дБм).
Срок службы аккумуляторной батареи	не менее 10 лет.
Максимальное рабочее давление	до 16 Мпа.
Температура окружающей среды	-51...85 °С.
Погрешность измерений	± 0,04% шкалы.

Вывод по главе один:

В данной главе был произведен обзор первичных измерительных преобразователей и анализ передачи информации аналогичных цифровых датчиков давления. Цифровой датчик давления EJX430B компании YOKOGAWA использует беспроводную передачу данных, поэтому в современной промышленности он более актуален, нежели чем ЦДД с HART-коммуникатором.

В результате анализа и обзора был определен принцип работы проектируемого прибора. При проектировании прибора будем использовать беспроводной способ передачи данных, а в качестве ПИП будут использоваться емкостная ячейка (для определения давления) и термопара ТХК типа L(для определения температуры).

Информационный поиск позволил сделать следующие выводы:

Передача измерительной информации по сенсорным беспроводным сетям является актуальной областью инженерных разработок, так как отсутствие проводов обеспечивает передачу более достоверной информации и в процессе эксплуатации прибора не возникает таких проблем как: износ проводов, их повреждение, тем самым не нарушается стабильность измерения.

Поэтому целью ВКР является разработка датчика с беспроводной передачей данных.

Для достижения цели разработки необходимо выполнить(решить) следующие задачи:

1. Изучить основы технологии WН для беспроводной передачи измерительной информации.
2. Изучить первичные и вторичные измерительные преобразователи, микроконтроллеры и приемопередатчики.
3. Провести аналитический обзор современных разработок в области измерения и передачи информации уровня давления в трубопроводах.
4. Разработать функциональную схему и описать принцип ее работы.
5. Разработать схему электрическую принципиальную датчика, обеспечивающую цифровую передачу информации по беспроводной сенсорной сети.

2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

2.1 Обобщённая функциональная схема цифрового датчика давления

На рисунке 2.1 изображена функциональная схема проектируемого прибора.



Рисунке 2.1 – Функциональная схема цифрового датчика давления

На входе микроконтроллера (далее – МК) аналоговые сигналы (давления (от 0...0,1 до 0...41370 кПа) и температуры (от -40 до + 70°C)). Температурный сенсор необходим для расчета дополнительной погрешности, возникающей в емкостном датчике.

Модуль АЦП обрабатывает аналоговые сигналы измерительного блока, пропорциональные входной измеряемой величине (давлению) (U_p) и температуре (U_t), и преобразовывает их в цифровые коды. Микроконтроллер принимает цифровые сигналы с модуля АЦП, производит коррекцию и линеаризацию характеристики сенсора, рассчитывает скорректированное значение выходного сигнала датчика и посылает его в цифро-аналоговый преобразователь (далее – ЦАП). Цифро-аналоговый преобразователь преобразует цифровой сигнал, поступающий с микроконтроллера, в выходной аналоговый сигнал. Приемопередатчик ZigBee предназначен для передачи измерений на удаленный ПК.

2.2 Выбор микроконтроллера. Технические характеристики МК

2.2.1 Выбор микросхемы. Подробное описание выбранного МК

Микроконтроллеры семейства MSP430 TexasInstruments:

Высокий спрос на беспроводные устройства вызвал необходимость создания микроконтроллеров с минимальными энергозатратами. Компания TexasInstruments разработала и серийно выпускает семейство микроконтроллеров MSP430, которое удовлетворит требования разработчика устройств на микроконтроллерах. Применяя микроконтроллеры серии MSP430, разработчики получают сильный инструмент для работы с аналоговыми и цифровыми сигналами при минимальном потреблении энергии батареи. Полного заряда энергии литиевой батареи достаточно для питания прибора до 5 лет. Краткие технические характеристики микроконтроллеров семейства MSP430 показаны в таблице 2.1

Микроконтроллеры MSP430 – это 16-разрядные микроконтроллеры RISC-архитектуры, с развитой периферией и минимальными энергозатратами [12].

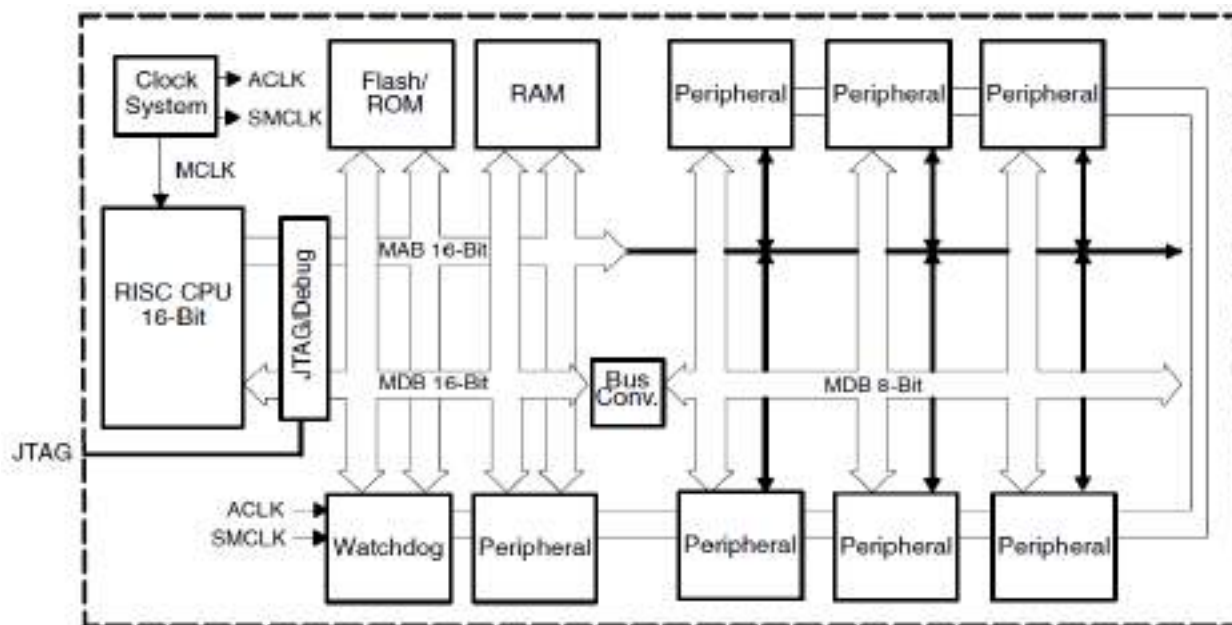


Рисунок 2.2–Архитектура микроконтроллеров серии MSP430P31x

Таблица 2.1 – Технические характеристики микроконтроллеров семейства MSP430

Name	RAM	Program	USART	ADC	Case	Power
MSP430F 133	256	8K FLASH	1	8ch 12bit REF	QFP-64	1.8V– 3.6V
MSP430F 135	512	16K FLASH	1	8ch 12bit REF	QFP-64	
MSP430F 147	1K	32K FLASH	2	8ch 12bit REF	QFP-64	
MSP430F 148	2K	48K FLASH	2	8ch 12bit REF	QFP-64	
MSP430F 149	2K	60K FLASH	2	8ch 12bit REF	QFP-64	

Есть несколько особенностей отличающих микроконтроллеры MSP430 от других микроконтроллеров:

RISC(ReducedInstructionSetComputer) архитектура процессора с сокращенным набором команд. Наиболее важные отличительные особенности RISC архитектуры: архитектура регистр-регистр, простые способы адресации, простые команды и большой регистровый файл. Микроконтроллер MSP430 имеет 27 основных инструкций и 24 дополнительных инструкции, что значительно упрощает процесс генерации команд. Отсутствуют специальные команды обращения к аккумулятору, памяти или к периферийным устройствам. Это существенно повышает эффективность работы процессора. Ядро процессора – 16-битовое RISC ALU и шестнадцать 16-битовых регистров. Четыре регистра выполняют функции программного счетчика (PC), регистра статуса (SR), указателя стека (SP) и регистра констант (CG). Остальные двенадцать 16-битовых регистра – полностью в распоряжении пользователя. Регистры общего назначения используются для хранения переменных, указателей и для операций с данными. Процессор обращается к этим регистрам непосредственно, что содействует высокой эффективности работы микроконтроллера MSP430. Время выполнения команд 1-4 машинных цикла (1-4 мкс).

Библиотека математики с плавающей точкой FPP (FloatingPointPackage) дополнение к программному обеспечению микроконтроллеров семейства MSP430. Библиотека FPP подключается к рабочей программе, занимая в программной памяти 1 килобайт. Библиотека работает с числами в диапазоне от -1.099.1012 до +1.099.1012. При помощи библиотеки можно выполнять операции сложения, вычитания, умножения, деления, вычисления квадратного корня, вычисления тригонометрических функций и операции сравнения чисел. В состав библиотеки входят конвертеры, преобразующие числа в формат float и обратно. Разработчик получает возможность производить сложные вычисления с большой точностью.

Представителем семейства является микроконтроллер MSP430F148. С состав микроконтроллера входят следующие устройства:

- 16-Битовая RISC архитектура;
- единственный 32 kHz керамический резонатор, внутренняя системная частота – до 3.3 MHz;
- 16-битовый таймер с 6 регистрами слежения/сравнения;
- 16-битовый таймер с 3 регистрами слежения/сравнения;
- встроенный компаратор;
- встроенные модули 12-разрядного или 10-разрядного АЦП. последовательного приближения (SAR) скоростью 200 ksps с источником опорного напряжения 1,5В или 2,5В;
- сторожевой таймер (16 бит);
- 6 портов ввода–вывода;
- два аппаратных UART.

Продолжение таблицы 2.2

P4.0/TBO	36	Таймер В: вход захвата 0, выход ШИМ 0
P4.1/TB1	37	Таймер В: вход захвата 1, выход ШИМ 1
P4.2/TB2	38	Таймер В: вход захвата 2, выход ШИМ 2
P4.3/TB2	39	Таймер В: вход захвата 3, выход ШИМ 3
P4.4/TB3	40	Таймер В: вход захвата 4, выход ШИМ 4
P4.5/TB4	41	Таймер В: вход захвата 5, выход ШИМ 5
P4.6/TB5	42	Таймер В: вход захвата 6, выход ШИМ 6
P4.7/ TBCLK	43	Вход частоты для таймера В
P5.0/STE1	44	Разрешение передавать подчин. USART1/SPI
P5.1/SIMO1	45	Вход подч. /выход мастера USART1/SPI
P5.2/SOMI1	46	Выход подч. /вход мастера USART1/SPI
P5.3/UCLK1	47	Вход f для USART1/SPI или ПАКТ, выход –SPI
P5.4/MCLK	48	Выход MCLK
P5.5/SMCLK	49	Выход SMCLK
P5.6/ACLK	50	Выход ACLK
P5.7/TboutH	51	Переключение всех выходов ТВ в 3е состояние
P6.0/A0	59	Вход АЦП 0
P6.1/A1	60	Вход АЦП 1
P6.2/A2	61	Вход АЦП 2
P6.3/A3	2	Вход АЦП 3

2.2.2 Понятие аналого-цифрового преобразования. Типы АЦП

Аналого-цифровое преобразование – это процесс преобразования входной физической величины (напряжение, ток, частота следования импульсов) в ее числовое представление. Аналого-цифровой преобразователь – устройство, выполняющее такое преобразование.

Наиболее популярными и востребованными архитектурами являются АЦП:

- Последовательного приближения (SAR), + PulSAR.
- Сигма дельта (Σ_{Δ}).

АЦП последовательного приближения для сбора данных:

В области систем сбора данных, когда требуется мультиплексирование нескольких входных сигналов, распространены АЦП последовательного приближения. Современные АЦП последовательного приближения имеют разрядность от восьми до восемнадцати бит и частоту преобразования до нескольких мегагерц. Выходные данные обычно передаются через стандартный последовательный интерфейс (например, I2C или SPI), но есть и устройства с параллельным выходом (разумеется, у них значительно большее количество выводов и размеры корпуса).

АЦП последовательного приближения осуществляет алгоритм сравнения. Он измеряет величину входного сигнала, то есть сравнивает величины входного напряжения с рядом величин, генерируемых следующим образом:

1) На выходе ЦАП устанавливается половина опорного напряжения.

2) Если сигнал больше этой величины, то он сравнивается с напряжением, лежащим посередине оставшегося интервала, т.е., в данном случае, $3/4$ опорного. Если сигнал меньше установленного уровня, то следующее сравнение будет производиться с меньшей половиной оставшегося интервала (т.е. с уровнем $1/4$ опорного).

3) Шаг 2 повторяется N раз. Число шагов равно числу бит в результате.

Базовая схема АЦП последовательного приближения показана на рисунке

2.4

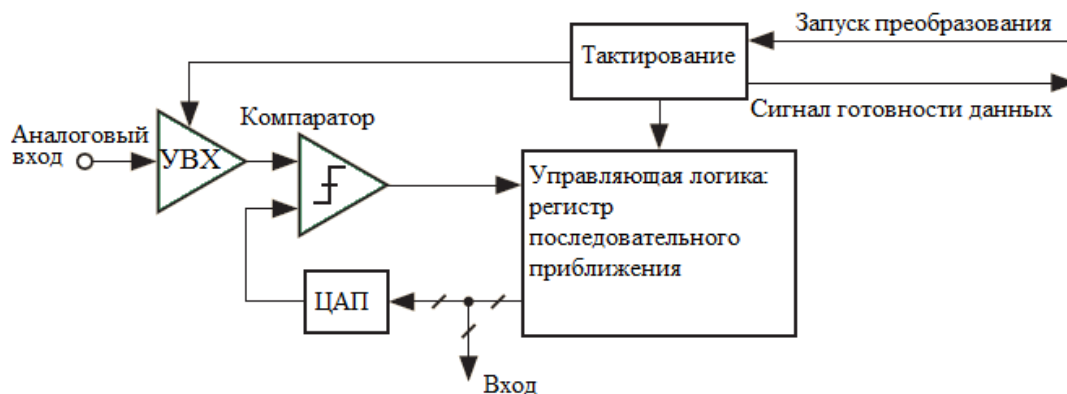


Рисунок 2.4– Базовая схема АЦП последовательного приближения

Таким образом, АЦП последовательного приближения состоит из следующих узлов:

1) Компаратор. Он сравнивает входную величину и текущее значение напряжения.

2) Цифро-аналоговый преобразователь. Он генерирует значение напряжения на основе поступающего на вход цифрового кода.

3) Регистр последовательного приближения. Он осуществляет алгоритм последовательного приближения, генерируя текущее значение кода, подающегося на вход ЦАП. По его названию названа вся данная архитектура АЦП.

4) Устройство выборки-хранения. Устройство выборки-хранения «запоминает» текущее значение аналогового сигнала, и сохраняет его неизменным на протяжении всего цикла работы устройства.

Особенности PULSAR:

АЦП семейства PulSAR от компании AnalogDevices имеют разрядность от 16 до 18 бит, скорость компонентов семейства PulSAR варьируется от 1 MSPS до 10 MSPS. Семейство компании AnalogDevices основано на технологии, с помощью которой обеспечивается нулевое время задержки сигналов, что является очень важным для систем сбора данных. В преобразователях используются передовые методы разработки для достижения низкого уровня рассеивания мощности (обычно 3мВт при 3В и 15мВт при 5В) [13]. Примерами АЦП данного типа являются микросхемы: AD7680, ADS8861, AD7982.

Сигма-дельта АЦП для точных промышленных измерений:

Свое название преобразователь получил благодаря наличию в нем двух блоков: «сигма» – интегратора, «дельта» – дифференциального усилителя. Принцип усреднение результатов измерения на большом интервале времени позволяет уменьшить погрешность, а, следовательно, увеличить разрешающую способность.

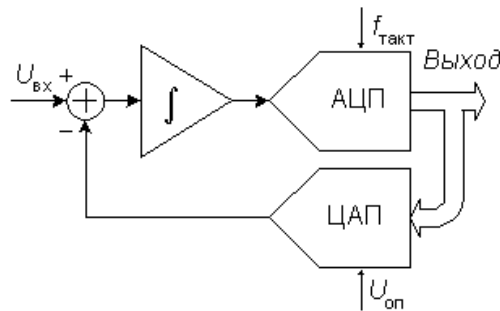


Рисунок 2.5 – Структурная схема сигма-дельта модулятора

Основные узлы АЦП – это сигма-дельта модулятор и цифровой фильтр. Схема n -разрядного сигма-дельта модулятора первого порядка изображена на рисунке 2.5. Принцип действия этой схемы основана на разности сигналов $U_{вх}(t)$ и ЦАП (на выходе), полученной на предыдущем такте работы схемы. Результат разности интегрируется, а затем преобразуется в код параллельным АЦП невысокой разрядности. Последовательность кодов отправляется на цифровой фильтр нижних частот.

Порядок модулятора устанавливается количеством интеграторов и сумматоров в его схеме. Сигма-дельта модуляторы N -го порядка содержат N сумматоров и N интеграторов и обеспечивают большее соотношение сигнал/шум при той же частоте отсчетов, чем модуляторы первого порядка.

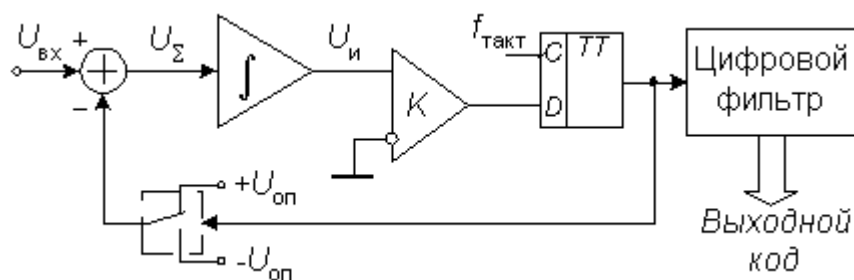


Рисунок 2.6 – Структурная схема сигма-дельта АЦП

В большинстве случаев в составе интегральных микросхем применяются однобитные сигма-дельта модуляторы, в которых в качестве ЦАП используется аналоговый коммутатор, а в качестве АЦП – компаратор (рисунок 2.6). Модулятор

измеряет разность между аналоговым входным сигналом и аналоговым сигналом на выходе ЦАП обратной связи. Затем интегратор обрабатывает выходное аналоговое напряжение результата вычитания и передаёт сигнал на 1–разрядный АЦП. 1–разрядный АЦП преобразует выходной сигнал интегратора в единицу или нуль. Используя системный тактовый генератор, АЦП посылает 1-битовый цифровой сигнал на выход модулятора, а также обратно по цепи обратной связи, где его ожидает 1–битовый ЦАП. 1–битовый АЦП превращает сигнал в выходной код, который содержит так же шум квантования (e_i). Сигнал на выходе модулятора равен входному сигналу плюс шум квантования ($e_i - e_{i-1}$). Как показывает эта формула, шум квантования представлен разностью между текущей (e_i) и предыдущей (e_{i-1}) ошибками модулятора [14].

В отличие от большинства устройств квантования, дельта–сигма модулятор содержит интегратор, который формирует шум квантования. Спектр шума на выходе модулятора не плоский. Самым главным в его частотном анализе является то, что модулятор формирует шум в области высоких частот, облегчая получение результата с высоким разрешением.

По сравнению с однократным интегрированием двойное интегрирование с помощью модулятора второго порядка является хорошим способом минимизации низкочастотного шума квантования.

Большинство дельта-сигма модуляторов являются модуляторами высоких порядков. Например, наиболее распространённые дельта-сигма преобразователи имеют модуляторы второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого порядков. Модуляторы высоких порядков формируют шум квантования даже более сильно в области высоких частот.

Примерами АЦП данного типа являются микросхемы: AD7720, AD7716.

2.2.3 АЦП последовательного типа. Параметры АЦП

Выбранный в ВКР микроконтроллер имеет два модуля АЦП, это Модуль АЦП12 и АЦП10, для реализации разработки ЦДД воспользуясь АЦП12, так как

разрядность у него выше, следовательно, и точность. АЦП12 Модуль включает в себя 12-разрядное ядро SAR, опорный генератор, буфер преобразования и управления объемом 16 слов. Буфер преобразования и управления позволяет получать и сохранять до 16 независимых выборок АЦП. АЦП12 обладает следующими возможностями:

- Максимальная скорость преобразования свыше 200 ksp/s.
- Монотонный 12-разрядный преобразователь без кодов ошибок.
- Выборка и хранение с программируемыми периодами выборки, определяемыми программным обеспечением или таймерами.
- Программно выбираемый интегрированный генератор опорного напряжения (1,5В или 2,5В).
- Программно выбираемый внутренний или внешний опорный источник.
- Восемь индивидуально конфигурируемых внешних входных каналов.
- Каналы преобразования для внутреннего температурного датчика, AVCC и внешних опорных источников.
- Независимые опорные источники, задаваемые путем выбора канала, для обоих положительных и отрицательных опорных источников.
- Выбираемый источник тактирования преобразований.
- Одноканальный, повторный одноканальный, последовательный и повторно-последовательный режимы преобразования.
- Ядро АЦП и опорное напряжение могут выключаться отдельно.
- Регистр вектора прерываний для быстрого декодирования 18 прерываний АЦП.
- 16-регистров хранения результата.

Блок-схема АЦП12 показана на рисунке 2.7

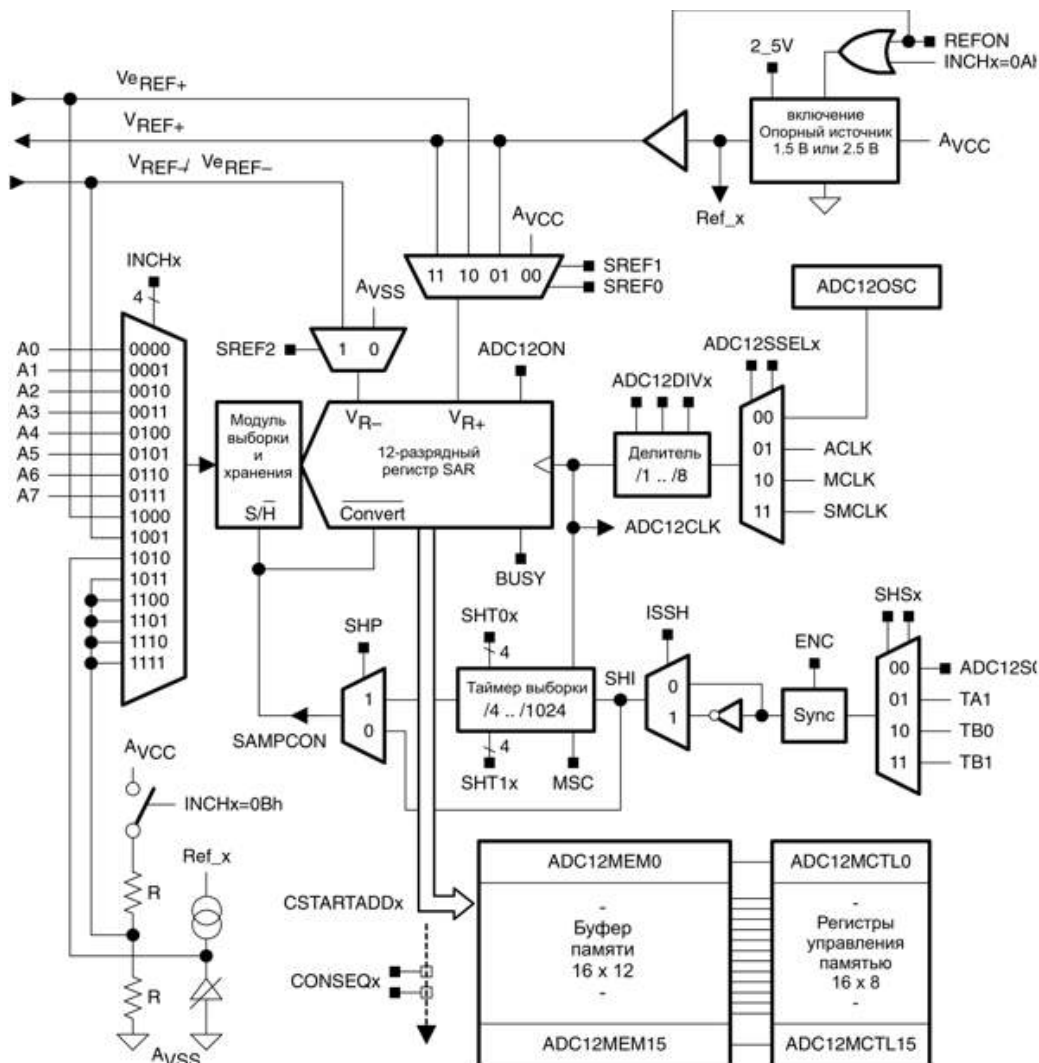


Рисунок 2.7 – Блок-схема АЦП12

12-разрядное ядро АЦП:

Ядро АЦП преобразует аналоговый входной сигнал в 12-разрядное цифровое представление и сохраняет результат в памяти преобразований. Ядро использует два программируемых/выбираемых уровня напряжения (V_{R+} и V_{R-}) для задания верхнего и нижнего пределов преобразования. На цифровом выходе (NADC) представлена полная шкала (0FFFh), когда входной сигнал равен или выше V_{R+} , и ноль, когда входной сигнал равен или ниже V_{R-} . Входной канал и опорные уровни напряжения (V_{R+} и V_{R-}) задаются в памяти управления преобразованиями. Формула преобразования для результата АЦП NADC выглядит следующим образом:

$$N_{\text{ADC}} = 4095 \times \frac{V_{\text{in}} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}} \quad (2.1)$$

Ядро АЦП12 настраивается двумя управляющими регистрами: ADC12CTL0 и ADC12CTL1. Ядро запускается битом ADC12ON. Если ADC12 не используется, для минимизации затрат энергии оно может быть выключено. ENC должен быть установлен в 1 перед выполнением любого преобразования.

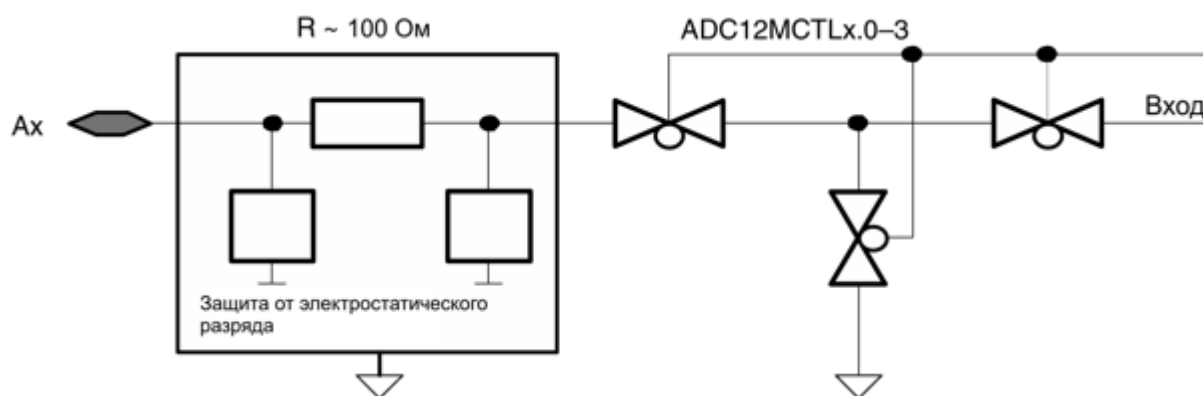


Рисунок 2.8– Аналоговый мультиплексор

Входы АЦП12 и мультиплексор:

Восемь внешних и четыре внутренних аналоговых сигнала выбираются как канал для преобразования аналоговым входным мультиплексором. Входной мультиплексор имеет тип break-before-make (разрыв перед включением), что уменьшает инжекцию шумов от канала к каналу, возникающую при переключении каналов. Входной мультиплексор также является Т-переключателем, минимизирующим взаимосвязь между каналами. Невыбранные каналы изолированы от АЦП, а промежуточный узел подключен к аналоговой земле (AVSS), для устранения перекрестных помех.

Выбор аналогового порта:

Входы АЦП12 мультиплексированы с ножками порта P6, имеющими цифровые КМОП ячейки. Когда аналоговые сигналы прикладываются к цифровым КМОП-схемам, может течь паразитный ток от VCC к GND. Этот паразитный ток появляется, если величина входного напряжения находится около переходного уровня ячейки. Отключение буфера ножки порта устраняет протекание

паразитного тока и вследствие этого уменьшает общий потребляемый ток. Биты P6SELx дают возможность отключать входные буферы ножки порта.

P6.0 и P6.1 конфигурируются как аналоговые входы.

BIS.B #3h, &P6SEL; P6.1 и P6.0 – функция АЦП12.

BIC.B #3h, &P6DIR; P6.1 и P6.0 переключены на ввод.

Генератор опорного напряжения:

Модуль АЦП12 содержит встроенный генератор опорного напряжения с двумя выбираемыми уровнями напряжения: 1,5 В и 2,5 В. Любое из этих опорных напряжений может быть использовано внутренне или внешне на выводе VREF+.

Установкой REFON=1 включается внутренний опорный источник. Когда REF2_5V=1, внутреннее опорное напряжение равно 2,5 В, при REF2_5V=0 опорное напряжение равно 1,5 В. Если генератор опорного напряжения не используется, он может быть выключен для уменьшения потребления энергии.

Для правильной работы внутреннего генератора опорного напряжения необходимо использовать емкость временного хранения энергии, подключенную между VREF+ и AVSS. Рекомендуется в качестве такой емкости использовать комбинацию из включенных параллельно конденсаторов на 10 мкФ и 0,1 мкФ. После включения в течение максимум 17 мС необходимо дать возможность генератору опорного напряжения зарядить конденсаторы хранения энергии. Если внутренний опорный генератор не используется при преобразованиях, конденсаторы не требуются

Внешние опорные источники могут быть задействованы для VR+ и VR– через выводы VeREF+ и VRED–/VeREF– соответственно.

Режимы преобразований АЦП12:

АЦП12 имеет четыре режима работы, выбираемые битами CONSEQx так, как описано в таблице 2.3

Таблица 2.3–Сводный перечень режимов преобразования

CONSEQx	Режим	Операция
00	Одноканальный с одиночным преобразованием	Выполняется одно преобразование в одном канале.
01	Последовательность каналов	Выполняются однократные преобразования последовательности каналов.
10	Повторяющийся одноканальный	Выполняется повторяющееся преобразование в одном канале.
11	Повторяющаяся последовательность каналов	Выполняются повторяющиеся преобразования последовательности каналов

Останов преобразований:

Прекращение активности АЦП12 зависит от режима работы. Рекомендуются следующие способы останова активного преобразования или последовательности преобразований:

Сброс ENC в одноканальном режиме одиночного преобразования немедленно останавливает преобразование, при этом результат оказывается непредсказуемым. Для получения правильного результата необходимо опрашивать бит занятости до сброса перед очисткой ENC.

Сброс ENC во время повторяющегося одноканального преобразования останавливает преобразователь в конце текущего преобразования.

Сброс ENC во время последовательного или повторно–последовательного режимов останавливает преобразователь в конце последовательности.

Любой режим преобразования может быть немедленно остановлен установкой CONSEQx=0 и сбросом бита ENC. Данные преобразования будут ненадежны[12].

2.3 Беспроводные технологии передачи измерительной информации

2.3.1 Сравнительный анализ технологий построения беспроводных сетей

На сегодняшний день широкое распространение получили следующие три семейства стандартов для построения беспроводных вычислительных сетей:

- IEEE 802.11 – WirelessLocalAreaNetwork (WLAN — беспроводные локальные вычислительные сети);
- IEEE 802.15 – WirelessPersonalAreaNetwork (WPAN — беспроводные персональные вычислительные сети);
- IEEE 802.16 – BroadbandWirelessAccess (BWA — беспроводной широкополосный доступ).

Беспроводная персональная вычислительная сеть WPAN представляет собой локальную сеть с малым радиусом действия, обычно не превышающим 15...20 м, и предназначена для замены кабельных соединений между персональными компьютерами, а также для связи с разнообразной периферией и мультимедиа устройствами (КПК, принтеры, факсы, сканеры, стереосистемы, и т.д.). Однако некоторые WPAN-сети способны работать на дальности до 100 м (ZigBee, Bluetooth). Первым стандартом, способным реализовать данные задачи, стал IEEE 802.15.1. Стандарт базируется на спецификации Bluetoothv1.x и определяет физический уровень (PHY layer) и уровень доступа к среде (MAC layer). Следующим шагом в расширении семейства 802.15 было создание стандарта, обеспечивающего взаимодействие устройств классов 802.11 и 802.15. Вскоре для устройств, работающих в зоне WPAN-сетей, оказалось недостаточно скоростей, обеспечиваемых Bluetooth. Возникла потребность в выработке стандарта, позволяющего создавать беспроводной канал данных с пропускной способностью в десятки и сотни Мбит/с (IEEE 802.15.3). Перечисленные выше стандарты отлично подходят для передачи больших объемов информации (голоса, данных, видео) с высокой скоростью (от 1 до 200 Мбит/с). Устройства на их основе способны работать в автономном режиме (от батарей и аккумуляторов) на

дальности передачи от 10 до 100 м. Эти стандарты позволяют заменить проводные соединения в устройствах, с которыми мы имеем дело каждый день (компьютеры, вычислительные сети). Однако существует множество незаметных на первый взгляд систем (разнообразные датчики, системы сбора информации и так далее). В таких специфичных приложениях невозможно со стопроцентной эффективностью использовать упомянутые технологии. Для реализации подобных задач был выработан стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) для низкоскоростных WPAN-сетей. Сравнительные характеристики стандартов семейства 802.15 и стандарта 802.11b приведены в таблице 2.4.

Исходя из приведенных характеристик, ближайшими конкурентами являются технологии Bluetooth и ZigBee. Соответственно, примерно схожи области их применимости — беспроводные устройства домашнего и промышленного назначения, включая системы дистанционного управления, компьютерной периферии и так далее.

Таблица 2.4 – Сравнение стандартов семейств 802.15 и 802.11b

Стандарт	802.15.4 Zigbee			802.15.1 Bluetooth	802.11b Wi-Fi
Приложения	Мониторинг, управление			Голос, данные	Данные, видео
Частота, ГГц	0.868	0.915	2.4		
Преимущества	Цена, энергосбережение, размеры			Цена, передача голоса	Скорость, гибкость
Максимальная скорость, Кбит·с ⁻¹	20	40	250	10 ³	11·10 ³ и более
Дальность, м	10–100, 1000			100	100
Чувствительность, дБм (сред).	-92			-70	-76
Размер стека, Кбайт	4-32			>250	>1000
Срок службы батареи, дней	100-1000			1-7	0,5-1

В отличие от технологии Bluetooth, ZigBee разработана для приложений, одним из ключевых требований которых является низкое энергопотребление.

Периоды активности устройств, выполненных по технологии ZigBee, могут быть крайне малы, что обеспечивает продолжительный срок службы батарей. Кроме того, микросхемы Wi-Fi и Bluetooth слишком дороги для организации на их основе крупных сетей разнообразных устройств в масштабах предприятий и офисных зданий, а стандарт 802.15.4/ZigBee позволяет разрабатывать беспроводные интерфейсы с минимальными затратами, что обеспечивается простотой схемотехники, минимальным количеством внешних пассивных элементов, программным обеспечением стека, использующим отведенный ему, объем памяти с высокой эффективностью (см. таблицу 2.4).

2.3.2 Архитектура стандарта IEEE 802.15.4

В 2001 г. Институту инженеров электротехники и электроники IEEE было предложено выработать стандарт, относящийся к семейству беспроводных персональных сетей WPAN и получивший обозначение 802.15.4. В 2002 г. был основан альянс ZigBee. Альянс разрабатывает глобальную спецификацию стека ZigBee для высоконадежных, рентабельных, энергоэкономичных беспроводных приложений, используя механизм передачи пакетов данных IEEE 802.15.4.

ZigBee/802.15.4 является единственной стандартизированной беспроводной технологией, изначально нацеленной на следующие приложения мониторинга и контроля, распределенные сети датчиков, на развертывание беспроводных информационных сетей для малопотребляющих систем, используемых в коммерческой, промышленной и домашней автоматике:

- Системы сигнализации и безопасности, аварийного оповещения, системы контроля доступа, бесконтактные ключи, датчики дыма, газа, движения, пламени, температуры, давления и т.д.
- Устройства медицинской диагностики пациента, мониторинг состояния спортсменов, биодатчики и медицинское оборудование.
- Удаленные управление и контроль технологических процессов, управление движущимися аппаратами, станками, промышленным оборудованием,

холодильными установками, устройствами дистанционного сбора данных, телеметрия.

- Мониторинг промышленных и портовых активов, логистика.
- Мониторинг систем водо-, газо- и теплоснабжения, системы управления и инструментального контроля электроэнергии, системы жилищно-коммунального хозяйства (далее – ЖКХ).
- Беспроводные устройства обмена информацией, радиомодемы, радиопередача.

Одним из основных преимуществ стандарта ZigBee/802.15.4 является простота установки и обслуживания подобных устройств. Особенности спецификации ZigBee позволяют с легкостью развертывать беспроводные персональные сети с многоячейковой топологией, обслуживая большое число узлов и увеличивая дальность связи без дополнительных затрат на усилители мощности [18].

Технология ZigBee не предназначена для передачи больших объемов информации, как Wi-Fi или Bluetooth. Однако, для передачи показаний датчиков, объем которых редко превышает десятки байт, не требуется высоких скоростей – в этом случае обязательны высокие показатели по энергопотреблению, цене и надежности. Большинство устройств ZigBee работает по следующему алгоритму: устройство находится в «спящем» состоянии практически все время, обеспечивая оптимальный режим энергосбережения. При поступлении новой информации либо во время очередного сеанса связи устройство активизируется, быстро передает данные и снова переходит в режим пониженного энергопотребления. Типовые временные задержки при этом составляют 30мс для подключения нового устройства к сети, 15мс для перехода из «спящего» в активное состояние, 15мс для доступа к каналу. Так удастся продлить срок службы батарей до 10 лет и более в зависимости от типа приложения и длительности рабочего цикла, причем ток при передаче может составлять порядка 15...30 мА, а в «спящем» режиме – менее 2 мкА. В результате, задержки по отклику настолько малы, что человек, войдя в комнату и щелкнув переключателем беспроводной связи ZigBee, даже не заметит,

что свет появился почти мгновенно, в то время как задержки при подключении устройств сети Bluetooth составляют порядка 3 с.

Стандарт IEEE 802.15.4 для беспроводных низкоскоростных персональных сетей (WPAN) определяет физический уровень PHY и уровень доступа к среде MAC. Уровень PHY обеспечивает доступ к физической среде распространения радиосигнала: задает тип модуляции, скорость и другие параметры сигнала, непосредственно осуществляет прием и передачу. Уровень MAC осуществляет добавление и вывод из сети устройств, контролирует доставку пакетов данных, обеспечивает автоматическое подтверждение приема (квитирования) данных, реализует механизмы доступа к каналу передачи, поддерживает 128-битное AES-шифрование и другие функции. Спецификация стека ZigBee определяет сетевой уровень, уровни безопасности и доступа к приложению и может использоваться совместно с решениями на базе стандарта 802.15.4 для обеспечения совместимости устройств. Ключевые функции PHY-уровня включают в себя контроль энергии и качества связи и анализ каналов. Доступ к среде осуществляется в частотных диапазонах ISM (Industrial, Scientific and Medical), физический уровень использует двоичную фазовую манипуляцию (BPSK) на частотах 868/915 МГц и квадратичную фазовую манипуляцию со смещением (O-QPSK) на частоте 2,4 ГГц. Для доступа к каналу используется механизм множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA). Данный механизм, основанный на определении состояния канала связи перед началом передачи, позволяет существенно сократить (но не устранить) столкновения, вызванные передачей данных одновременно несколькими устройствами. Стандарт 802.15.4 основывается на полудуплексной передаче данных (устройство может либо передавать, либо принимать данные), что позволяет использовать метод CSMA/CA только для предотвращения коллизий, а не для их обнаружения. Дальность распространения сигнала обычно составляет 30 – 50 метров, однако при использовании внешних усилителей мощности, малошумящих усилителей и согласованной антенны дальность может достигать 100 метров без существенных потерь в скорости. Пропускная способность напрямую зависит от выбранной

частоты (см. рисунок 1). Максимальная скорость передачи, равная 250 Кбит/с, достигается в диапазоне 2,4 ГГц (16 каналов с шагом 5 МГц). Для частот 868 МГц (1 канал) и 902 – 928 МГц (10 каналов с шагом 2 МГц) скорости передачи равны соответственно 20 Кбит/с и 40 Кбит/с.

Ожидается, что львиную долю рынка беспроводных устройств ZigBee/802.15.4 будут удерживать решения диапазона 2,4 ГГц. Это связано, прежде всего, с тем, что в Европе в диапазоне 868,3 МГц доступен лишь один канал, а диапазон 915 МГц разрешен только в США, Канаде, Корее и Австралии. В результате субгигагерцовые диапазоны являются потенциально непривлекательными для OEM-производителей, в то время как диапазон 2,4 ГГц разрешен для использования практически во всем мире, что является одним из важнейших критериев при определении характеристик будущих устройств. Однако, в дальнейшем в системах коммерческого назначения возможно появление шлюзов, связывающих ZigBee-устройства в различных частотных диапазонах стандарта 802.15.4.

Особенностью сетей IEEE 802.15.4-2006 является возможность реализации практически любой топологии, включая сотовую.

Стек протоколов ZigBee, изображенный на рисунке 2, построен по принципу иерархической семиуровневой модели протоколов передачи данных в открытых системах OSI (OpenSystemInterconnection). Стек включает в себя уровни стандарта IEEE 802.15.4, отвечающие за реализацию канала связи, и программные сетевые уровни, и уровни поддержки приложений, определенные спецификацией Альянса ZigBee.

Архитектура IEEE 802.15.4 определяет в свою очередь ряд уровней, призванных упростить стандарт. Каждый уровень ответственен за одну часть стандарта и предоставляет услуги вышерасположенному уровню.

Документ IEEE Std 802.15.4 определяет спецификации физического уровня PHY(Physicallayer) и подуровень доступа к сетевой среде MAC (MediumAccessControl) для низкоскоростной беспроводной среды с портативными переносными устройствами и максимальным расстоянием доступности POS

(PersonalOperatingSpace) равным 10 метрам. При этом предполагается, что при более низких скоростях передачи возможна работа и на больших расстояниях (<100 м).

Физический уровень PHY протокола предоставляет два вида услуг: информационный сервис PHY и сервис управления, обеспечивающий взаимодействие с сервисом PLME (PhysicalLayerManagementEntity) точки доступа SAP (известный под названием PLME-SAP). Информационный сервис PHY делает возможным передачу и прием через радиоканал протокольных блоков данных PPDU (ProtocolDataUnit).



Рисунок 2.9 – Конфигурация стека протокола ZigBee

Стандарт определяет следующие скорости передачи данных: 250 кбит/с, 100кбит/с, 40 кбит/с и 20 кбит/с. Прием и передача данных по радиоканалу осуществляется на физическом уровне PHY, определяющем рабочий частотный диапазон, тип модуляции, максимальную скорость, число каналов: O-QPSK – квадратичная фазовая манипуляция со смещением для диапазона 2,4 ГГц (16 каналов, 250 Кбит/с), BPSK – двоичная фазовая манипуляция для частот 915 МГц (10 каналов, 40 Кбит/с) и 868 МГц (1 канал, 20 Кбит/с). Уровень PHY

осуществляет активацию/деактивацию приемопередатчика, детектирование энергии принимаемого сигнала на рабочем канале, выбор физического частотного канала, индикацию качества связи при получении пакета данных и оценку свободного канала для реализации протокола CSMA-CA (протокол множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий). Важно понимать, что стандарт 802.15.4 – это физическое радио (микросхема радиоприемопередатчика), а ZigBee – это логическая сеть и программный стек, обеспечивающие функции безопасности и маршрутизации [16].

Радиооборудование работает на одном из нелицензируемых частотных диапазонах:

- 868–868.6 МГц (для Европы);
- 902–928 МГц (для Северной Америки);
- 2400–2483.5 МГц (для остального мира).

Подуровень MAC предоставляет два сервиса: информационный MAC-сервис и сервис управления MAC-уровня – обеспечение интерфейса для подуровня управления MLME (MAC Level Management Entity) для точек доступа (известных как MLME-SAP). Информационный сервис MAC обеспечивает прием и передачу протокольных блоков данных MAC-уровня (MPDU) с помощью информационного сервиса физического уровня.

Характерными особенностями подуровня MAC являются использование управления маяками (beacon), реализация доступа, управление GTS (Guaranteed Time Slot), проверка корректности кадров, подтверждение доставки кадров и т.д. Кроме того, подуровень MAC обеспечивает поддержку механизмов безопасности на прикладном уровне.

Характеристики MAC уровня: 64-битная IEEE адресация, 16-битная адресация внутри локальных сетей (теоретически максимальное количество устройств в сети 264, организация простых сетей при использовании 16-битной локальной адресации с более чем 65 тысяч устройств).

Способы адресации:

- идентификаторы: сетевой ID + ID устройства (топология «Звезда»);

- идентификатор Отправителя/ Получателя (передача между равноправными узлами);
- вхождение в сеть/выход из сети автоматическая/полуавтоматическая организация сети;
- формат пакетов сообщений сети ZigBee, максимальная полезная загрузка одного пакета данных составляет 104 байта данных, максимальная длина кадра равна 127 байт;
- уровни безопасности;
- свободный доступ к сети;
- список контроля доступа;
- таймеры определения задержек при передаче и актуальность пакетов данных;
- шифрование с использованием 128-битного симметричного ключа AES;
- механизм доступа в сеть, функции временного разделения и гарантированных временных интервалов, доступ к каналу посредством протокола CSMA-CA;
- поддержка сетевых топологий, включая соединения типа «точка – точка», «звезда», многоячейковой и кластерной топологий;
- оповещение о поступлении пакета данных, подтверждение приема (ACK), 16–битный контроль ошибок (CRC);
- поддержка трехклассов устройств;
- пакетный/поточковый режимы передачи [16].

2.3.3 Функциональные управляющие устройства сети ZigBee

В соответствии с технологией Zigbee сети беспроводной передачи включают в свой состав устройства нескольких классов – полнофункциональные– маршрутизаторы (FDD), устройства-координаторы (FFD) с дополнительными системными ресурсами в зависимости от сложности сети) и устройства с

ограниченной функциональностью (RDD). Полнофункциональные устройства обеспечивают расширенные возможности по построению топологии сети, могут играть роль координатора работы сети (главной станции радиосети) и могут обмениваться сообщениями с любой другой станцией сети. Устройства второго типа могут работать только в сети звездообразной формы, не могут выполнять функции координации работы сети обмена данными и имеют упрощенную конструкцию. Последнее свойство, изначально заложенное в идеологию технологии неравенство возможностей устройств, при их работе в единой сети и позволяет обеспечить их чрезвычайно низкое энергопотребление [17].

В каждой локальной сети ZigBee имеется только одно устройство – координатор. Основная задача координатора заключается в установке параметров и создании сети, выборе основного радиочастотного канала, в задании уникального сетевого идентификатора. При этом координатор является наиболее сложным из трех типов устройств, обладает наибольшим объемом памяти и повышенным энергопотреблением (питание от сети). Маршрутизаторы используются для расширения радиуса действия сети, поскольку способны выполнять функции ретрансляторов между устройствами, расположенными далеко друг от друга. Устройства поддерживают любую сетевую топологию ZigBee, могут выполнять функции координатора и обращаться ко всем узлам сети (FFD и RFD).

Устройства с ограниченным набором функций не участвуют в маршрутизации, не могут выполнять функции координатора, обращаются только к координатору локальной сети (FFD устройству), поддерживают соединения типа «точка – точка» и «звезда», играют роль конечных сетевых узлов. На практике большинство узлов сети являются RFD-устройствами, а применение FFD-устройств и координаторов необходимо для образования мостов связи и соответствующей сетевой топологии. Как только маршрутизаторы и другие устройства подключаются к сети, они получают информацию о ней от координатора или любого уже задействованного в сети маршрутизатора и на основе этой информации устанавливают свои операционные параметры в соответствии с характеристиками сети. Маршрутизатор ZigBee получает таблицу

сетевых адресов, которые он распределяет между подключившимися к сети конечными устройствами. Устройство FFD использует древовидную адресацию при принятии решений о маршрутизации. Для повышения эффективности маршрутизации, алгоритм ZigBee позволяет FFD-устройствам использовать сокращенную адресацию. Каждый маршрутизатор, на котором предполагается использовать сокращения, должен поддерживать таблицу, содержащую пары вида DN, где D – это адрес цели, а N – адрес следующего устройства на пути к этой цели. Сочетание маршрутизации по древовидному принципу и на основе таблицы обеспечивает гибкость работы и предоставляет разработчикам выбор оптимального соотношения цена / производительность [16].

Стек ZigBee поддерживает различные конфигурации сети (рисунок 2.10), в том числе следующие топологии: «точка – точка», «звезда», «кластерное дерево(иерархическое)» и «многоячейковая сеть». Сетевые функции стека включают в себя сканирование сети для обнаружения активных каналов, идентификацию устройств на активных каналах, создание сети на незадействованных каналах и объединение с существующей сетью в зоне персональной беспроводной сети, распознавание поддерживаемых сервисов согласно определенным профилям устройств, маршрутизацию. Это позволяет устройствам автоматически входить в сеть и выходить из нее, исключает нежелательные последствия «сбоя в одной точке» за счет наличия нескольких маршрутов к каждому узлу.

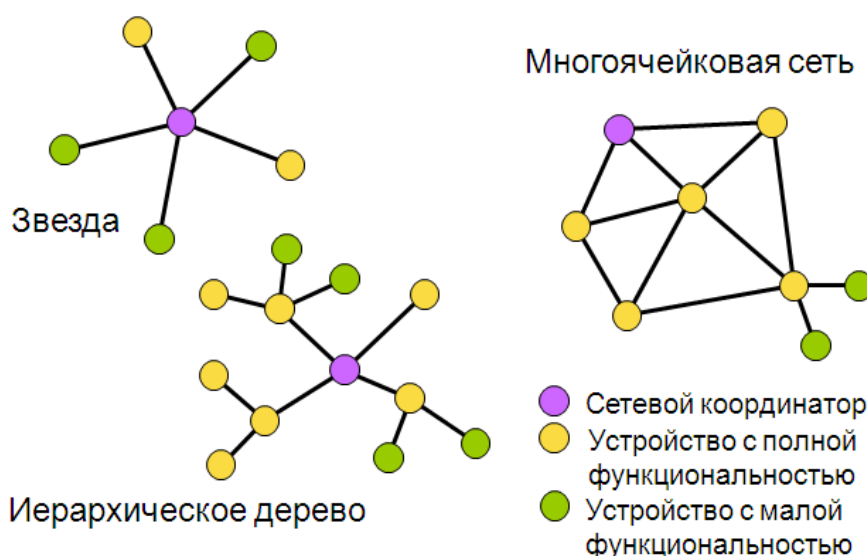


Рисунок 2.10 – Варианты топологии сети

В зависимости от типа, каждое устройство имеет определенные сетевые функции:

- координатор сканирует сеть и определяет свободные каналы для организации сети;
- маршрутизатор (FFD) сканирует сеть, находит активные каналы и пытается войти в состав существующей сети либо создает собственную персональную сеть на правах координатора, если нет активных каналов или не произошло объединение с активной сетью. Если произошло объединение, согласно правилам, уже существующей сети координатор примыкающей локальной сети переводится в ранг маршрутизатора и передает всю информацию о локальной сети координатору существующей сети. Из сигнального пакета синхронизации от координатора новообразованный маршрутизатор получает необходимую информацию о временных параметрах сети для обнаружения последующих сигнальных пакетов;
- оконечное RFD устройство всегда пытается войти в существующую сеть.

Топология «кластерное дерево» обеспечивает масштабируемость сети и расширение зоны покрытия, не требуя дополнительных затрат на инфраструктуру. Помимо топологий типа «звезда» и «кластерное дерево» технология ZigBee поддерживает многоячейковый принцип построения сетей. При такой топологии любой сетевой узел может выполнять также функции маршрутизатора для других устройств в сети. Если возникло препятствие на пути сигнала от одного узла к другому (бетонная или металлическая преграда и т.п.), выбирается альтернативный маршрут для передачи данных адресату. Более плотная концентрация сетевых узлов приводит к более защищенной, надежной системе. Если один из узлов вышел из строя, маршрут автоматически определяется через другие узлы сети, и в результате сеть становится самовосстанавливающейся. Однако в многоячейковой сети срок службы автономных источников питания уменьшается за счет применения метода синхронизованного доступа, увеличивается сложность

определения каналов передачи и происходит задержка (десятки миллисекунд) при каждой пересылке сообщения сетевым узлам.

Все узлы многоячейковой сети способны обнаруживать другие узлы и, распознав друг друга, вычислять оптимальный путь передачи пакетов, максимальную скорость обмена, частоту возникновения ошибок и время ожидания. Рассчитанные значения передаются соседним узлам, а оптимальный путь передачи трафика выбирается исходя из мощности принимаемых сигналов. Процессы обнаружения узлов и выбора пути идут постоянно, поэтому каждый узел поддерживает текущий список соседей и при изменении их расположения может быстро вычислить наилучший маршрут. Если какой-то узел изымается из сети (для технического обслуживания или вследствие сбоя), соседние узлы быстро изменяют конфигурацию своих таблиц и заново определяют маршруты потоков трафика. Это свойство самовосстановления и преодоления сбоев существенно отличает сети с ячеистой топологией от сетей с жесткой архитектурой [16].

Оптимизация энергопотребления является приоритетной задачей при построении ZigBee сетей. Одним из решений этой задачи является стратегия связи, основанная на передаче данных только при их поступлении и последующее ожидание подтверждения в случае успешного приема пакета со стороны адресата. При этом каждое устройство может инициировать передачу в любой момент. Очевидным недостатком данного метода является вероятность интерференции при одновременной передаче данных несколькими устройствами. Однако возможность наложения сводится к минимуму благодаря крайне малой длительности активного цикла устройства, случайности момента передачи и, как правило, небольшим объемам передаваемой информации.

Надежность соединения повышается за счет использования протокола CSMA-CA. Стратегия простого множественного доступа применима только к соединениям типа «точка – точка» или «звезда». Она подходит не всем приложениям. Для предотвращения нежелательного взаимодействия возможно использование протокола множественного доступа с временным разделением (TDMA). Технология ZigBee/802.15.4 гарантирует временные интервалы по

принципу, схожему с технологией TDMA, но использование данного разделения возможно только совместно с режимом синхронизации и временного разделения, что является более сложным и менее энергоэффективным алгоритмом по сравнению с обычным TDMA-доступом. Временное разделение ZigBee базируется на использовании режима синхронизации, при котором подчиненные сетевые устройства, большую часть времени находящиеся в «спящем» состоянии, периодически «просыпаются» для приема сигнала синхронизации от сетевого координатора, что позволяет устройствам внутри локальной сетевой ячейки знать, в какой момент времени осуществлять передачу данных. Координатор управляет обменом, выделяет каналы и осуществляет вызовы с интервалом от 15 мс до 252 с. Передача сигнальных пакетов определяет пропускную способность, обеспечивает малое время ожидания очереди доступа и выделение 16 временных интервалов одинаковой длительности, на каждом из которых исключены коллизии в сети.

Временной интервал доступа для каждого из узлов сети определяется либо координатором, либо посредством механизма CSMA-CA. Интервалы покоя необходимы для реализации энергосберегающих режимов сетевого координатора при работе от автономного источника питания. Недостаток – состояние ожидания сигнала синхронизации приводит к незначительному увеличению энергопотребления из-за наличия небольших временных расхождений, что вынуждает устройства «просыпаться» немного раньше, чтобы не пропустить сигнал. Функция синхронизированного доступа (рисунок 2.11) применяется в сетях с расширенной топологией, таких как «кластерное дерево» и «многоячейковая сеть»[18].



Рисунок 2.11 – Синхронизированный доступ в сеть ZigBee

2.3.4 Обзор и выбор приемопередатчика

MRF24J40MA является модулем приёмопередатчика 2.4ГГц IEEE 802.15.4. MRF24J40MA имеет встроенную PCB антенну, цепь согласования, а также поддерживает ZigBee, MiWi и MiWi P2P-протоколы. Модуль MRF24J40MA является лучшим решением для беспроводных сенсорных сетей передачи данных в промышленной автоматизации, автоматизации зданий и потребительских приложений. Модуль MRF24J40MA работает на частоте 2,4ГГц и соответствует стандартам FCC, IC и ETSI. Радиочастотный приёмопередатчик, соответствует стандартам IEEE 802.15.4™. Модуль крепится к несущей плате 12-контактным модульным соединителем, позволяющий радиочастотной плате использоваться как производственный модуль, для клиентских разработок с беспроводной связью[18].



Рисунок 2.12 – Модуль MRF24J40MA

В таблице 2.5 представлены 12 контактов соединения приёмопередатчика MRF24J40MA.

Таблица 2.5–12 контактов соединения приёмопередатчика MRF24J40MA

Контакты	Обозначение	Тип	Описание
1	GND	Power	Мощность
2	RESET	DI (цифровой вход)	Сброс
3	WAKE	DI (цифровой вход)	Триггер внешнего пробуждения
4	INT	DO (цифровой выход)	Прерывания микроконтроллера
5	SDI(MIO)	DI (цифровой вход)	Данные последовательного интерфейса
6	SCK	DI (цифровой вход)	Вход синхронизации последовательного интерфейса
7	SDO(MIO)	DO (цифровой выход)	Последовательный вывод данных интерфейса от MRF24J40
8	CS	DI (цифровой вход)	Включение последовательного интерфейса
9	NC	–	Никакого соединения (не соединяйте сигнал)
10	V _{in}	Power	Источник питания
11	GND	Ground	Заземление
12	GND	Ground	Заземление

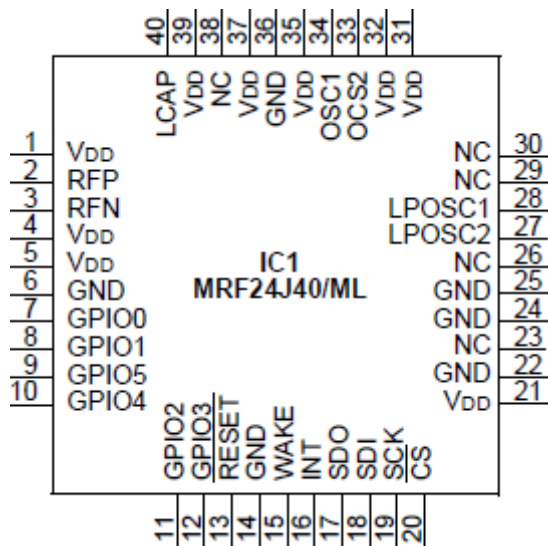


Рисунок 2.13 – Микрочип MRF24J40/ML

Технические характеристики микросхемы:

- Максимальная скорость передачи данных 250Кбит/с.
- Встроенный 20МГц и 32.768КГц привод генератора.
- Максимальная частота 2.483ГГц.
- Чувствительность дБм – 94дБм.
- Интерфейс модуля 4 вывода SPI (MISO, MOSI, SCK, CS).
- Ток питания 23мА.
- Диапазон рабочей температуры -40°C до +85°C.
- Диапазон напряжения питания 2.4 – 3.6В (рекомендуется 3.3В).
- Радиус действия до 122 м.

Вывод по главе два:

В данном разделе была разработана функциональная схема прибора для определения избыточного давления с возможностью контроля температуры.

Описан каждый блок функциональной схемы, его особенности, и принцип, на котором основана его работа.

В приборе будут использоваться микроконтроллер MSP430F148 и приемопередатчик ZigBee.

3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Резистивный делитель $R1$ выбираем путем расчёта, разделив входное напряжение микроконтроллера на выходной сигнал емкостной ячейки.

$$R = \frac{1.5}{0.02} = 75 \text{ Ом} \quad (3.1)$$

Резистивный делитель выберем С2-13-0.5Вт с классом точности 0,1%.

Операционный усилитель $DD1$ напряжения термопары выберем, разделив входное напряжение микроконтроллера на выходное значение термопары.

$$K = \frac{1.5}{0.02931} = 50 \quad (3.2)$$

Операционный усилитель выберем 140УД6Б.

$DD2$ (микроконтроллер MSP430F148). Представитель серии микроконтроллеров MSP430, характерными особенностями которых является сверхнизкое энергопотребление и 16-ти разрядная RISC архитектура. Основные технические особенности MSP430F148:

- Блокгенераторов.
- Сторожевой таймер.
- Два 16–ти битных таймера, со схемами захвата/сравнения.
- 6 портов ввода/вывода.
- Встроенное устройство выборки хранения (УВХ).
- Встроенные модули 12-разрядного или 10-разрядного АЦП последовательного приближения (SAR) скоростью 200 ksps с источником опорного напряжения 1,5В или 2,5В.

- Два последовательных интерфейса USART.

Во встроенные в микроконтроллер АЦП подаются аналоговые сигналы 1,5В через порты P6.0 и P6.1.

Тактовая частота микроконтроллера задается кварцевым резонатором BQ1 PГ175-8МГц BQ1, подключенный к входам XIN и XOUT.

Конденсаторы C20, C21 влияют на частоту резонатора, их рекомендовано выбрать емкостью 20пФ: K10-17A M47 20пФ, 10%.

Тактовая частота приемопередатчика задается кварцевым резонатором HC-49US-20МГц BQ2, подключенный к входам OSC1 и OSC2.

Конденсаторы C16, C17 влияют на частоту резонатора BQ2, их рекомендовано выбрать емкостью 18 пФ: K10-17A M47 18пФ, 10%.

Конденсаторы C1, C2 выберем емкостью 0,5 пФ: C0G/NP0 0,5пФ.

Конденсаторы C3, C8, C13, C14, C15 выберем емкостью 47 пФ: K10-17B 47пф M47, 5%.

Конденсаторы C4, C9, C18, C19 выберем емкостью 0,1 мкФ: K10-17A H50 0,1 мкФ.

Конденсаторы C6, C7 выберем емкостью 1 пФ: K10-17B 1пФ NPO,5%.

Конденсаторы C10 выберем емкостью 100 пФ: K10-17A M47 100 пФ, 5%.

Конденсаторы C11 выберем емкостью 1 мкФ: K73-17 1 мкФ, 5%.

Конденсаторы C12 выберем емкостью 0,01 мкФ: K10-17B 0,01 мкФ.

Интерфейс SPI:

Универсальный синхронно/асинхронный приемопередающий (USART) периферийный интерфейс поддерживает два последовательных режима в одном аппаратном модуле. Этот раздел описывает работу синхронного периферийного интерфейса или режима SPI [14].

В синхронном режиме USART подключает MSP430 к внешней системе через три или четыре вывода: SIMO, SOMI, UCLK и STE. Режим SPI выбирается, когда бит SYNC установлен, а бит I2C очищен.

Функционирование USART: режим SPI.

В синхронном режиме последовательные данные передаются и принимаются множеством устройств с использованием общего тактирования, обеспечиваемого ведущим. Дополнительный вывод STE, управляемый ведущим, необходим для разрешения приема и передачи данных.

Инициализация USART и сброс:

USART сбрасывается сигналом PUC или битом SWRST. После PUC бит SWRST автоматически устанавливается, оставляя USART в состоянии сброса. Когда он установлен, бит SWRST сбрасывает биты URXIE_x, UTXIE_x, URXIFG_x, OE, FE и устанавливает флаг UTXIFG_x. Бит USPIE_x не изменяется битом SWRST. Для работы USART необходимо очистить SWRST

Режим ведущего

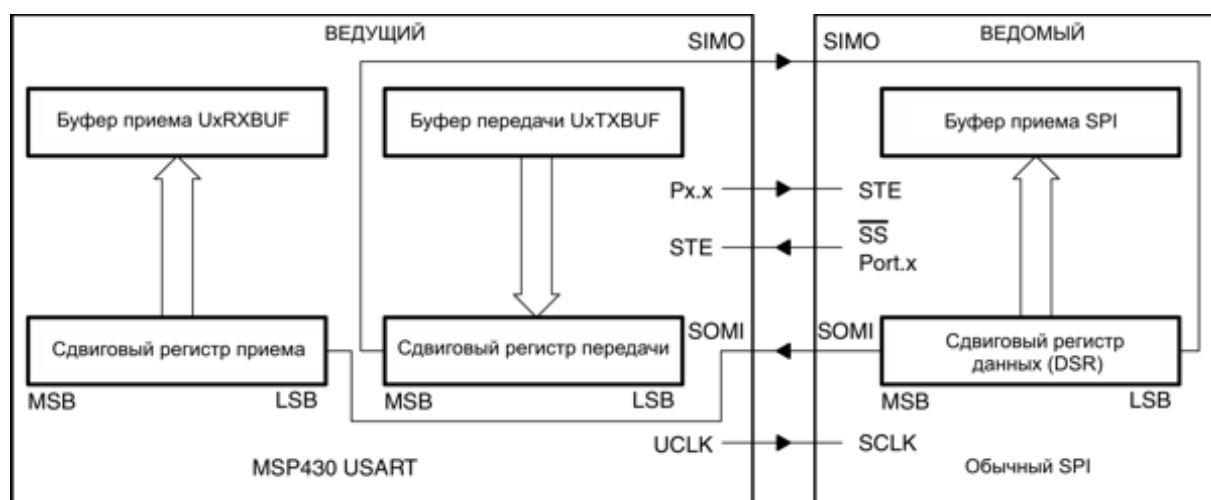


Рисунок 3.1 – USART – ведущий, внешнее устройство – ведомое

На рисунке 3.1 показан USART в качестве мастера в обеих 3-х и 4-х выводных конфигурациях. USART инициализирует передачу данных, когда данные перемещаются в буфер передачи данных UxTXBUF. Данные UxTXBUF перемещаются в сдвиговый регистр TX, когда сдвиговый регистр TX пуст, инициируя передачу данных на SIMO, начиная со старшего разряда. Данные на SOMI сдвигаются в сдвиговый регистр приема по противоположному тактовому фронту, начиная со старшего разряда. Когда символ принят, принятые данные перемещены из сдвигового регистра RX в буфер принятых данных UxRXBUF, флаг прерывания приема URXIFG_x установлен, указывая завершение операции RX/TX.

Установка флага прерывания передачи UTXIFG_x указывает, что данные перемещены из UxTXBUF в сдвиговый регистр TX и UxTXBUF готов для поступления новых данных. Это не указывает на завершение операции RX/TX.

Чтобы принимать данные в USART в режиме ведущего, данные должны быть записаны в UxTXBUF, поскольку операции приема и передачи выполняются одновременно.

На рисунке 3.2 показан USART в качестве ведомого в обеих 3-х и 4-х выводных конфигурациях.

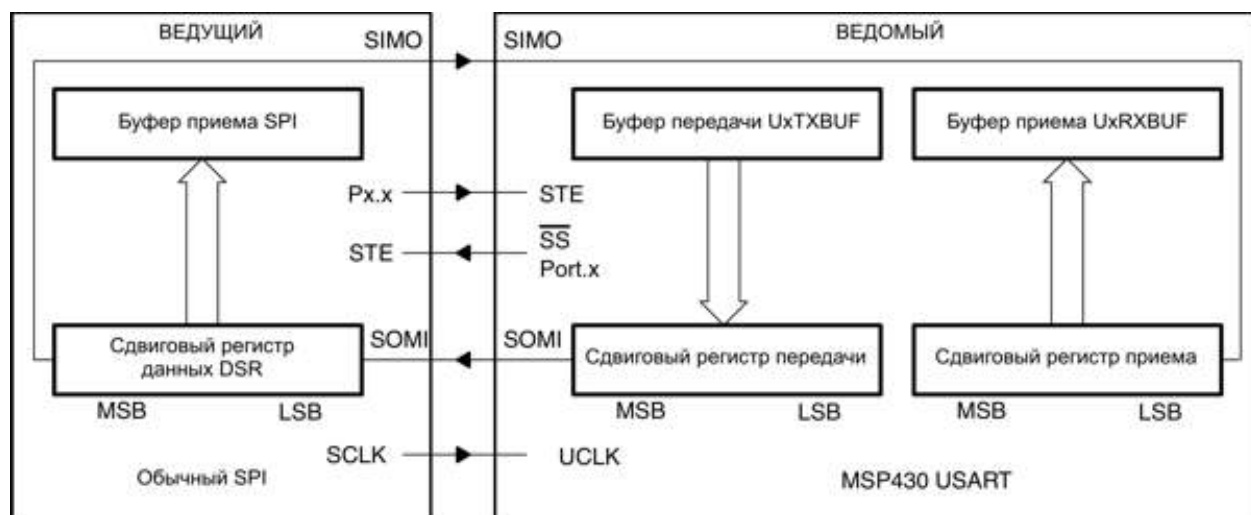


Рисунок 3.2 –USART – ведомый, внешнее устройство – ведущее

UCLK используется как вход для тактирования SPI и должен управляться внешним ведущим. Скорость передачи данных определяется этим тактовым сигналом и не зависит от внутреннего генератора скорости передачи. Данные записываются в UxTXBUF и перемещаются в сдвиговый регистр TX до старта передачи UCLK на SOMI. Данные на SIMO сдвигаются в сдвиговый регистр приема по противоположному фронту UCLK и перемещаются в UxRXBUF, когда принято заданное количество бит. Когда данные перемещаются из сдвигового регистра RX в UxRXBUF, устанавливается флаг прерывания URXIFGx, указывая, что данные были приняты. Бит ошибки переполнения OE устанавливается, когда предыдущие принятые данные не были прочитаны из UxRXBUF до перемещения новых данных в UxRXBUF.

4-х выводной режим ведомого SPI:

В 4-х выводном режиме ведущего STE используется ведомым для разрешения операций передачи и приема и управляется ведущим SPI. Когда STE

имеет низкий уровень, ведомый работает нормально. Когда у STE высокий уровень:

- Любая выполняющаяся операция приема на SIMO останавливается.
- SOMI устанавливается на направление ввода.
- Высокий уровень сигнала STE не сбрасывает модуль USART. Входной сигнал STE не используется в 3-х выводном режиме ведомого.

Включение SPI:

Бит включения USPIEx передачи/приема SPI включает или отключает USART в режиме SPI. Когда USPIEx=0, USART останавливает работу после завершения текущей передачи или немедленно, если действий не выполнялось. Сигнал PUC или установка бита SWRST отключают USART немедленно, при этом любая выполняющаяся передача прерывается.

Полярность и фаза последовательного тактирования

Полярность и фаза UCLK отдельно конфигурируются через управляющие биты CKPL и CKPH модуля USART. Синхронизация для каждого случая показана на рисунке 3.3

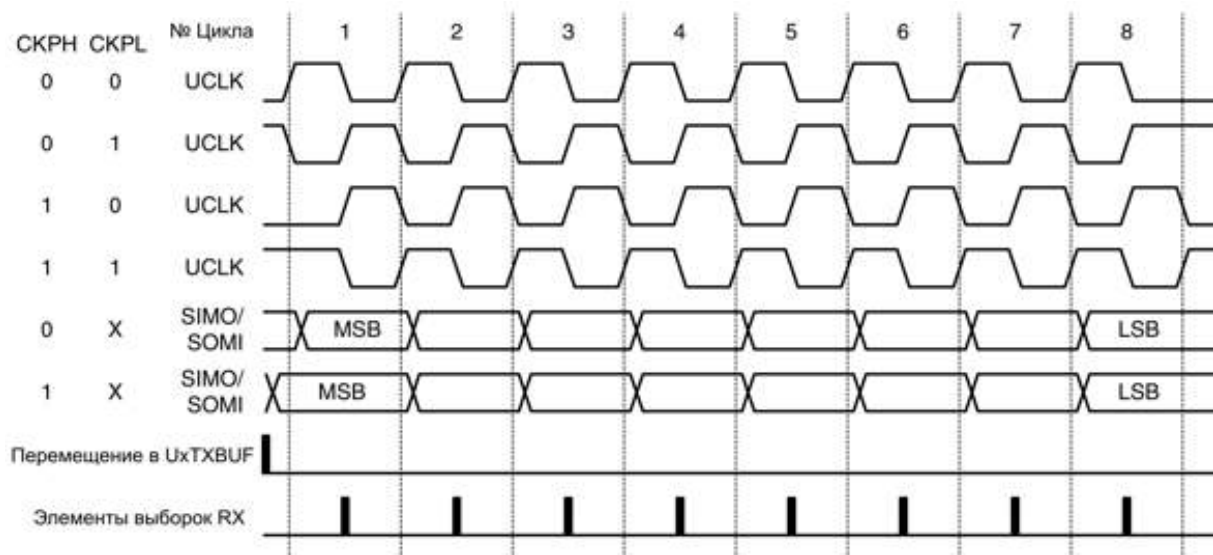


Рисунок 3.3 – Синхронизация USART SPI

Принципиальная электрическая схема цифрового датчика давления представлена в приложении А.

Вывод по главе три:

В данном разделе была разработана принципиальная электрическая схема ЦДД. Исходя из выбранных ПИП, вторичных измерительных преобразователей (далее – ВИП), микроконтроллера и приемопередатчика, были рассчитаны и выбраны остальные элементы принципиальной электрической схемы.

4 РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ЦИФРОВОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

4.1 Расчет погрешностей

Для нормальных условий эксплуатации информационно–измерительных систем (далее – ИИС) в настоящей методике представлены формулы расчета:

систематической составляющей Δ_c погрешности измерительного канала (ИК);

$$\Delta_c = M|\Delta_c| + k \cdot \delta|\Delta_c| \quad (4.1)$$

случайной составляющей $\overset{\circ}{\Delta}$ погрешности ИК;

$$\overset{\circ}{\Delta} = \gamma \cdot \delta(\overset{\circ}{\Delta}) \quad (4.2)$$

погрешности Δ ИК.

$$\Delta = |\Delta_c| + \gamma \cdot \delta|\overset{\circ}{\Delta}| \quad (4.3)$$

В качестве исходных данных в настоящей методике используются нормированные в соответствии с ГОСТ 8.009–84 метрологические характеристики (далее – МХ) компонентов, составляющих ИК.

В формулах расчета МХ ИК в статическом режиме в нормальных условиях эксплуатации использованы следующие МХ компонентов, составляющих ИК:

- характеристики систематической составляющей Δ_c погрешности:

$M[\Delta_{ci}]$ — математическое ожидание систематической составляющей погрешности компонента в виде линейной функции входного сигнала;

$\sigma[\Delta_{ci}]$ — среднее квадратическое отклонение (далее – СКО) систематической составляющей погрешности компонентов данного типа в виде функции входного сигнала;

характеристика случайной составляющей $\overset{\circ}{\Delta}$ погрешности:

$\sigma_{дi}(\overset{\circ}{\Delta})$ — предел допускаемого значения среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности компонентов данного типа.

В расчетных формулах, полученных с учетом взаимного влияния каналов в многоканальных компонентах, входящих в состав ИИС, использованы следующие МХ этих компонентов ИИС:

$M(\Delta_{c1}), M(\Delta_{c2}), \dots$ – набор математических ожиданий систематических составляющих погрешности для каждого ИК каждого многоканального компонента, входящего в ИИС;

$\sigma(\Delta_{c1}), \sigma(\Delta_{c2}), \dots$ —набор средних квадратических отклонений, систематических составляющих погрешности для каждого ИК каждого многоканального компонента, входящего в ИИС в качестве исходных данных в настоящей методике используются нормированные в соответствии с ГОСТ 8.009–84 МХ компонентов, составляющих ИК.

$\Delta_{дi}$ — предел допускаемого значения погрешности компонентов данного типа, входящих в ИК.

Под пределом допускаемой погрешности измерительного преобразователя понимается наибольшее значение величины $[|\Delta_c| + \gamma(\overset{\circ}{\Delta})]$ в диапазоне изменения входного сигнала.

Дополнительная (температурная) погрешность определяется основной погрешностью и значением температуры окружающей среды в процессе эксперимента, в котором используется измерительный прибор. Дополнительная погрешность может превосходить основную, но также легко может быть оценена. Например, дополнительная погрешность, вызванная выходом температуры за пределы нормальных значений (типично $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ или, что характерно для многих приборов зарубежных фирм, $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), обычно численно оценивается для аналоговых приборов как «основная на каждые десять градусов отличия от нормальной температуры», а для цифровых – как «половина основной на каждые десять градусов отличия от нормальной температуры» [19].

Для расчета полной погрешности разберем какие погрешности действуют на составные части измерительного канала.



Рисунок 4.1 – Измерительный канал датчика давления

Рассчитаем функции преобразования на каждом элементе.

Для давления:

$$A1 = \frac{0,02}{413,7} = 4,834 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{бар}^{-1}$$

$$A3 = \frac{1,5}{0,02} = 75 \text{ Ом}$$

$$A5 = \frac{413,7}{1,5} = 276 \text{ бар} \cdot \text{В}^{-1}$$

Для температуры:

$$A2 = \frac{0,02931}{375} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{°C}^{-1}$$

$$A4 = \frac{1,5}{0,02931} = 50$$

$$A5 = \frac{70}{1,5} = 47 \text{ В}^{-1} \cdot \text{°C}$$

Математическое ожидание $M|\Delta_c|$ на всех участках канала равно нулю.

В предположении равномерного распределения систематической составляющей погрешности, рассчитаем СКО данной составляющей погрешности на каждом элементе:

Элемент 1 (Ёмкостной сенсор)

$$\pm\gamma = 0,1\% \text{ – класс точности}$$

$$\pm\Delta_{\text{опр}1} = \frac{0,1 \cdot 0,02}{100} = 0,00002 \text{ A}$$

$$\sigma|\Delta_{c1}| = \frac{\pm\Delta_{\text{опр}1}}{\sqrt{3}} = \frac{0,00002\text{A}}{\sqrt{3}} = 1,1547 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

Элемент 2 (Термопара)

$$\pm\gamma = 1\% \text{ – класс точности}$$

$$\pm\Delta_{\text{опр}2} = \frac{1 \cdot 0,02931}{100} = 0,0002931 \text{ В}$$

$$\sigma|\Delta_{c2}| = \frac{\pm\Delta_{\text{опр}1}}{\sqrt{3}} = \frac{0,0002931}{\sqrt{3}} = 0,00017 \text{ В}$$

Элемент 3 (Резистивный делитель)

$$\pm\gamma = 0,1\% \text{ – класс точности}$$

$$\pm\Delta_{\text{опр}1} = \frac{0,1 \cdot 1,5}{100} = 0,0015 \text{ В}$$

$$\sigma|\Delta_{c3}| = \frac{\pm\Delta_{\text{опр}3}}{\sqrt{3}} = \frac{0,0015}{\sqrt{3}} = 0,0009 \text{ В}$$

Элемент 4 (Операционный усилитель)

$$\pm\Delta_{\text{опр}4} = 8\text{мВ} = 0,008\text{В}$$

Предполагая равномерный вид закона распределения, найдем дисперсию систематической составляющей погрешности:

$$D_1 = \frac{(0,008 + 0,008)^2}{12} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ В}$$

$$\sigma|\Delta_{c4}| = \sqrt{D_1} = 0,0023\text{В}$$

Элемент 5 (АЦП)

$$1LSB = \frac{1.5}{2^{12}}$$

$$\sigma|\Delta_{c5}| = \frac{1LSB}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma|\Delta_{c5}| = \frac{1.5}{\sqrt{3} \cdot 2^{12}} = 2,11 \cdot 10^{-4} \text{ В}$$

Рассчитаем СКО случайной составляющей погрешности на каждом элементе.

На 1, 2 – х и 3 элементах $\sigma(\dot{\Delta})$ будет равно нулю.

Элемент 5 (АЦП):

АЦП SAR имеет 12 – разрядное ядро с частотой входного сигнала (давления) $F_{(p)} = 50\text{Hz}$, (температуры) $F_{(t)} = 5\text{Hz}$ и быстродействием $a = 5 \cdot 10^{-6}\text{c}$.

Приведённое значение дисперсии результирующей погрешности АЦП с равномерной шкалой квантования для случайного сигнала с нормальным распределением спектра с $M|\Delta_c| = 0$

$$\sigma(\dot{\Delta}) = \frac{1}{12 \cdot 2^n} + \frac{\sigma_x^2 \cdot T_{\text{пр}}^2}{9} \quad (4.4)$$

Время преобразования

$$T_{\text{пр}} = a \cdot n \quad (4.5)$$

Дисперсия производной процесса

$$\sigma_x^2 = |R_x(\tau)|_{t=0} \quad (4.6)$$

Вторая производная функции $R_x(\tau)$

$$a = (\sqrt{1 + \sqrt{2}}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{\text{max}} \quad (4.7)$$

По формулам (4.4), (4.5) и (4.6) находим приведённую полную погрешность для случайного сигнала.

Для давления:

$$\sigma(\dot{\Delta})^2 = \frac{1}{12 \cdot 2^n} + \frac{(\sqrt{1 + \sqrt{2}}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{\max(p)} \cdot (a \cdot n)^2}{9}$$

$$\sigma(\dot{\Delta}_p)^2 = \frac{1}{12 \cdot 2^{12}} + \frac{(\sqrt{1 + \sqrt{2}}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (5 \cdot 10^{-6} \cdot 12)^2}{9}$$

$$\sigma(\dot{\Delta}_p)^2 = 2,044 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2$$

$$\sigma(\dot{\Delta}_p) = 0,0045 \text{ с}$$

Для температуры:

$$\sigma(\dot{\Delta}_t)^2 = \frac{1}{12 \cdot 2^{12}} + \frac{(\sqrt{1 + \sqrt{2}}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot (5 \cdot 10^{-6} \cdot 12)^2}{9}$$

$$\sigma(\dot{\Delta}_t)^2 = 2,035 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2$$

$$\sigma(\dot{\Delta}_t) = 0,0045 \text{ с}$$

Значения СКО случайной и систематической составляющей погрешности, и функции преобразования (емкостного сенсора) для каждого элемента представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1–СКО случайной и систематической составляющей погрешности, и функции преобразования.

$M \Delta_c $	0	0	0
$\sigma \Delta_c $	$1,1547 \cdot 10^{-5} \text{ А}$	0,0009В	$2,11 \cdot 10^{-4} \text{ В}$
$\sigma(\dot{\Delta})$	0	0	0,0045
A_i	$4,834 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{бар}^{-1}$	75 Ом	276 бар $\cdot \text{В}^{-1}$
Элементы	1(Емкостной сенсор)	3(Резистивные делители)	5(АЦП)

Значения СКО случайной и систематической составляющей погрешности, и функции преобразования (термопары) для каждого элемента представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 –СКО случайной и систематической составляющей погрешности, и функции преобразования.

$M \Delta_c $	0	0	0
$\sigma \Delta_c $	0,00017 В	0,0023В	$2,11 \cdot 10^{-4}$ В
$\sigma(\dot{\Delta})$	0	0	0,0045
A_i	$7,8 \cdot 10^{-5}$ В · °С ⁻¹	50	$47^\circ\text{С} \cdot \text{В}^{-1}$
Элементы	2(Термопара)	4(Операционный усилитель)	5(АЦП)

Рассчитаем полную погрешность для измерительного канала от емкостного сенсора до АЦП по формуле (4.1)

$$\Delta_c = M|\Delta_c| + k \cdot \delta|\Delta_c| \text{—полная систематическая погрешность}$$

$$M|\Delta_c| = 0$$

$k = 1,96$ – нормальная функция распределения

$$\delta|\Delta_c| = \sqrt{\sigma^2(\Delta_{c1}) \cdot (A_3 \cdot A_5)^2 + \sigma^2(\Delta_{c3}) \cdot (A_5)^2 + \sigma^2(\Delta_{c5})} =$$

$$\sqrt{(1,1547 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (75 \cdot 276)^2 + (0,0009)^2 \cdot 276^2 + (2,11 \cdot 10^{-4})^2} = 0,344724$$

$$\Delta_c = 0 + 1,96 \cdot 0,344724 = 0,6757 \text{бар}$$

$$\delta|\dot{\Delta}| = \sqrt{\sigma^2(\dot{\Delta}_1) \cdot (A_3 \cdot A_5)^2 + \sigma^2(\dot{\Delta}_3) \cdot (A_5)^2 + \sigma^2(\dot{\Delta}_5)} =$$

$$\sqrt{(0)^2 \cdot (75 \cdot 276)^2 + (0)^2 \cdot 276^2 + (0,0045)^2} = 0,0045 \text{бар}$$

Полная предельная погрешность измерительного канала для давления

$$\Delta = |\Delta_c| + \gamma \cdot \delta|\dot{\Delta}| = 0,6757 + 1,96 \cdot 0,0045 = \pm 0,69 \text{ бар}$$

Рассчитаем полную погрешность для измерительного канала от термопары до АЦП по формуле (4.1)

$$\Delta_c = M|\Delta_c| + k \cdot \delta|\Delta_c| \text{—полная систематическая погрешность}$$

$$M|\Delta_c| = 0$$

$k = 1,96$ – нормальная функция распределения

$$\delta|\Delta_c| = \sqrt{\sigma^2(\Delta_{c2}) \cdot (A_4 \cdot A_5)^2 + \sigma^2(\Delta_{c4}) \cdot (A_5)^2 + \sigma^2(\Delta_{c5})} = \\ \sqrt{(0,00017)^2 \cdot (50 \cdot 47)^2 + (0,0023)^2 \cdot 47^2 + (2,11 \cdot 10^{-4})^2} = 0,41^\circ\text{C}$$

$$\Delta_c = 0 + 1,96 \cdot 0,41 = 0,81^\circ\text{C}$$

$$\delta|\dot{\Delta}| = \sqrt{\sigma^2(\dot{\Delta}_2) \cdot (A_3 \cdot A_4)^2 + \sigma^2(\dot{\Delta}_3) \cdot (A_4)^2 + \sigma^2(\dot{\Delta}_4)} = \\ \sqrt{(0)^2 \cdot (50 \cdot 47)^2 + (0)^2 \cdot 47^2 + (0,0045)^2} = 0,0045^\circ\text{C}$$

Полная предельная погрешность измерительного канала для температуры

$$\Delta = |\Delta_c| + \gamma \cdot \delta|\dot{\Delta}| = 0,81 + 1,96 \cdot 0,0045 = \pm 0,82^\circ\text{C}$$

Предельная дополнительная погрешность (температурная) рассчитывается по формуле:

$$\Delta_d = \pm 0,5 \cdot \Delta_{\text{оср1}} \cdot \frac{(T_{\text{max}} - T_{\text{норм}})}{10^\circ\text{C}} \quad (4.8)$$

Элемент 1 (Ёмкостной сенсор)

$\pm \gamma = 0,1\%$ – класс точности

$$\pm \Delta_{\text{оср1}} = \frac{0,1 \cdot 0,02}{100} = 0,00002 \text{ A}$$

$$(T_{\text{max}} - T_{\text{норм}}) = 70 - 20 = 50^\circ\text{C},$$

где T_{max} максимальная температура эксплуатации ЦДД.

$$\Delta_d = \pm 0,5 \cdot 0,00002 \cdot 5 = 0,00005^\circ\text{C}$$

4.2 Разработка методики выполнения измерений

Цифровой прибор измерения избыточного давления с первичным сенсором емкостной ячейкой и термопарой хромель-копель (далее –ТХК).

1) Область применения:

Настоящая методика выполнения измерений (далее – МВИ) предназначена для использования при организации и осуществлении измерений избыточного давления и температуры в промышленных трубопроводах.

2) Требования к точности измерений:

- Полная погрешность измерительного канала для давления $\pm 0,69$ бар;
- Полная погрешность измерительного канала для температуры $\pm 0,82$ °С.

3) Средства измерений, вспомогательные устройства, материалы, растворы:

Цифровой прибор измерения избыточного давления с первичным сенсором – емкостной ячейкой и возможностью контроля температуры.

4) Метод измерения:

Давление и температуру горючей жидкости определяют прямым однократным методом измерений. Полученное при измерении значение принимают за результат однократного измерения \tilde{A} . Составляющие погрешности результата измерения должны быть известны до проведения измерения, к ним относятся:

- Погрешности СИ, рассчитываемые по их МХ;
- Погрешность используемого метода измерений, определяемая на основе анализа в каждом конкретном случае;
- Погрешность, вносимая оператором (личная).

Полагают, что распределение случайных погрешностей не противоречит нормальному закону распределения, а не исключенные систематические погрешности, заданы своими границами — равномерно.

5) Условия проведения измерений и характеристики измеряемой среды:

При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

- Температура горючей жидкости $-40 \dots +70$ °С.
- Давление горючей жидкости $0 \dots 413,7$ бар.

6) Подготовка измерений

Подготовка к выполнению измерений заключается в осуществлении комплекса мероприятий по вводу измерительной системы в эксплуатацию, основными из которых являются:

- Проведение поверки СИ.
- Проведение внешнего осмотра датчика давления и наличия полной комплектации.
- Проверка правильности монтажа в соответствии с проектной документацией.
- Проведение наладочных работ.
- Введение системы измерений в эксплуатацию.

Перед включением датчика убедитесь в правильности установки и монтажа. Через 0,5 мин после включения электрического питания проверьте и, при необходимости, проведите корректировку значения выходного сигнала, соответствующее нижнему пределу измерений. Эта корректировка должна производиться после подачи и сброса измеряемого параметра, составляющего 80 – 100% верхнего предела измерений. Контроль значений выходного сигнала проводится согласно методическим указаниям по поверке МП 4212-012. При заполнении измерительных камер датчика разности давлений необходимо следить за тем, чтобы в камерах датчика не осталось пробок газа (при измерении разности давлений жидких сред). Заполнение камер датчика жидкостью осуществляется после установки его в рабочее положение.

Подача жидкости производится под небольшим давлением (желательно самотеком) одновременно в обе камеры при открытых дренажных клапанах. После того, как жидкость начинает вытекать через дренажные клапаны, их следует закрыть. Для продувки камер датчика и слива конденсата во фланцах сенсора имеются дренажные клапаны, ввернутые в пробки.

7) Выполнение измерений:

Приводим датчик в рабочее состояние, измеряемый трубопровод подключаем к источнику измеряемой среды, плавно повышаем давление в трубопроводе во избежание перегрузок, проверяем герметичность соединений всех

узлов. Датчик производит измерение и передает данные по беспроводной сенсорной сети на удаленный персональный компьютер, где данные обрабатываются и считываются оператором.

8) Обработка результатов измерений:

За результат однократного измерения принимать значение величины, полученное при измерении. Составляющие погрешности результата измерения считать известными до проведения измерения. Предполагать, что известные систематические погрешности исключены.

Считать, что распределение случайных погрешностей не противоречит нормальному распределению, а не исключенные систематические погрешности, представленные заданными границами $\pm\Theta$, распределены равномерно.

Неопределенность результата измерений учитывать, как неполное знание значения измеряемой величины, и для количественного выражения этой неполноты ввести распределение вероятностей возможных значений измеряемой величины – параметр, который количественно характеризует точность результата измерений. Полагая, что распределение вероятностей возможных значений измеряемой величины не противоречит нормальному распределению.

При определении доверительных границ погрешности или расширенной неопределенности для уровня доверия P результата измерения принимать вероятность, равную 0,95.

При вычислениях следует пользоваться правилами округления в соответствии с МИ 1317.

Составляющими погрешности результата однократного измерения являются погрешности СИ, метода, оператора, а также погрешности, обусловленные изменением условий измерения.

Характеристикой неисключенной систематической погрешности могут быть:

- Границы $\pm\Theta$;
- Доверительные границы $\pm\Theta(P)$.

Характеристикой случайных погрешностей могут быть:

- Среднеквадратическое отклонение S ;
- Доверительные границы $\pm e(P)$

Погрешность результата однократного измерения представлена неисключенными систематическими погрешностями и случайными погрешностями.

Погрешность СИ определять на основании их МХ, которые должны быть указаны в нормативных и технических документах, и в соответствии с РД50-453-84 «Методические указания. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета».

Погрешности метода и оператора определены при разработке и аттестации конкретной МВИ.

Оценивание неисключенной систематической погрешности и стандартной неопределенности, оцениваемой по типу В, результата измерения.

Не исключённая систематическая погрешность (далее – НСП) результата измерения выражают границами этой погрешности, если среди составляющих погрешности результата измерения в наличии одна НСП.

При указанном выше условии стандартную неопределенность u_B , обусловленную неисключенной систематической погрешностью, заданной своими границами $\pm \Theta$, оценивают по формуле:

$$u_B = \frac{\theta}{\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

Доверительные границы НСП результата измерения вычисляют следующим образом.

а) При наличии нескольких НСП, заданных своими границами $\pm \Theta_j$, доверительную границу НСП результата измерения $\Theta(P)$ (без учета знака) вычисляют по формуле

$$\theta(P) = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \theta_j^2}, \quad (4.10)$$

где k – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом m составляющих Θ_j .

При доверительной вероятности $0,95$ поправочный коэффициент принимают равным $1,1$.

При доверительной вероятности $0,99$ поправочный коэффициент принимают $1,45$, если число суммируемых составляющих $t > 4$.

Если же число составляющих равно четырем ($t = 4$), то поправочный коэффициент $k \approx 1,4$; при $t = 3$; $k \approx 1,3$; при $t = 2$; $k \approx 1,2$. Более точное значение для доверительной вероятности $P = 0,99$ при числе составляющих $t \leq 4$ в зависимости от соотношения составляющих определяют по графику $[k = f(m, t)]$ в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207.

При условии, указанном в (а), суммарную стандартную неопределенность, оцениваемую по типу В, $u_{c,B}$ вычисляют по формуле

$$u_{c,B} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{\theta_j^2}{3}} \quad (4.11)$$

б) При наличии нескольких НСП, заданных доверительными границами $\Theta_j(P_i)$, рассчитанными по формуле (4.10), доверительную границу НСП результата однократного измерения вычисляют по формуле

$$\theta(P) = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{\theta_j^2(P_i)}{k_i^2}} \quad (4.12)$$

При условии, указанном выше, суммарную стандартную неопределенность, оцениваемую по типу В, вычисляют по формуле

$$u_{c,B} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{\theta_j^2(P_i)}{k_i^2 \cdot 3}}, \quad (4.13)$$

где $\Theta_j(P_i)$ – доверительная граница j -й НСП, соответствующая доверительной вероятности P_i ;

k_i – коэффициенты, соответствующие доверительным вероятностям P_i .

Значения коэффициентов k_i определяют в соответствии с требованиями (а).

Форма представления результатов однократных измерений должна соответствовать МИ 1317-2004 «Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров».

При симметричной доверительной погрешности результат однократного измерения представлять в форме $\tilde{A}; \pm\Delta(P)$; R или $\tilde{A}; \pm\Delta(P)$, или $\tilde{A}; U(P)$ [20].

9) Контроль точности результатов измерений:

Для проведения контроля точности результатов измерений необходимо воспользоваться более точным датчиком давления с предельной погрешностью $\pm 0,23$ бар; $\pm 0,27$ °С.

Перечень допустимых при калибровке средств измерения:

- Для калибровки давления – преобразователь давления (MBS 5100) с предельной погрешностью $\pm 0,20$ бар;
- Для калибровки температуры – преобразователь температуры (ТХАУ ИП 0104/М) с предельной погрешностью $\pm 0,25$ °С.

4.3 Разработка методики поверки

1) Операции поверки:

При проведении поверки выполняют следующие операции:

- Внешний осмотр;
- Опробование;
- Определение основной погрешности преобразователя;
- Определение вариации выходного сигнала преобразователя.

2) Средства поверки:

Для поверки приборов должны применяться следующие измерительные приборы и устройства:

- Преобразователь давления (MBS 5100) с предельной погрешностью $\pm 0,20$ бар и верхним пределом измерений до 500 бар;

- Преобразователь температуры (ТХАУ ИП 0104/М) с предельной погрешностью $\pm 0,25$ °С и верхним пределом измерений до 200 °С.

3) Требования к квалификации поверителя и других исполнителей:

При использовании настоящих методических указаний для разработки отдельного документа согласно ГОСТ 8.375–80 или раздела Технического описания и инструкции по эксплуатации (паспорта), регламентирующих методику поверки ЦИУ, работу должен выполнять специалист, имеющий достаточную подготовку в области метрологии и испытаний электронных измерительных устройств.

При использовании настоящих методических указаний непосредственно для поверки ЦИУ конкретного типа работу целесообразно выполнять в два этапа, на каждом из которых требуются исполнители различной квалификации (возможно выполнение работы одним исполнителем при его достаточной квалификации).

Проведение поверки осуществляет поверитель электроизмерительных или радиоизмерительных приборов.

4) Требования безопасности:

При проведении поверки должны быть соблюдены общие требования безопасности по работе с датчиком давления (ГОСТ 22520–85), а также требования по безопасности, изложенные в эксплуатационных документах поверяемого и эталонных СИ.

5) Условия поверки и подготовка к ней:

При проведении поверки должны быть соблюдены следующие условия:

- температура окружающего воздуха 20 ± 5 °С;
- относительная влажность окружающего воздуха от 30 до 80 %;
- давление в помещении, где проводят поверку (далее атмосферное давление) от 0,84 до 1,07 бар;
- вибрация, тряска, удары, наклоны и магнитные поля, кроме земного, влияющие на работу преобразователя, должны отсутствовать;

- рабочая среда для преобразователей с верхними пределами до 413,7 бар включительно – воздух или нейтральный газ.

б) Проведение поверки:

6.1 Внешний осмотр

При внешнем осмотре должно быть установлено соответствие датчиков давления следующим требованиям:

- датчик должен иметь паспорт или документ, его заменяющий; при периодической поверке допускается вместо паспорта представлять документ с указанием предела измерений, предельных значений выходного сигнала, требуемого предела допускаемой основной погрешности и номера, присвоенного предприятием — изготовителем. Справка должна быть подписана метрологической службой предприятия, эксплуатирующего датчик давления;

- на датчике давления должна быть табличка с маркировкой, соответствующей паспорту или документу, его заменяющему;

- должна быть обеспечена возможность снятия крышки, закрывающей клеммы контроля и колодку внешних соединений;

- должна быть обеспечена возможность регулировки нуля (по всем цифровым выходным устройствам);

- резьбы на присоединительных элементах (переходных устройствах) не должны иметь сорванных ниток.

6.2 Опробование:

6.2.1 При опробовании проверяют работоспособность датчика давления, функционирование корректора нуля (по всем выходным устройствам), герметичность датчика давления.

6.2.2 Работоспособность датчика давления проверяют, изменяя измеряемое давление от нижнего предельного значения до верхнего. При этом должно наблюдаться изменение выходной величины на всех выходных устройствах.

6.2.3 Функционирование корректора нуля проверяют, задав одно (любое) значение измеряемого давления. Воздействуя на корректор нуля, проверяют наличие изменения выходной величины на всех выходных устройствах. Возвращая

корректор нуля в прежнее положение (если это допускает конструкция датчика) проверяют наличие изменения выходного сигнала в противоположную сторону на всех выходных устройствах [21].

6.2.4 Проверку герметичности датчика давления рекомендуется совмещать с операцией определения основной погрешности (п.6.4).

Методика проверки герметичности датчика давления имеет следующие особенности:

- изменение давления или разрежения определяют по изменению выходного сигнала или показаний поверяемого датчика давления, включенного в систему;
- в случае обнаружения не герметичности системы с поверяемым датчиком давления следует проверить отдельно систему и датчик.

6.3 Проверка идентификационных данных ПО

6.3.1 В качестве идентификатора программного обеспечения (далее – ПО) принимается версия (идентификационный номер) программного обеспечения. Методика заключается в проверке номера ПО датчика по протоколу ZigBee.

6.3.2 Датчики считаются прошедшими поверку с положительным результатом, если идентификатор ПО соответствует значению, указанному выше.

6.3.3 Если данные требования не выполняются, то датчик считается непригодным к применению, к эксплуатации не допускается, выписывается свидетельство о непригодности, дальнейшие пункты методики не выполняются.

6.4 Определение основной погрешности:

6.4.1 Основную погрешность определяют, устанавливая по эталонному прибору на входе датчика давления измеряемое давление, равное номинальному. По эталонному миллиамперметру (или вольтметру) измеряют значения соответствующего выходного сигнала: тока от 4 до 20 мА (или напряжения для всех моделей с выходным сигналом в виде напряжения).

6.4.2 Подключение эталонов осуществляют в соответствии с эксплуатационной документацией на эти приборы.

6.4.3 Перед определением основной погрешности должны быть соблюдены требования п.4. и, в случае необходимости, откорректировано значение выходного сигнала, соответствующее нижнему предельному значению измеряемого параметра.

6.4.4 Основную погрешность определяют при пяти значениях измеряемой величины, достаточно равномерно распределённых в диапазоне измерений, в том числе при значениях измеряемой величины, соответствующих нижнему и верхнему предельным значениям выходного сигнала. Интервал между значениями измеряемой величины не должен превышать 30% диапазона измерений.

Основную погрешность определяют при значении измеряемой величины, полученной при приближении к нему как от меньших значений к большим, так и от больших к меньшим (при прямом и обратном ходе).

Перед поверкой при обратном ходе датчик выдерживают в течение 1 минуты под воздействием верхнего предельного значения измеряемого параметра, соответствующего предельному значению выходного сигнала.

Допускается выдержку датчиков давления–разрежения производить только на верхнем пределе измерений избыточного давления.

При периодической поверке основную погрешность определяют в два цикла: до корректировки диапазона изменения выходного сигнала (калибровки) и после корректировки диапазона. Допускается второй цикл не проводить, если экспериментально определённая в первом цикле основная погрешность не превышает допускаемого предела.

При поверке датчиков разности давлений камера низкого давления соединяется с атмосферой, а эталонное давление подаётся в камеру высокого давления.

При поверке датчиков давления с верхним пределом измерений разрежения 1 бар, в случае, если атмосферное давление равно или менее 1бар, максимальное разрежение допускается устанавливать равным $0,90-0,95 P_0$, где P_0 – атмосферное давление.

Допускается определение основной погрешности датчиков абсолютного давления с верхними пределами измерений от 0 до 413,7 бар с использованием эталонного СИ разрежения и давления (например, MBS 5100).

В этом случае датчик поверяют на точках: при разрежении в пределах 0,90–0,95 P_6 при значениях избыточного давления $P_{\text{изб.мах}}$, определяемом по формуле (4.14), и при трёх промежуточных значениях давления.

$$P_{\text{изб.мах}} = P_{\text{абс.мах}} - A, \quad (4.14)$$

где $P_{\text{изб}}$ – верхний предел измерений абсолютного давления, бар.

$$A = 1 \text{ бар.}$$

Перед поверкой корректором нуля устанавливают выходной сигнал на расчётное значение, соответствующее разрежению в пределах 0,90–0,95 P_5 . Расчётное значение выходного сигнала при этом пропорционально изменяется

6.4.5 Определение основной погрешности датчика абсолютного давления с верхними пределами измерений свыше 413,7 бар следует проводить с использованием образцовых СИ избыточного давления и барометра.

6.4.6 Основную погрешность уд в % нормирующего значения вычисляют по формулам:

$$\gamma_d = \frac{I - I_p}{I_{\text{мах}} - I_0} \cdot 100, \quad (4.15)$$

$$\gamma_U = \frac{U - U_p}{U_{\text{мах}} - U_0} \cdot 100, \quad (4.16)$$

$$\gamma_P = \frac{P - P_p}{P_{\text{мах}} - P_0} \cdot 100, \quad (4.17)$$

где I — экспериментально полученное значение выходного сигнала на выходе датчика при измерении тока, мА.

U — экспериментально полученное значение выходного сигнала на выходе датчика при измерении напряжения, МВ; В.

P — экспериментально полученное значение выходного сигнала на показывающих устройствах датчика;

I_p , U_p — соответственно, расчётные значения тока (мА) и напряжения (В);

P_p — расчётное давление показывающего устройства датчика давления, численно равное номинальному значению входного давления, бар;

Датчик давления признают годным, если во всех проверяемых точках модуль основной погрешности не превышает максимально допустимого значения основной погрешности для конкретной модели датчика.

$$|\gamma_d| \leq |\gamma_{\text{осн}}| \quad (4.18)$$

Датчик давления признают негодным, если хотя бы в одной точке модуль основной погрешности превышает допустимое значение.

$$|\gamma_d| > |\gamma_{\text{осн}}| \quad (4.19)$$

6.5 Определение вариации:

6.5.1 Вариацию выходного сигнала определяют при каждом проверяемом значении измеряемого параметра, кроме значений, соответствующих нижнему и верхнему пределам измерений, по показаниям, полученным при определении основной погрешности.

6.5.2 Вариацию выходного сигнала γ_Γ , в % нормирующего значения вычисляют по формулам:

$$\gamma_\Gamma = \left| \frac{I^* - I}{I_{\text{max}} - I_0} \right| \cdot 100 ; \quad (4.20)$$

$$\gamma_\Gamma = \left| \frac{U^* - U}{U_{\text{max}} - U_0} \right| \cdot 100 ; \quad (4.21)$$

$$\gamma_\Gamma = \left| \frac{P_d^* - P_d}{P_{\text{max}} - P_0} \right| \cdot 100 , \quad (4.22)$$

где I и I^* — действительные значения выходного сигнала на одной и той же точке при измерении на выходе тока, соответственно, при прямом и обратном ходе, мА;

U и U^* — действительные значения выходного сигнала на одной и той же точке при измерении на выходе напряжения, соответственно при прямом и обратном ходе, мВ, В;

P и P_d^* — действительные значения измеряемого параметра на одной и той же точке соответственно при прямом и обратном ходе, бар.

Значения γ_T , полученные по вышеприведённым формулам, не должны превышать предела её допустимого значения.

6.5.3 Вариацию выходного сигнала датчика давления не определяют, если предел её допустимого значения менее 0,5 предела допустимой основной погрешности.

6.5.4 Допускается вместо определения действительного значения вариации осуществлять контроль соответствия её предельно допустимым значениям.

7) Оформление результатов поверки:

Положительные результаты первичной поверки датчиков давления оформляются записью в паспорте (раздел «Свидетельство о приёмке»), заверенной поверителем и удостоверенной оттиском клейма.

Положительные результаты периодической поверки датчиков давления оформляют выдачей свидетельства о поверке.

Положительные результаты периодической ведомственной поверки оформляют в порядке, установленном ведомственной метрологической службой.

При отрицательных результатах поверки датчики давления бракуют. При периодической государственной поверке выдают извещение о непригодности.

8) Достоверность методики выполнения поверки:

Установление допустимой погрешности поверки, а также выбор эталонного средства измерения по точности осуществляется по параметрам методики поверки цифрового фазового преобразователя угла.

В качестве исходных данных для установления значений параметров методик поверки используем критерии достоверности поверки.

Основными критериями достоверности поверки:

- Наибольшая вероятность ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра средств измерения $P_{\text{бам}}$.
- Отношение наибольшего возможного модуля контролируемой характеристики погрешности средств измерения, которое может быть ошибочно признано годным к пределу ее допустимых значений $\{(\delta_M)_{\text{ба}}\}$.

Допустимые значения:

$$\{(\delta_M)_{ba}\}_p = 1,20$$

$$\{P_{bam}\}_p = 0,40$$

На основании указанных критериев достоверности поверки определим отношение предела допускаемого значения погрешности поверки к пределу допускаемого значения основной погрешности средств измерения $-a_p$, и допускаемую погрешность поверки Δ_{op} .

Предельные значения a_p выбираем из ряда: 1/10; 1/5; 1/4; 1/3; 1/2,5; 1/2.

В частном случае a_p является отношением погрешностей эталонного и поверяемого средства измерения.

При поверке необходимо установить соотношение a_p , которое обеспечивает неравенство:

$$P_{bam} \leq \{P_{bam}\}_p \text{ и } \{(\delta_M)_{ba}\} \leq \{(\delta_M)_{ba}\}_p \quad (4.23)$$

Это возможно лишь при условии сравнения полученного при поверке значения погрешности не с пределом допускаемого значения погрешности средств измерения Δ_{op} , а с контрольным допуском $\Delta_{o\gamma}$, который определяется по (10)

$$|\Delta_{o\gamma}| = \gamma |\Delta_{op}|, \quad (4.24)$$

где γ – абсолютное значение отношения границ поля контрольного допуска к модулю допускаемого значения характеристики.

Значение γ устанавливается на основании критериев достоверности поверки и выбранного значения a_p .

Для заданных значений $\{(\delta_M)_{ba}\}_p = 1.20$ и $\{P_{bam}\}_p = 0.40$ по таблице 4.3, согласно МИ 188–86 [f], проведем границу области.

Таблица 4.3 – Значения γ и $(\delta_M)_{\text{вa}}$

a_p	Значения γ и $(\delta_M)_{\text{вa}}$ при $P_{\text{вaм}}$, равном										
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
1/10	0,90	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00
	1,00	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10
1/5	0,80	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00
	1,00	1,08	1,11	1,13	1,14	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20
1/4	0,75	0,85	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
	1,00	1,10	1,13	1,16	1,18	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25
1/3	0,67	0,80	0,85	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	0,99	1,00
	1,00	1,13	1,18	1,21	1,24	1,26	1,27	1,29	1,31	1,32	1,33
1/2,5	0,60	0,76	0,82	0,86	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	1,00
	1,00	1,16	1,22	1,26	1,29	1,31	1,33	1,35	1,37	1,38	1,40
1/2	0,50	0,70	0,77	0,82	0,86	0,89	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
	1,00	1,20	1,27	1,32	1,36	1,39	1,42	1,44	1,46	1,48	1,50

Полученную границу перенесем в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Значение γ и $(P_{\text{гр}})_{\text{mg}}$

a_p	Значения γ и $(\delta_M)_{\text{вa}}$ при $P_{\text{вaм}}$, равном										
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
1/10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1/5	0,028	0,005	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1/4	0,067	0,016	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
1/3	0,140	0,047	0,027	0,018	0,012	0,009	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002
1/2,5	0,207	0,079	0,047	0,032	0,023	0,019	0,015	0,012	0,009	0,007	0,006
1/2	0,305	0,133	0,087	0,062	0,045	0,035	0,027	0,023	0,019	0,016	0,013

Двигаясь по границе области, установим значения γ , a_p , $(P_{\text{гр}})_{\text{mg}}$ (таблица 4.5), при которых выполняется требование.

Таблица 4.5 – Значения γ , a_p , $(P_{gr})_{mg}$

a_p	1/10	1/5	1/4	1/3	1/2,5	1/2
γ	1	1	0,95	0,85	0,76	0,7
$(P_{gr})_{mg}$	0	0	0,002	0,027	0,079	0,133

Для поверки цифрового преобразователя угла рекомендовано использовать значение минимум $a_p = 1/3$, отсюда полученного ряда следует:

- Средняя вероятность ошибочного признания дефектным годного цифрового фазового преобразователя угла составляет 2,7% (т.к $(P_{gr})_{mg} = 0,027$)
- Контрольный допуск составляет 0,85 допускаемой погрешности поверяемого цифрового фазового преобразователя угла, т.е $\Delta_{oy} = 0,85\Delta_{op}$ [22].

Вывод по главе четыре:

В данном разделе была рассчитана предельная полная погрешность измерительных каналов ЦДД и дополнительная температурная погрешность, разработаны методика выполнения измерения и методика поверки ЦДД.

5 АЛГОРИТМ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

Блок-схема микроконтроллера изображена на рисунке 5.1

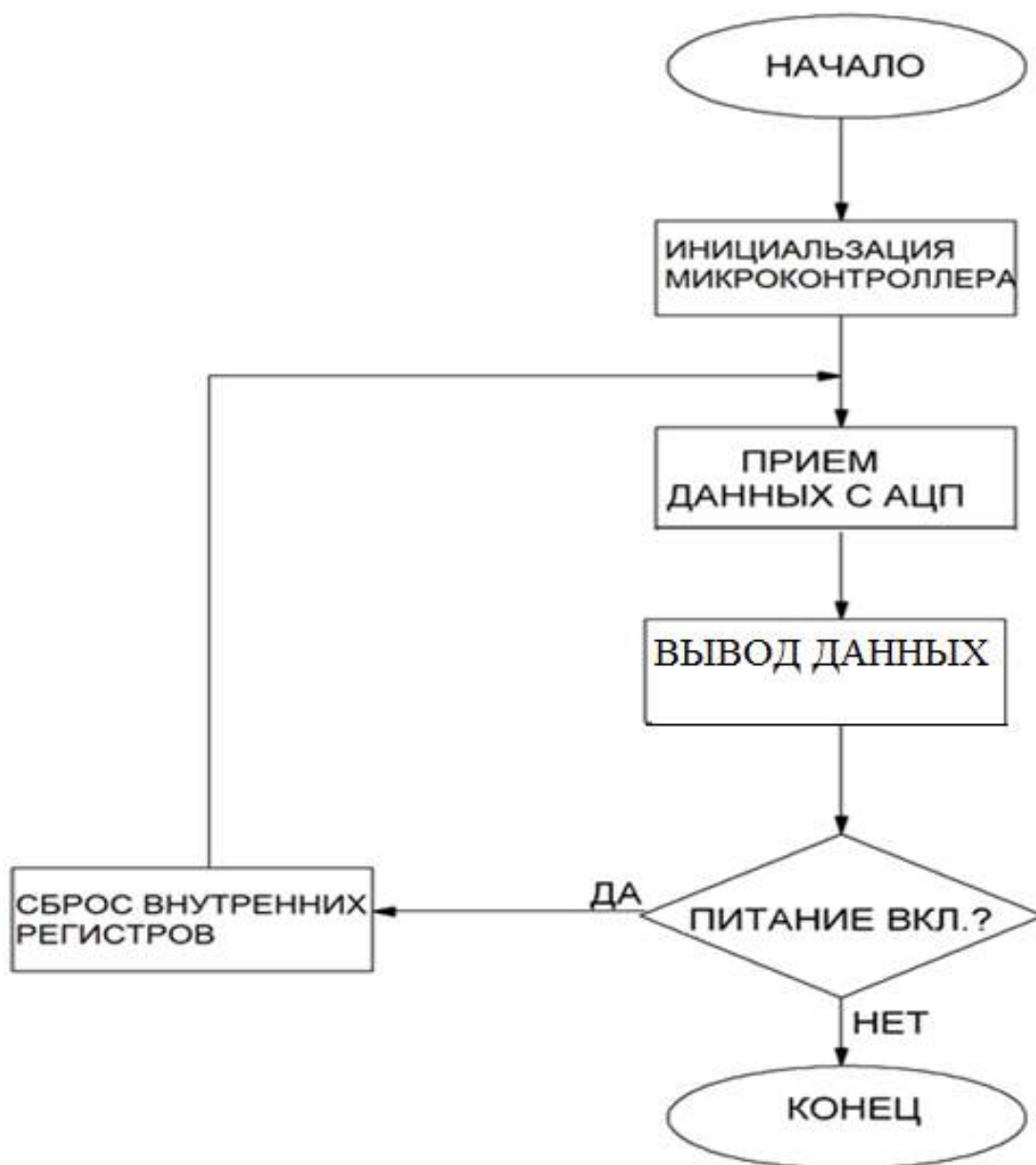


Рисунок 5.1 – Блок-схема микроконтроллера

Описание работы блок–схемы

Блок “Инициализация микроконтроллера”: конфигурация внутренней системы, настройка портов ввода–вывода. Вывод RST/NMI конфигурируется как вывод сброса.

Блок “Прием сигнала”: осуществляется по методу “самых последних данных”. В этом методе реализации интерфейса АЦП работает непрерывно. В конце каждого цикла преобразования он обновляет данные в выходном буферном регистре (обратного магазинного типа) и затем автоматически начинает новый цикл преобразования. Микропроцессор просто считывает содержимое этого буфера, когда ему нужны самые последние данные [23].

Блок “Вывод данных”: устройства MSP430F148 имеет 6 портов цифровых входов/выходов P1–P6. Каждый порт имеет 8 выводов входа/выхода. Каждый вывод индивидуально конфигурируется как вход или выход и каждая линия ввода/вывода может быть индивидуально считана или записана.

Регистры вывода PnOUT

Каждый бит в каждом регистре PnOUT содержит значение, которое будет выведено на соответствующую ножку ввода/вывода, сконфигурированную на функцию ввода/вывода и имеющую направление на вывод.

Бит = 0: Выходной сигнал имеет низкий уровень;

Бит = 1: Выходной сигнал имеет высокий уровень.

Если питание ещё включено, то ЦПУ будет находиться в состоянии сброса до тех пор, пока на этом выводе (RST/NMI) присутствует сигнал низкого уровня лог.«0». После смены уровня на этом входе на лог.«1», ЦПУ начинает выполнять программу с команды, адрес которой хранится в векторе сброса (0FFFЕh).

Вывод по главе пять:

В данном разделе был описан алгоритм работы микроконтроллера при измерениях.

6 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА

6.1 Расчёт себестоимости. Определение оптовой цены

Расчет себестоимости устройства можно осуществить с помощью расчетно-аналитического метода. Его сущность сводится к тому, что прямые затраты на единицу продукции определяются путем нормативного расчета себестоимости проектируемого устройства по статьям калькуляции. По существующей классификации затрат принят следующий состав статей калькуляции:

- Сырье и материалы.
- Возвратные отходы.
- Покупные комплектующие изделия.
- Основная заработная плата производственных рабочих.
- Дополнительная заработная плата производственных рабочих.
- Отчисления на социальные нужды с заработной платы производственных рабочих.
- Расходы на подготовку и освоение производства.
- Износ инструментов и приспособлений целевого назначения и социальные расходы.
- Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования.
- Цеховые расходы.
- Общезаводские расходы.
- Прочие производственные расходы.

6.1.1 Сырье и материалы

Эта статья включает в себя затраты на основные материалы, расходуемые в нашем случае на изготовление печатного узла.

Таблица расхода материалов в расчете на печатную плату:

Таблица 6.1 – Расход материалов

Наименование материалов	Ед. Изм.	Норма расх. на 1 изд.	Цена на ед. измер.	Стоимость материалов, руб.
Стеклотекстол ит	Кг	0,12	62	7,44
Припой	Кг	0,015	153	2,3
Флюс	Кг	0,003	51	5
Лак	Кг	0,018	23	0,5
Спирт	Кг	0,02	32	0,64
Хлористое железо	Кг	0,03	10	0,3

Итого: 16руб. 18 коп.

В калькуляцию включается стоимость материалов с учетом транспортно–заготовительных расходов. Получаем: $16,18 \times 0,03 = 4,85$ рубля.

Итого: $16,18 + 4,85 = 21,03$ рублей.

6.1.2 Возвратные отходы

Считаем, что они составляют 1% от стоимости материалов:

$$21,03 \times 0,01 = 0,21 \text{ рублей.}$$

6.1.3 Покупные комплектующие изделия, полуфабрикаты и услуги кооперирующихся предприятий

Эта статья включает в себя затраты на приобретенные готовые изделия и полуфабрикаты.

Составим таблицу для расчета стоимости покупных комплектующих изделий:

Таблица 6.2 – Стоимость комплектующих

Наименование, тип элемента	Кол-во шт.	Цена За 1 шт. руб.
Емкостная ячейка	1	290
Термопара (ТХК)	1	350
C2–13–0,5Вт	1	15
140УД6Б	1	241
MSP430F148	1	373
ZigBee	1	695
Итого	6	1961

Транспортно–заготовочные расходы составляют 5% от общей стоимости комплектующих изделий:

$$1961 \times 0,05 = 98,05 \text{ рублей.}$$

$$\text{Итого: } 1961 + 98,05 = 2059,05 \text{ руб.}$$

6.1.4 Основная заработная плата производственных рабочих

Эта статья включает в себя основную заработную плату как производственных рабочих и других категорий работников за работу, непосредственно связанную с изготовлением продукции.

Основная заработная плата определяется прямым путем по формуле:

$$Z_o = Z_t + Z_n \quad (6.1)$$

где Z_t – заработная плата по тарифу

Z_n – доплаты по сдельно и повременно–премиальным системам (20%).

$$Z_t = \sum_{i=1}^n t_i C_{1i} K_{npi} \quad (6.2)$$

где t_i – трудоёмкость 1–ой операции (виды работ);

C_{1i} – тарифная ставка первого разряда;

K_{npi} – тарифный коэффициент, соответствующий разряду работ по 1–ой операции;

n – количество видов работ (операций).

Тарифная ставка для первого разряда:

$$C_{1i} = 50,4 \text{ руб/час.}$$

Тарифный коэффициент для третьего разряда:

$$K_{npi} = 1,33.$$

Тарифный коэффициент для четвертого разряда:

$$K_{npi} = 1,5 .$$

Таблица 6.3 –Заработной платы производственным рабочим

Наименование деталей (узлов)	Кол –во деталей	Наименование операций	Разряд работы	Норма времени		Часовая тарифная ставка руб/час	З/П руб.
				Деталь/час	Изделие/час		
Печатная плата	1	Сверление отверстий	4	0,2	0,8	75,6	60,48
		Травление	3	0,1	0,2	67,03	13,406
		Металлизация и трассировка	4	0,3	0,6	75,6	45,36
		Покрытие лаком	3	0,5	1	67,03	67,03
		Сборка	3	0,2	0,8	67,03	53,624
Установочный набор ЭРЭ	1	Монтаж	3	0,5	1	67,03	1,512
		Электр.проверка	4	0,01	0,02	75,6	67,03
Печатный узел	1	Проверка	4	–	0,05	75,6	3,8
Изделие	1	Регулировка	4	–	0,5	75,6	37,8
		Контроль ОТК	4	–	0,8	75,6	60,48

Итого: 411 руб.

6.1.5 Дополнительная заработная плата

$$З_д = 0,2 \times 411 = 82,20 \text{ руб.}$$

В дополнительную заработную плату производственных рабочих входят выплаты за очередные и дополнительные отпуска, перерывы в работе кормящих матерей и т.д.

6.1.6 Отчисленные на социальные нужды

Отчисления на социальное страхование принимаются в размер 30% от суммы основной и дополнительной заработной платы рабочих:

$$З_{oc} = 0,3 \times (З_о + З_д) = 0,3 \times (411 + 82,2) = 148 \text{ руб.}$$

6.1.7 Расходы на подготовку и освоение производства

Расходы на освоение и подготовку производства в процентах от основной заработной платы производственных рабочих 40 – 60%:

$$P_п = 0,5 \times 411 = 205,5 \text{ руб.}$$

6.1.8 Расходы на износ инструмента и приспособлений целевого назначения и специальные расходы

Для серийного производства, специализированного на выпуске данной продукции, эти расходы составляют 25 % от основной заработной платы производственных рабочих:

$$P_и = 0,25 \times 411 = 102,75 \text{ руб.}$$

6.1.9 Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Данные расходы составляют 40 % от основной заработной платы:

$$P_c = 0,4 \times 411 = 164,4 \text{ руб.}$$

6.1.10 Цеховые расходы

Цеховые расходы принимаем равными 120 % от основной заработной платы

$$P_{ц} = 1,2 \times Z_o = 1,2 \times 411 = 493,2 \text{ руб.}$$

6.1.11 Общецеховые расходы

Общезаводские расходы принимаем равными 50 % от основной заработной платы:

$$P_{оз} = 0,5 \times 411 = 205,5 \text{ руб.}$$

6.1.12 Полная себестоимость

$$C_{п} = P_{м} + B_{отх} + C_{и} + Z_o + Z_{д} + Z_{ос} + P_{п} + P_{и} + P_{с} + P_{ц} + P_{оз} \quad (6.3)$$

$$C_{п} = 21.03 + 1961 + 98.05 + 411 + 82,2 + 148 + 205,5 + 102,75 + 164,4 + 493,2 + 205,5 \\ = 3892,63 \text{ рублей.}$$

6.1.12 Оптовая цена изделия

Оптовая цена изделия, обеспечивающая возмещение издержек предприятия–изготовителя и получение прибыли не ниже отраслевой нормы по аналогичной продукции:

$$Ц_o = C_{п}(1 + П/100) , \quad (6.4)$$

где П — плановый процент прибыли (П=14%)

$$Ц_o = 3892,63 (1 + 0,14) = 4437,6 \text{ руб.}$$

Плановая прибыль: $Ц_{п} = Ц_o - C_{п} = 4437,6 - 3892,63 = 544,97 \text{ руб.}$

6.2 Расчёт эксплуатационных расходов

Текущие расходы эксплуатации устройств радиоэлектронной аппаратуры;

- Амортизационные отчисления.
- Затраты на ремонт.
- Стоимость потребляемой электроэнергии.
- Прочие затраты.

6.2.1 Затраты на капитальный ремонт

$$C_k = \frac{N_p \Phi_6}{100}, \quad (6.5)$$

где Φ_6 – балансовая стоимость прибора;

$$\Phi_6 = C_0(1 + K_{\text{дм}}); \quad (6.6)$$

$$K_{\text{дм}} = 0,1;$$

N_p – норма затрат на капитальный ремонт;

$$N_p = 1,8 \%$$

$$C_k = \frac{1,8 \cdot 4881,36}{100} = 87,87 \text{ руб.}$$

6.2.2 Стоимость потребляемой электроэнергии

Так как прибор питается от батареи, выходное напряжение которой 5В

Средняя стоимость такой батареи около 50 рублей. Поэтому примем $C_3 = 50$ рублей.

6.2.3 Эксплуатационные расходы проектируемого устройства

$$C_{\text{эпр}} = C_k + C_3 = 87,87 + 50 = 137,87 \text{ руб}$$

Выводы по разделу шесть:

В данном разделе произведен расчет стоимости компонентов прибора, заработная плата рабочего, изготавливающего цифровой датчик давления.

7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В данной выпускной квалификационной работе был разработан цифровой датчик давления с беспроводной передачей данных.

В этой главе рассматривается техника безопасного эксплуатирования.

7.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

В соответствии с ГОСТ 12.0.003–74 «Опасные и вредные производственные факторы». Классификация на человека могут воздействовать: физические, химические, биологические, психофизиологические производственные факторы.

При работе с электроприбором может проявиться ряд опасных и вредных факторов.

Электрические факторы, обусловленные:

- Повышенным уровнем электромагнитных излучений.
- Повышенным уровнем статического электричества.
- Повышенной напряженностью электрического поля.
- Повышенной напряженностью магнитного поля.

Электрические факторы появляются из-за электрических сетей, электроприборов, оборудования с электроприводом и т. п. Данные факторы могут повлечь за собой:

- Механические травмы.
- Психические травмы.
- Ожоги.

Психофизиологические факторы, обусловленные статическими физическими перегрузками:

- Продолжительная работа с датчиком,
- Работа в неудобной позе.

Психофизиологические факторы, обусловленные нервно–психическими перегрузками:

- Умственным перенапряжением.
- Перенапряжением анализаторов
- Монотонностью труда.
- Эмоциональные перегрузки.

Психофизиологические факторы являются причиной:

- Радикулита.
- Миозита.
- Психических расстройств.
- Усталости и др.

Для предотвращения возникновения перечисленных опасностей необходимо соблюдать меры безопасности при работе с электроприбором.

7.2 Анализ условий эксплуатации

Разрабатываемый цифровой датчик давления предназначен для использования как в агрессивных, так и неагрессивных условиях при температуре от -50 до $+150$ °С.

Нормальные условия применения приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Нормальные условия применения

Влияющая величина	Допустимое значение
Температура окружающего воздуха, °С	20 ± 2
Относительная влажность воздуха, %	до 80
Атмосферное давление, кПа (ммрт.ст.)	100 ± 4 (750 ± 30)
Внешнее магнитное поле	Магнитное поле Земли

Датчик давления является стационарным. Может использоваться на открытой производственной площадке; в пожаровзрывоопасных условиях.

7.3 Соответствие требованиям безопасности

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [24].

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм – травм, вызванных воздействием электрического тока или электрической дуги, и профессиональных заболеваний. Нормы на допустимые токи и напряжения прикосновения в электроустановках должны устанавливаться в соответствии с предельно допустимыми уровнями воздействия на человека токов и напряжений прикосновения и утверждаться в установленном порядке [ГОСТ 12.1.038–82].

Классификация электрооборудования:

1) Виды электрооборудования подразделяются по исходящей от электричества опасности на электрооборудование первой, второй и третьей категорий.

2) К первой категории относится электрооборудование, установленное:

- В используемых для лечения пациентов помещениях лиц, оказывающих медицинские услуги, или в помещениях больниц, в которых проводятся процедуры, связанные с анестезией и общим наркозом.

- В взрывоопасных зонах.

- На объектах с повышенной опасностью.

3) Электрооборудованием второй категории является:

- Электрооборудование, находящееся в коллективном пользовании квартировладельцев в зданиях, в которых имеется более двух квартир.

- Электрооборудование в рабочих и лабораторных помещениях, связанных с учебной работой по электротехнике.

- Электрооборудование в используемых для лечения пациентов помещениях лиц, оказывающих медицинские услуги, или в помещениях, больниц, в которых не проводятся процедуры, связанные с анестезией и общим наркозом.

- Электрооборудование, которое работает на номинальном напряжении до 1000 вольт и в котором номинальный ток главного предохранителя превышает 35 ампер.

- Электрооборудование, которое работает на номинальном напряжении более 1000 вольт.

4) К третьей категории относится электрооборудование, не являющееся электрооборудованием первой и второй категорий [25].

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями. Электроустановки и их части должны быть выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие способы и средства:

- Защитные оболочки.
- Безопасное расположение токоведущих частей.
- Изоляция токоведущих частей.
- Предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

Цифровой датчик давления относится к электроустановкам напряжением второй категории до 1000 В. Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетокведущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции в сети с изолированной нейтралью, применяют защитное заземление [ГОСТ 12.1.009-76, пункт 23].

Пожаробезопасность

Опасность пожаров и взрывов на производственных объектах нефтегазодобывающей промышленности характерна для всех технологических процессов начиная от добычи нефти, газа или конденсата и заканчивая их переработкой. Вероятность возникновения этих явлений, возможные масштабы и последствия их воздействия на здоровье и жизнь работающих зависят от объемов и свойств горючих материалов и веществ, условий поступления, распространения и накопления их в воздухе. По взрыво- и пожароопасности объекты нефтяной и газовой промышленности относятся к категории «А»[31]. К взрывоопасности категории «А» относятся производства на которых применяются:

1. вещества, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, воздухом и друг с другом;
2. горючие газы, нижний предел воспламенения которых равен 10% и меньше по отношению к объему воздуха;
3. жидкости, с температурой вспышки паров до 28 °С, исключительно при условии, что указанные газы и жидкости могут образовывать взрывоопасные смеси в объеме, превышающем объем помещения на 5 %.

Пожарная опасность трубопроводов с горючими жидкостями, работающих под давлением, обусловлена возможностью выхода горючих продуктов наружу из-за образования неплотностей и повреждений.

Причинами образования неплотностей и повреждений могут быть:

- Повышение давления в трубах сверх допустимых значений.
- Коррозия материала труб продуктами и внешней средой.
- Температурные деформации и гидравлический удар.

Кроме того, причинами появления неплотностей и повреждений являются неправильная подготовка трубопроводов к ремонту и пуску после ремонта: разъединение фланцев и снятие заглушек на трубопроводах с продуктами под давлением; отсутствие или неплотная установка заглушек; оставление дренажных устройств в открытом состоянии. Самыми опасными участками утечек в трубопроводах являются фланцевые соединения.

Специфические требования пожарной безопасности при эксплуатации технологических трубопроводов и горючими жидкостями:

- Прокладку технологических трубопроводов для перемещения и горючих жидкостей на территории объектов следует предусматривать наземным или надземным способом с размещением на эстакадах, этажерках, стойках, опорах, выполненных из негорючих материалов. Не допускается прокладка кабелей и трубопроводов систем противопожарной защиты совместно с указанными трубопроводами.

- Технологические трубопроводы с горючими жидкостями, соединяющие технологический блок (установку, цех) с межцеховыми трубопроводами, должны иметь отключающие устройства на входе и выходе из блока (установки, цеха).

- Газопроводы, в которых возможно образование и скопление конденсата, должны оборудоваться отводными устройствами, которые защищаются от замерзания. Для выпуска газов из трубопроводов с горючими жидкостями предусматриваются продувочные трубки. Для продувки трубопроводов инертным газом или паром перед ремонтом предусматриваются продувочные штуцеры.

- При подключении нескольких аппаратов к общему коллектору необходимо предусматривать отключающие устройства на каждом трубопроводе—отводе к аппарату.

- Не допускаются к применению для перемещения горючих жидкостей трубопроводы, выполненные из стекла и других хрупких материалов, а также надземные трубопроводы из горючих и трудногорючих материалов (фторопласт, полиэтилен, винипласт и др.).

- Необходимо до минимума сокращать количество фланцевых соединений, соединяя трубы сваркой. Следует правильно выбирать материал для уплотнительных прокладок, контролировать герметичность фланцев.

- Не допускается располагать фланцевые соединения над рабочими площадками и местами, предназначенными для прохода людей и проезда транспорта.
- В качестве прокладочных материалов для фланцевых соединений необходимо применять материалы, устойчивые к перемещаемым средам и отвечающие параметрам ведения технологического процесса.
- Следует предусматривать защищенную от разрушения теплоизоляцию технологических трубопроводов, выполняемую из негорючих материалов, а также защиту трубопроводов от коррозии, вторичных проявлений молнии и статического электричества.
- Над технологическими трубопроводами с горючими продуктами, проложенными под линиями электропередач, необходимо предусматривать защитные устройства, выполненные из негорючих материалов. Защитные устройства должны выступать за крайние провода линии электропередач не менее чем на 5 м.
- В производственных цехах и на отдельных установках должны быть вывешены схемы трубопроводов с указанием расположения задвижек, которыми отключают поступление продукта при пожаре.

7.4 Эргономика

На лицевой части датчика имеются два индикатора: первый информирует о остаточном заряде, а второй о качестве связи с удаленным синхронизируемым персональным компьютером.

Лицевая поверхность окрашена в черный цвет, корпус датчика выполнен из нержавеющей стали, что обеспечивает коррозионную устойчивость и механическую прочность. В боковой части датчика расположена антенна, ее угол поворота составляет 360°

Выводы по главе семь:

В данной главе была рассмотрена проблема безопасности жизнедеятельности, связанные с работой оператора на разработанном датчике давления. В процессе труда пользователь подвергается действию опасных и вредных факторов.

Произведена классификация опасных и вредных производственных факторов, особо выделены те, которые имеют непосредственное влияние при работе с прибором.

В связи с этим, были изучены различные нормы, сертификаты и правила, определялись пути решения проблем, для сокращения пагубного влияния на человека и обеспечения безопасных условий труда операторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

1. Проведен аналитический обзор принципов измерения давления и современных цифровых устройств для его измерения;
2. Изучена технология беспроводной передачи измерительной информации ZigBee.
3. Разработаны функциональная и электрическая принципиальная схемы ЦДД.
4. Рассчитана полная погрешность измерительных каналов ЦДД, разработаны методика выполнения измерения и методика поверки ЦДД;
5. Описали алгоритм работы микроконтроллера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Большая энциклопедия нефти и газа. – Москва, 2007.
<http://www.ngpedia.ru/id310182p2.html> [Дата обращения 05.02.2016].
- 2 Акмайкин, Д.А. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст]: учебное пособие/ Д. А. Акмайкин. – Владивосток: Мор.гос. ун–т, 2007. – 152с.
- 3 Лурье, Г.И. Датчики давления для общепромышленного применения. Часть 1 / Г.И. Лурье. – М.: ИНФРА, 2009.– 9с.
- 4 Датчик давления BDSensors [Текст]: руководство по монтажу и эксплуатации/ – Москва: ООО «БД СЕНСОРС РУС», 2014. – 35с.
- 5 Ахмеджанова, Р.А. Лекции по ФОПИ. Энергетика и альтернативные виды топлива. Первичные измерительные преобразователи / Р.А.Ахмеджанова. – М.:УМЦ ЖДТ, 2013. – 45с.
- 6 Чередов А.И., Щелканов А.В. Первичные измерительные преобразователи / А. И. Чередов, А. В. Щелканов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 92 с.
- 7 Козлов, М.Г. Метрология и стандартизация: Учебник М., СПб.: Изд-во «Петербургский ин–т печати», 2001. – 372 с.
- 8 Преобразователи, датчики, сенсоры. Градуировка термодпары: хромель-копель, 2015.–<http://sensore.com/page53.html>[Дата обращения 15.03.2016].
- 9 Датчик давления Метран – 150, 2014.–<http://www.td-utr.ru/content/datchik-davleniya-metran-150>[Дата обращения 20.03.2016]
- 10 Научно-производственное объединение «Ризур». EndressHauser датчик давления Deltabar SPMD 70, 2013.–
http://www.rizr.ru/endres_pmd70.htm[Дата обращения 25.03.2016].
- 11 ООО «Рантайм». Беспроводной датчик избыточного давления EJX430B, 2012. – <http://runtime.by/content/besprovodnoy-datchik-izbytochnogo-davleniya-ejx430b>[Дата обращения 28.03.2016].

12 Рынок микроэлектроники. Микроконтроллеры семейства MSP430, 2007.– <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/micros/msp430/arh/1.htm>[Дата обращения 05.04.2016].

13 Время электроники. 16–разрядный АЦП последовательного приближения с рекордным быстродействием от AnalogDevices, 2015.– <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/news/company/2113/doc/15636/>[Дата обращения 10.04.2016].

14 TexasInstruments. Основные принципы дельта-сигма АЦП, 2015.– <http://scanti-ecomp.ru/bulleten.php?v=409&p=29>[Дата обращения 16.04.2016]

15 Панфилов, Д.А. Введение в беспроводную технологию Zigbee– стандарта 802.15.4 /Д.А. Панфилова // Электронные компоненты. – 2004. – №12.

16 Соколов, М.А. Программно–аппаратное обеспечение беспроводных сетей на основе технологии Zigbee/802.15.4 // М.А. Соколова // Электронные компоненты. – 2004. – №12.

17 Семенов, Ю.А. Беспроводные сети ZigBee и IEEE802.15.4. /Ю.А. Семенова. – 3-е изд., перераб. И доп.–М.Ж.Юрайт, 2013. – 411 с.

18 EasyElectronicsэлектроника для всех. ZigBеемодульMicrochip–MRF24J40MA, 2010.–<http://easyelectronics.ru/zigbee-modul-microchip-mrf24j40ma.html>[Дата обращения 12.04.2016].

19 ГОСТ 8.401-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования.

20 Рекомендации по метрологии, Р50.2.038–2004. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений.

21 Методика поверки 56797–14, Преобразователи давления измерительные.

22 Правила метрологии. Порядок проведения поверки средства измерения, ПР50.2.006-94, 2001. – №476.

23 Крюков, В.В. Информационно-измерительные системы. Методы аналого-цифрового преобразования / В.В. Крюков. – Учебник: Изд-во «Владивостокский государственный ун-т», 2014. – 50с.

24 Сейтенов, А.Т. Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс. Производственная безопасность / А.Т. Сейтенов. – Журнал, Актобе: Изд-во «Казахский агротехнический ун-т», 2014. – 165с.

25 Адвокатское бюро АйвараПильва. Закон об электробезопасности, 2002–<http://zakon24.ee/zakon-ob-elektrobezopasnosti/>[Дата обращения 30.04.2016]

26 Ишниязова, А.Р. Методическое пособие по разработке экономической части дипломного проектирования для не экономических специальностей / А.Р. Ишниязова. – Нижневартовск, 2005. – 29 с.

27 Ларионов В.А. Микропроцессорная техника и компьютеры в приборостроении: текст лекций. – Нижневартовск: филиал ЮУрГУ в г. Нижневартовске, 2006 – 58 с.

28 Кувшинов Н.С, Хейфец А.Л Схемы электрические принципиальные в инженерной графике: учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 74 с.

29 СТО ЮУрГУ 04-2008. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

30 РД 39–00–148317–001–94 Классификатор помещений, зданий, сооружений и наружных установок предприятий нефтяной и газовой промышленности по взрывоопасности.

Позиц. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
BQ1	Кварцевый резонатор РГ175-8МГц	1	
BQ2	Кварцевый резонатор НС-49US-20МГц	1	
	Конденсаторы		
C1, C2	C0G/NP0 0.5 нФ	2	
C3, C8	K10-17Б 47нФ М47, 5%	2	
C13- C15	K10-17Б 47нФ М47, 5%	3	
C4, C9	K10-17А Н50 0.1мкФ	2	
C18, C19	K10-17А Н50 0.1мкФ	2	
C6, C7	K10-17Б 1нФ NPO, 5%	2	
C10	K10-17А М47 100нФ, 5%	1	
C11	K73-17 1мкФ, 5%	1	
C12	K10-17Б 0,01 мкФ	1	
C16, C17	K10-17А М47 18нФ, 10%	2	
C20, C21	K10-17А М47 20нФ, 10%	2	
	Микросхемы		
D2	MSP430F148	1	
D3	NC7SZ125P5X	1	
	Операционные усилители		
D1	140УД6Б	1	
D4	MRF24J40/ML	1	
	Резисторы		
R1	C2-13-0.5Вт ± 0.1%	1	
	Разъёмы		
XP1	СНП – 3,3	1	

200100.2016.158 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Кеданов А.Д.		30.05.16
Проверил		Юрасова Е.В.		30.05.16
Н.контр.		Быллинкина		30.05.16
Утвердил		Починаев В.		30.05.16

Датчик давления для
сенсорных сетей
передачи данных ZigBee

Лит. Масса Масштаб

Лист 2 Листов 2

Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ»
(НИУ) в г. Нижневартовске
кафедра «Информатика»