

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И. О. Заведующего кафедрой, к.т.н., доцент

_____/ А.П. Лапин /

« ____ » _____ 2020 г.

Разработка принципиальной схемы электронной платы преобразователя давления

(наименование темы работы (проекта))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.308-305.ВКР

(код направления/специальности, год, номер студенческого)

Руководитель, доцент

_____/ О.Ю. Бушуев /

« ____ » _____ 2020 г.

Автор

студент группы КЭ –413

_____/ В.А. Пирогов /

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер, доцент

_____/ А.С. Волосников /

« ____ » _____ 2020 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	7
1.1 Постановка задачи.....	8
1.2 Методы и средства измерения давления.....	8
1.3 Типы датчиков.....	10
1.3.1 Упругие датчики.....	10
1.3.2 Емкостные датчики.....	12
1.3.3 Индуктивный датчик давления.....	13
1.3.4 Датчики давления, основанные на принципе магнетосопротивления.....	14
1.3.5 Пьезоэлектрические датчики.....	15
1.3.6 Потенциометрические датчики.....	15
1.3.7 Тензометрические датчики.....	16
1.4 Обзор современных датчиков давления.....	20
2. ИНТЕРФЕЙС «ТОКОВАЯ ПЕТЛЯ».....	27
2.1 Электрическая схема токовой петли.....	32
2.2 Поиск патентных решений.....	34
3. КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ.....	48
3.1 Принципиальная схема датчика давления.....	48
3.2 Выбор микроконтроллера. Технические характеристики МК.....	51
3.3 Понятие аналого-цифрового преобразования. Типы АЦП.....	56
3.4 АЦП встроенный в микроконтроллер.....	60
3.5 Цифро-аналоговый преобразователь.....	62
3.6 Источник питания.....	63
3.6.1 Корректор коэффициента мощности.....	63
3.6.2 ШИМ преобразователь.....	65
3.6.3 Система управления.....	66
3.7 Схема преобразователя давления.....	67

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В LTSPICE И РАСЧЁТ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА МЕМБРАНЫ.....	69
4.1 Моделирование в LTspice	69
4.1.1 Моделирование интерфейса токовая петля	70
4.1.2 Моделирование дифференциального усилителя.....	72
4.2 Расчёт упругого элемента мембраны.	75
4.3 Выбор способа гофрировки воспринимающей мембраны.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	86
ПРИЛОЖЕНИЯ	89
ПРИЛОЖЕНИЕ А	89
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	90

ВВЕДЕНИЕ

На нынешнем этапе промышленного развития предъявляются все более высокие требования к информационно-измерительным комплексам, частью которых являются современные датчики давления. Датчики давления представляет собой изолированный первичный преобразователь, который принимает измерительные сигналы [1].

Измерение давления необходимо при изучении физических процессов в любой области науки и техники, и для понимания физических процессах происходящих в природе, а так же для нормальной работы созданных человеком технических устройств и технологических процессов.

Давление определяет состояние веществ в природе (твердое, жидкое, газообразное). Различное использование давления в науке, технике и промышленности – значительно упрощает жизнь человечества. Давление описывает в каком состоянии напряжения находятся жидкости и газы в условиях всестороннего сжатия и определяется частным от деления нормального состояния тела к состоянию площади поверхности, к которой приложено давление.

В настоящее время, датчики давления являются самыми распространенными среди датчиков физических величин. Самой сложной задачей при производстве датчиков давления, является процесс их калибровки, то есть корректировка значений параметров выходной величины, до того момента, пока не будет достигнуто согласование между эталонным входным значением и результатом на выходе датчика [2].

Разработка и применение датчиков давления - это отрасль с очень длинной историей и широким ассортиментом датчиков, основанных на различных физических принципах.

Существует большая конкуренция в разработке и производстве датчиков давления. Такие компании, как Sensor, Lucas Novasensor, Data Instruments Microswitch, Honeywell, I.C. соревнуются в данной области. Лидером среди этих компаний является Motorola. Датчики давления, предлагаемые этими компаниями,

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ				

основаны на полупроводниковых первичных преобразователях, которые в настоящее время конкурируют с механическими системами, значительно опережают их в плане точности и легкости применения, а так же имеют меньшие размеры и стоимость.

Актуальность: В данный момент, на российском рынке мало датчиков давления, которые были бы полностью выполнены на отечественной базе элементов. По этой причине, я решил заняться изучением данной проблемы. Создания датчика давления на отечественной базе элементов позволило бы не только снизить цену на производство, но и решила бы вопрос зависимости нашего производителя от зарубежного рынка.

Цель: Разработка принципиальной схемы электронной платы преобразователя датчика избыточного давления, работающего по принципу тензорезистивного эффекта.

Задачи выпускной квалификационной работы разделены на следующие этапы:

- Аналитический обзор методов и средств измерения давления;
- Выбор интерфейса для будущего датчика давления;
- Конструкторский этап – выбор и обоснование элементной базы датчика давления
- Моделирование в LTspice и математическое моделирование мембраны датчика давления.

						<i>Лист</i>
					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	6
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Первичный измерительный преобразователь или же датчик – является чувствительным элементом автоматического устройства, которое получает измеренное значение различных физических величин, преобразует и после преобразования передаёт его другим элементам, входящим в состав измерительного комплекса.

Датчики классифицируются:

- в зависимости от размера измеримой величины;
- от того, какая это величина: влажности, температура, давления и плотность;
- по принципу действия (электрические, пневматические);
- типу и характеру выходного сигнала (непрерывные и дискретные).

Основным требованием, которое предъявлено к современным датчикам – являются высокая чувствительность, стабильная характеристика во времени, низкая инерция.

Статической характеристикой датчиков представляется зависимость величины выходного сигнала от входного:

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}),$$

Динамическая характеристика может быть представлена в виде графика переходного процесса $U_{\text{вых}} = f(t)$.

При скачкообразном изменении входного сигнала. Под чувствительностью S датчика понимают отношения сигнала на выходе датчика Y , к вызвавшему его изменению измеряемой величины X :

$$S = \frac{|\Delta Y|}{|\Delta X|},$$

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ				

1.1 Постановка задачи

Целью данной главы является обзор существующих методов, эффектов и явлений которые используются или могут быть использованы при измерении давлений.

Рассмотрим типы измеримого давления, такие как:

- абсолютное давление
- барометрическое давление
- избыточное давление
- вакуумметрическое давление
- А так же какие датчики давления бывают:
- упругие;
- емкостной;
- тензорезистивный;
- пьезорезистивный;

1.2 Методы и средства измерения давления

Типы измеряемого давления.

Абсолютное давление – это величина, измеренная по отношению к абсолютному нулю (Отношение измеренного давления к давлению вакуума).

Барометрическое давление - это давление атмосферы Земли. Своё название барометрическое давление получило от устройства под названием барометр, который измеряет атмосферное давление и сравнивает его с давлением, полученным при определенной температуре и на определенной высоте над уровнем моря. Избыточное давление и вакуум определяются относительно этого давления.

Если между измеренным давлением и барометрическим давлением существует положительная разница, возникает избыточное давление. Таким образом, избыточное давление - это значение, при котором измеренное давление превышает

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						8
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

1.3 Типы датчиков

Существуют различные датчики давления, которые лучше всего подходят для конкретного процесса, но их обычно можно разделить на несколько категорий, таких как датчики упругости, преобразователи мощности, датчики перепада давления и датчики давления вакуума.

1.3.1 Упругие датчики

Большинство датчиков давления жидкости имеют гибкую структуру, в которой жидкость размещается в небольшом отсеке, по крайней мере, с одной упругой стенкой. Используя этот метод, показания давления определяются путем измерения колебаний этой упругой стенки, представляя результат путем считывания непосредственно через соответствующие соединения или преобразованные электрические сигналы. Упругие датчики давления очень чувствительны, они очень ломкие и подвержены вибрации. Кроме того, они обычно намного дороже манометрических датчиков, поэтому они в основном используются для передачи измеренных данных и измерения перепада давления. Теоретически можно использовать широкий спектр упругих элементов для упругого датчика давления. Тем не менее, большинство устройств используют диафрагмы или определенную форму трубки Бурдона. Элементы упругих датчиков давления приведены на рисунке 1.1.

						<i>Лист</i>
						10
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>	<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	

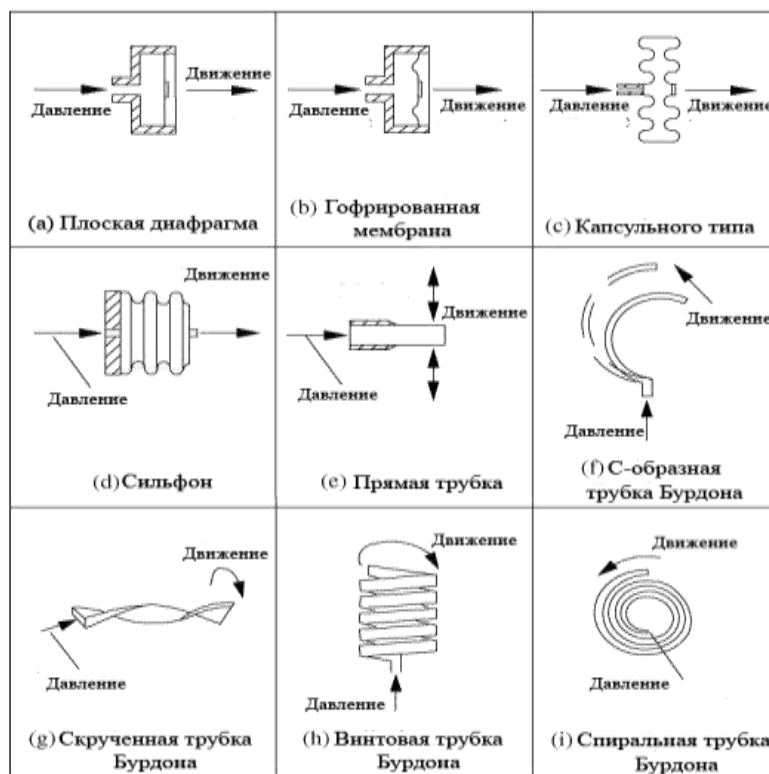


Рисунок 1.1 – Элементы упругих датчиков давления

Принцип работы, на котором основаны различные трубках Бурдона – давление, прилагаемое внутри трубки, приводит к тому, что эллиптический или овальный участок трубки деформируется круговыми движениями, создавая продольные напряжения, которые вызывают изгиб трубки, и свободный конец трубки начинает перемещаться. Рычаги и система трансмиссии превращают это движение и возвращают стрелку, указывающую давление относительно круглой шкалы [5].

Сильфоны – в большинстве своем имеют цилиндрическую форму и состоят из множества складок, которые деформируются при изменении давления в осевом направлении. Измеренное давление прикладывается к одной стороне отверстия (внутри или снаружи), а атмосферное давление оказывает в свою очередь противоположный эффект. Абсолютное давление измеряется путем откачивания воздуха наружного или внутреннего пространства, а затем производится замер давлению на противоположной стороне.

Мембраны (диафрагмы) – это очень универсальные устройства, используемые в агрессивных средах и при очень большом давлении. Изготовлены из круглых металлических дисков или гибких элементов, например пластика, резины или кожи. Материал, из которого изготовлена мембрана, зависит от приложения к ней упругих свойств этого материала или сопротивления другого элемента (например, пружины). Мембраны, изготовленные из металлических дисков, используют упругие характеристики, тогда как мембраны, которым противостоят другие упругие элементы, выполнены из гибких элементов. Мембраны очень чувствительны к внезапным изменениям давления.

1.3.2 Емкостные датчики

В большинстве своем емкостной датчик состоит из двух или более параллельных пластин – конденсаторов с изменяемой емкостью, соединенных с металлической диафрагмой, которая и подвергается давлению сил возникающих в процессе с одной стороны и опорным давлением с другой стороны. Пример приведен ниже на рисунке 1.2.

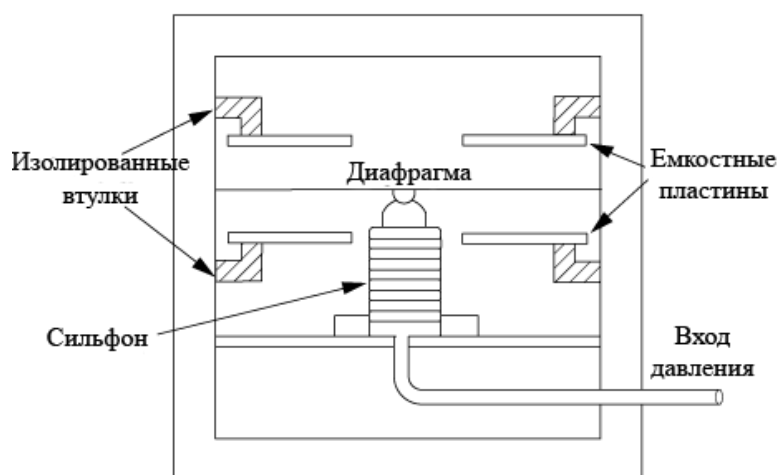


Рисунок 1.2 – Емкостной датчик давления

Электроды прикреплены к мембране и питаются от высокочастотного генератора. Электроды чувствуют любое движение диафрагмы, и это влияет на изменение емкости пластинчатых конденсаторов. Изменение емкости

определяется подключенной электрической цепью, которая создает напряжение, соответствующее изменению давления. Данный тип датчиков может использоваться в диапазоне от 2,5 Па до 70 МПа с чувствительностью 0,07 МПа.

1.3.3 Индуктивный датчик давления

Индуктивные датчики давления соединены с диафрагмой или трубкой Бурдона. Ферромагнитный стержень прикреплен к упругому элементу и имеет первичную и вторичную обмотки. Ток подается на главную обмотку. Когда сердечник центрирован, то же напряжение подается на две вторичные обмотки. Когда сердечник движется под воздействием давления, соотношение напряжений между двумя вторичными обмотками изменяется. Разница напряжения пропорциональна изменению давления.

Пример индуктивного датчика давления с использованием диафрагмы показан ниже на рисунке 1.3.

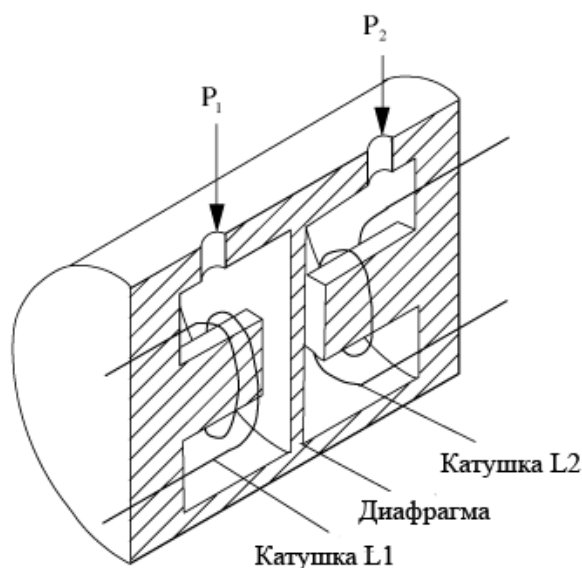


Рисунок 1.3 – Индуктивный датчик давления

Для данного типа датчика давления, примем первую камеру в качестве эталонной камеры опорного давления P_1 , которое подается на катушку заряжаемую эталонным током. Когда давление в других камерах изменяется,

диафрагма приходит в движение и индуцирует ток в другой катушке, который указывает величину тока, измеренную в единицах давления.

Такие датчики можно использовать с любым упругим элементом (но они обычно используются в сочетании с диафрагмой или трубкой Бурдона). Показание давления определяется путем калибровки напряжения, а диапазон давления, в котором может использоваться этот датчик, определяется относительно упругого элемента и находится в диапазоне от 250 Па до 70 МПа.

1.3.4 Датчики давления, основанные на принципе магнетосопротивления

Данные датчики давления, также имеют ферромагнитные сердечники. Когда давление изменяется, гибкий элемент перемещает ферромагнитную пластину, что приводит к изменению магнитного потока измеряемой цепи. Электрический элемент можно использовать в тех случаях, когда индуктивный датчик не способен генерировать достаточно точные измерения. Давления, находятся в диапазоне от 250 Па до 70 МПа с чувствительностью 0,35 МПа.

Пример данного датчика давления основанного на принципе магнетосопротивления можно увидеть на рисунке 1.4.

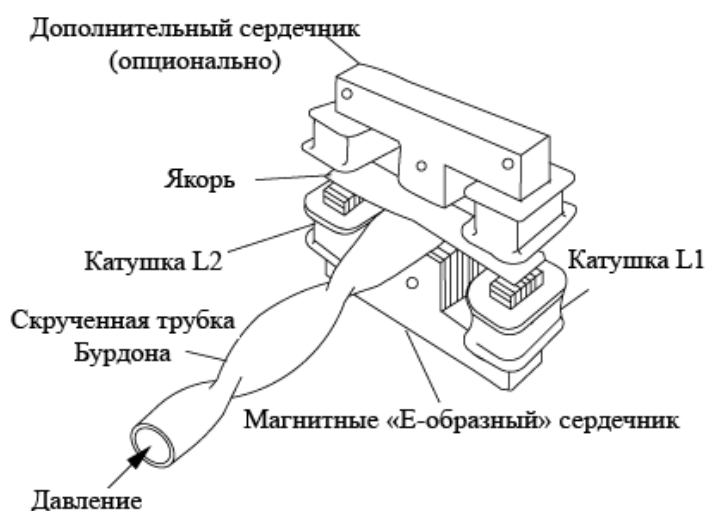


Рисунок 1.4 – Датчики магнетосопротивления

1.3.5 Пьезоэлектрические датчики

Главную роль в данном типе датчика играет: датчик - кристалл. Когда на кристалл оказывается давление, он деформируется и образуется небольшой электрический заряд. Измерение сформированного заряда пропорционально изменению давления. Этот тип датчика очень быстро реагирует на изменения постоянного давления. Как и датчик давления, основанный на принципе измерения магнетосопротивления, пьезоэлектрический элемент обладает высокой чувствительностью, но действует намного быстрее. Диапазон давлений датчиков этого типа составляет от 21 кПа до 100 Мпа и имеет чувствительность равную 0,1 МПа.

Пример пьезоэлектрического датчика давления представлен на рисунке 1.5.

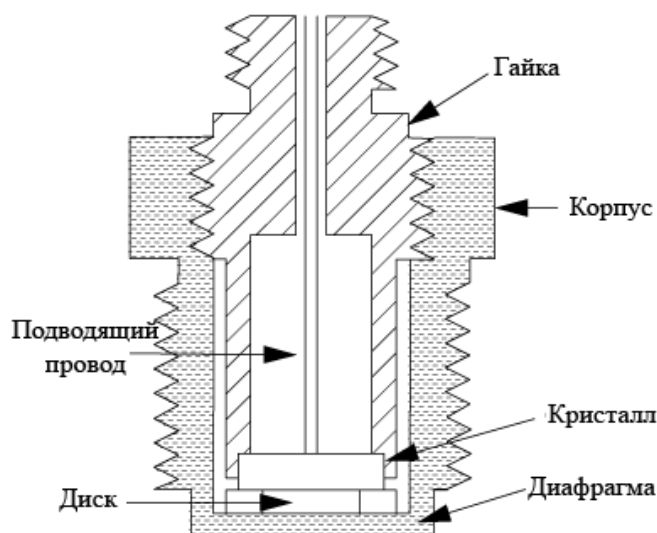


Рисунок 1.5 – Пьезоэлектрические датчики

1.3.6 Потенциометрические датчики

Потенциометрические датчики давления обладают подвижным рычагом, механически прикрепленным к упругому датчику давления. Когда давление изменяется, упругий элемент деформируется, в результате чего он перемещает рукоятку вперед или назад вдоль потенциометра, получая таким образом значения сопротивления. Пример данного датчика показан на рисунке 1.6.

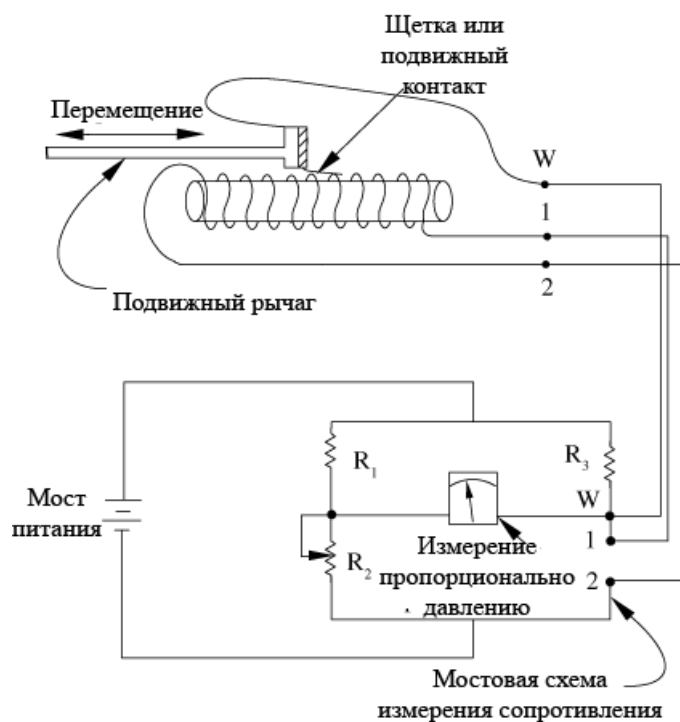


Рисунок 1.6 – Потенциометрические датчики

Эти датчики относятся к оптимальному рабочему диапазону, но зависят от многих факторов. Таким образом, они представляют собой датчики низкого уровня, которые не часто используются. Так как их чувствительность и рабочий диапазон низкие, то данный вид датчика можно лучше оценить как дешевый детектор. Диапазон измеряемого давления лежит в пределах от 0,035 МПа до 70 МПа и обладает чувствительностью от 0,07 МПа до 0,35 МПа.

1.3.7 Тензометрические датчики

Тензометрические датчики основаны на тензорезистивном эффекте, возникающем в материалах чувствительного элемента, который имеет вид мембраны, на которой расположены тензорезисторы, соединенные в мостовую схему. Под воздействием измеряемого давления среды мембрана изгибается, в результате чего, у тензорезисторов изменяется сопротивление, что приводит к дисбалансу моста Уитстона.

Чувствительный элемент данного датчика можно увидеть на рисунке 1.7.

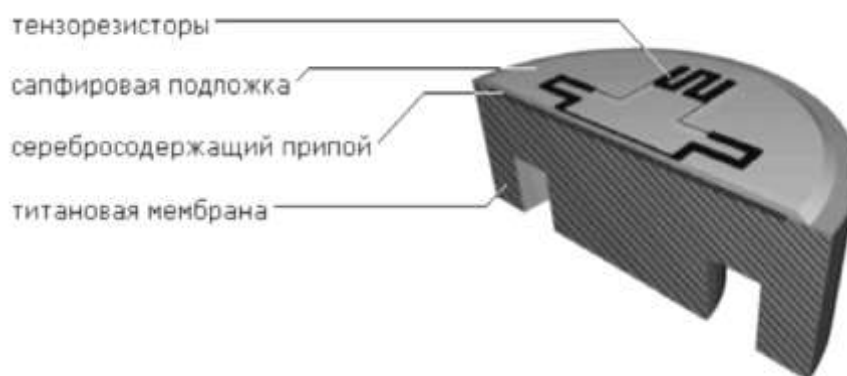


Рисунок 1.7 – Чувствительный элемент тензорезистивного датчика

Для определения неизвестного электрического сопротивления используется данная схема, которая работает по принципу равновесия двух секции мостовой схемы, так чтобы отношение сопротивлений в одной секции было таким же, как и в другой секции, возвращая ноль, в гальванометре в центральной ветви. Одна из секций содержит тензорезистор, сопротивление которого нам не известно. Одной из важнейших задач является определение этого сопротивления. В другой части секция содержится резистор с известным нам сопротивлением, которое можно регулировать.

Схема моста Уитстона показана на рисунке 1.8.

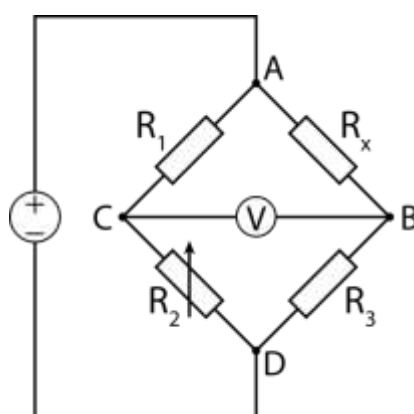


Рисунок 1.8 – Мост Уитстона с источником напряжения

Напряжение на выходе измерительного моста можно определить как:

$$V_0 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{\text{ВХ}}$$

При выполнении условия баланса моста:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3}$$

Выходное напряжение равно нулю.

Даже самая малая разбалансировка из-за изменения сопротивления приводит к появлению напряжения на выходе.

В тензодатчиках чувствительные элементы располагаются на каждом из резисторов и измеряет изменение их сопротивлений под действием приложенного давления. Сопротивление определяется уравнением:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

где A – площадь поперечного сечения проводника;

ρ – удельное сопротивление проводника;

L – длина проводника.

Изменение давления удлиняет или сжимает проводник, поэтому для одного резистора необходим датчик сжатия, а для другого - датчик расширения. Чтобы контролировать влияние температуры (провод удлиняется или укорачивается из-за изменений температуры), на двух других резисторах должен быть установлен пустой датчик. Данные датчик зачастую являются типом полупроводника (N-типа или p-типа). Таким образом, чувствительность таких датчиков намного выше, чем у их аналогов, но с большей чувствительностью возникает узкий функциональный диапазон: температура должна быть постоянной для получения истинного значения. Эти датчики сильно зависят от изменений температуры (в отличие от других типов электрических компонентов). Давление лежит в диапазоне от 0 до 1400 МПа, чувствительность от 1,4 МПа до 3,5 МПа.

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						18
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

Пример данного типа датчика показан на рисунке 1.9. В таких датчиках используются чувствительные к напряжению провода, один конец которых прикреплен к неподвижной раме, а другой конец соединен с подвижным элементом, который перемещается при изменении давления.

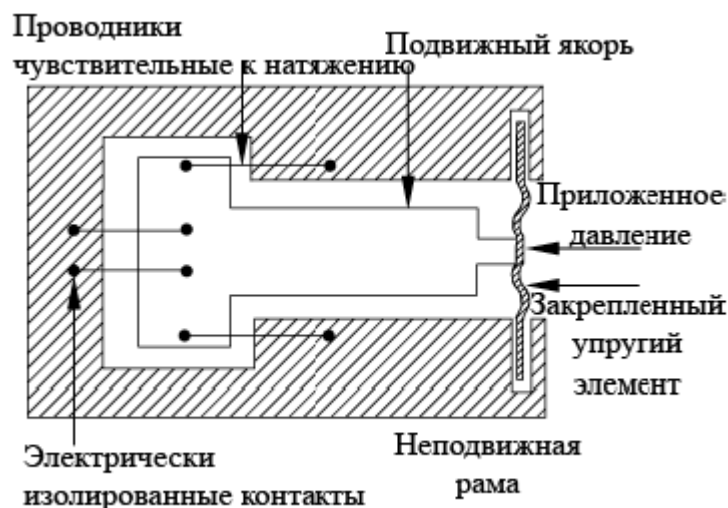


Рисунок 1.9 – Пример несвязанного тензодатчика

Пример данного датчика можно увидеть на рисунке 1.10. Размещение происходит в верхней части диафрагмы, которая под воздействием давления деформируется, натягивая тем самым провода которые прикрепленные к диафрагме.



Рисунок 1.10 – Пример связанного тензодатчика

Основными ограничениями КНС преобразователя является необратимая временная нестабильность калибровочных характеристик и эффект гистерезиса который возникает под влиянием давления и температуры. Это связано с неоднородностью структуры и строгим контактом мембраны со структурными элементами датчика. Поэтому более осознанно подходить к выбору датчика на основе КНС и учитывать величину основной погрешности с учетом величины гистерезиса и дополнительной погрешности.

1.4 Обзор современных датчиков давления

Emerson Process Management датчик давления метран-150.

Датчик давления серии Метран-150 – это усовершенствованная версия датчиков Метран-100 с расширенным функционалом. Он предназначен для работы в автоматизированных системах управления технологическими процессами и обеспечивает непрерывное преобразование входного сигнала в аналоговый или цифровой сигнал. В этом случае входные значения определяются как абсолютное, избыточное давлением или разностью между данными давлениями [6].

Внешний вид датчика давления Метран-150 приведен на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Внешний вид цифрового датчика давления Метран-150

						<i>Лист</i>
						20
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>	<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	

Принцип работы датчика Метран-150:

Давление передается на чувствительный элемент тензодатчика через разделительную мембрану и разделительную жидкость. Чувствительный к давлению элемент деформируется, что приводит к изменениям электрического сопротивления его деформаций и дисбалансам в мостовой схеме. Электрический сигнал, генерируемый дисбалансом мостовой цепи, измеряется АЦП. Устройство АЦП обрабатывает аналоговые сигналы измерительного устройства, которые пропорциональны измеренному входу, давлению и температуре, и преобразует их в цифровые коды. Микроконтроллер принимает цифровые сигналы от устройства АЦП с поправочными коэффициентами, выполняет коррекцию и линейную оценку характеристик датчика, рассчитывает скорректированное значение выходного сигнала датчика и отправляет его в цифроаналоговый преобразователь (далее - ЦАП). Цифроаналоговый преобразователь преобразует цифровой сигнал с микроконтроллера в аналоговый выходной сигнал. Модем HART, установленный на микропроцессорной плате, предназначен для изоляции сигнала HART от токовой цепи 4-20 мА и преобразования его в стандартный цифровой сигнал.

Датчики выпускаются в двух исполнениях:

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

Фланцевые датчики серии Метран-150 имеют емкостную измерительную ячейку, которая полностью изолирована от воздействия электрических сигналов, температуры и механических ударов. В подходящих моделях модуль деформации имеет кремниевую подложку.

В таблице 1.1 представлены технические характеристики датчика давления.

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						<i>21</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

Таблица 1.1 – Технические характеристики датчика давления.

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.

После того как данный датчик поступает в эксплуатацию, пользователь сам может выбрать нужный для него тип выходного сигнала.

Endress Hauser датчик давления Deltabar S PMD 70:

Прибор Deltabar S PMD70 является преобразователем перепадов давления с использованием керамической или металлической мембраной. Данный датчик является многофункциональным, а так же высокоточным преобразователем давления, предназначенный для измерения перепада давления между двумя точками [7].

Области применения:

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

На рисунке 1.12 изображен внешний вид датчика давления Deltabar S PMD 70.



Рисунок 1.12 – Внешний вид датчика давления DeltabarSPMD 70

На рисунке 1.13 изображена измерительная диафрагма датчика давления.

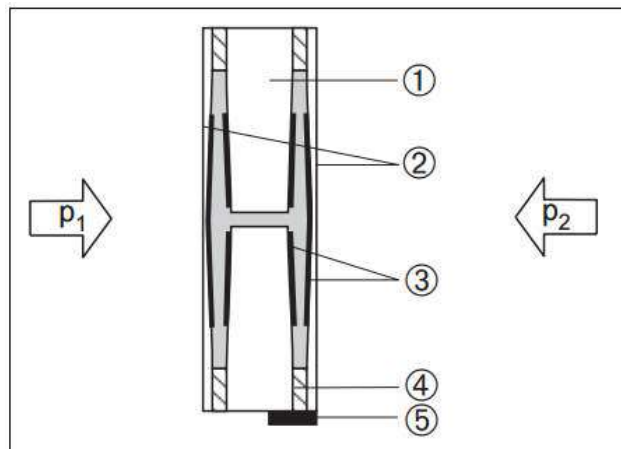


Рисунок 1.13 – Измерительная диафрагма датчика давления DeltabarSPMD 70

где 1) Корпус;

2) Диафрагма;

3) Электроды;

4) Стеклошлак, фиксирующий диафрагму на основе;

5) Датчик температуры.

Измерительная Керамическая ячейка основана на принципе плоского конденсатора с электродом и подвижным электродом на внутренней стороне диафрагмы. Обычно такая измерительная ячейка заполняется минеральным или силиконовым маслом. Перепад давления ($p_1 \neq p_2$) вызывает изменение обеих диафрагм. Оба значения электрической емкости преобразуются и передаются на микропроцессор трансмиттера в виде цифрового сигнала.

В таблице 1.2 представлены технические характеристики датчика давления.

Таблица 1.2 – Технические характеристики датчика давления.

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

Датчик давления EJX430В фирмы YOKOGAWA. Беспроводной датчик избыточного давления EJX430В предназначен для измерения избыточного давления различных сред: жидкости, газа и пара. Датчик питается от батареи аккумуляторного типа, что в свою очередь снижает стоимость установки датчика давления по сравнению со способом проводного подключения. Использование беспроводного датчика позволяет устанавливать его на постоянной или временной основе в тех местах, где их невозможно или неэкономично использовать. Беспроводная связь с 128 битным шифрованием позволяет безопасное использование датчика и обладает большим функционалом, включая самодиагностику и регулировку параметров устройства. Соединение устанавливается по протоколу ISA 100.11a [8].

На рисунке 1.14 представлен внешний вид рассматриваемого датчика давления.



Рисунок 1.14 – Датчика избыточного давления EJX430B

В серии преобразователей EJX отличительной особенностью является то, что в качестве чувствительного элемента используется механический кремниевый резонатор.

Принцип действия кремниевого резонатора:

При приложении давления на чувствительный элемент (резонатор) происходит его растяжение или сжатие, что вызывает изменение частоты его собственных механических колебаний. Колебания механического резонатора в постоянном магнитном поле преобразуются в колебания электрического контура, в результате чего на выходе чувствительного элемента появляется цифровой сигнал, который точно отражает значение измеренного давления.

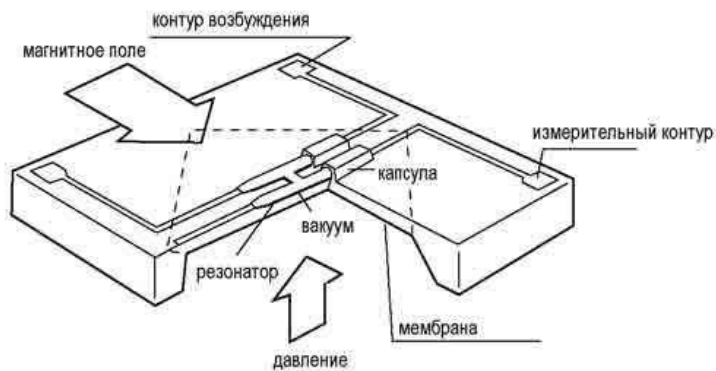


Рисунок 1.15 – Кремниевый резонатор датчика избыточного давления EJX430B

В таблице 1.3 представлены технические характеристики датчика.

Таблица 1.3 – Технические характеристики датчика давления.

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	$\pm 0,04\%$ шкалы.

Вывод по первой главе: В данной главе был произведен обзор существующих методов, эффектов и явлений которые используются или могут быть использованы при измерении давлений, а так же были рассмотрены современные датчики давления и их характеристики.

2 ИНТЕРФЕЙС «ТОКОВАЯ ПЕТЛЯ»

Для работы нашего датчика давления будем использоваться интерфейс Токовая петля 4-20 мА, так как, в разрабатываемой схеме используется аналоговые и цифровые значения выходной величины. Это связано с тем, что необходимо контролировать избыточное давление непосредственно на производстве. Помимо этого данный сигнал нужно передавать оператору на дальние расстояния.

Токовая петля 0-20 мА или токовая петля 4-20 мА представляет собой стандарт проводного интерфейса, в котором сигнал кодируется в виде аналогового тока. Ток 4 мА соответствует минимальному значению сигнала, а ток 20 мА соответствует максимальному значению сигнала. Компоненты токовой петли показаны на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Компоненты токовой петли 4-20мА

В типовом приложении напряжение датчика (часто милливольтного диапазона) преобразуется в токовый сигнал из диапазона 4-20 мА. Токовая петля использовалась во всех аналоговых системах еще до появления цифрового управления и заменяла пневматические системы управления в промышленных установках. Интерфейс используется в основном в промышленных приложениях, в которых датчик и контроллер или контроллер и актуатор расположены на

Другие проводные стандарты сложнее настраивать и обслуживать, они чувствительны к шуму, слабо защищены от взлома и отличаются высокой стоимостью реализации.

Создать беспроводную связь в промышленной среде вполне возможно, если речь идет о небольших расстояниях. Но при работе на больших дистанциях возникают трудности, связанные с необходимостью многоуровневой фильтрации, реализацией механизмов обнаружения и исправления ошибок, что приводит также и к избыточности данных. Все это увеличивает стоимость и риск разрыва связи.

Такое решение вряд ли оправдано, если требуется всего лишь подключить простой датчик температуры или контроллер клапана/двигателя.

Сигнал токового контура преобразуется в напряжение следующим образом: ток проходит через резистор, а получаемое падение напряжения усиливается с помощью операционного или дифференциального усилителя. По разным причинам для резистора токовой петли было выбрано стандартное значение сопротивления 250 Ом. Таким образом, сигналу 4 мА соответствует напряжение 1 В, а сигналу 20 мА соответствует напряжение 5 В. Напряжение 1 В оказывается достаточно большим по сравнению с фоновым шумом и может быть легко измерено. Напряжение 5 В также является весьма удобным и лежит в диапазоне допустимых значений для большинства аналоговых схем. В то же время, максимальная мощность, рассеиваемая на резисторе токовой петли (I^2R), составляет всего 0,1 Вт, что приемлемо даже для устройств с ограниченными возможностями по отводу тепла.

Токовая петля позволяет передавать цифровые данные. Результаты измерений от датчика можно посылать не в виде аналогового непрерывного сигнала, а в виде дискретных токовых сигналов. Типовая разрядность данных при этом составляет от 12 до 16 бит. Иногда используют разрядность 18 бит, но это скорее является исключением, так как для обычных промышленных систем вполне хватает и 16 бит. Таким образом, токовая петля может быть интегрирована в цифровые системы управления.

									<i>Лист</i>
									29
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>	<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>				

Для выполнения обмена цифровыми данными будет недостаточно простой пересылки битов в виде токовых импульсов. Необходимо каким-то образом сообщать пользователю, когда начинается и заканчивается пакет данных. Кроме того, требуется контролировать появление ошибок и выполнять некоторые другие функции. Таким образом, для передачи цифровых данных с помощью токовой петли требуется определить формат кадров и реализовать соответствующий протокол передачи.

HART – общепринятый стандарт, который оговаривает не только физическое кодирование битов, но определяет формат и протокол передачи данных. Например, в формате кадра используются различные поля: многобайтовая преамбула, стартовый байт, многобайтовый адрес, поле команды, поле данных, поле, указывающее количество байтов данных, фактические данные и, наконец, контрольная сумма.

Разработка HART была инициирована Rosemount Corp в 1980-х годах, и вскоре он стал отраслевым стандартом де-факто. Обозначение HART (Highway Addressable Remote Transducer) было закреплено в 1990-х годах, когда стандарт стал открытым и даже был реализован в виде стандарта МЭК для использования в Европе. HART претерпел три основных модификации, но сохранил обратную совместимость со всеми предыдущими версиями, что является крайне важным для рынка промышленной электроники.

Дополнительной особенностью HART является включение информации о производителе электронного устройства в поле команды. Эта информация позволяет избежать путаницы при выполнении установки, отладки и документирования, так как существует более 100 поставщиков HART-совместимых устройств.

Использование байтового поля адреса позволяет одной токовой петле работать с множеством подключенных датчиков, поскольку каждому датчику может быть присвоен уникальный номер. Это приводит к значительной экономии средств,

					<i>Лист</i>
					<i>30</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>	<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>

затрачиваемых на прокладку проводов и монтаж по сравнению с соединением точка-точка.

Подключение множества устройств к одной общей токовой петле означает, что эффективная скорость передачи данных для каждого отдельного устройства уменьшается. Однако чаще всего это не является проблемой. Дело в том, что в большинстве промышленных приложений обновление данных и передача команд происходит довольно редко – порядка одного раза в секунду. Например, температура - наиболее часто измеряемая физическая величина- как правило, меняется достаточно медленно.

Таким образом, стандарт HART делает токовую петлю 20 мА востребованной даже в век цифровых технологий.

Токовая петля использует диапазон сигналов 4-20 мА. Источник тока может находиться в передатчике или приемнике. В то же время и датчику, и актуатору требуется дополнительный источник для питания собственной электроники (АЦП, усилители, драйверы и т.д.). Это приводит к усложнению монтажа и увеличению стоимости.

Однако по мере развития интегральных технологий потребление приемников и передатчиков уменьшалось. В результате появилась реальная возможность питания устройств непосредственно от токовой петли. Если потребление электронных компонентов, входящих в состав датчика или актуатора, не превышает 4 мА, то нет необходимости в дополнительном источнике питания. Пока напряжение сигнального контура достаточно велико, интерфейс токовой петли может питать сам себя.

Многие устройства с питанием от сигнальных линий должны иметь разрешение на использование во взрывоопасных зонах. Например, они должны быть сертифицированы, как невоспламеняющиеся (N.I.) или искробезопасные (I.S.). Для устройств любого из этих классов требуется, чтобы энергии, потребляемой электроникой, было так мало, чтобы ее не хватало для возгорания как при нормальных условиях эксплуатации, так и при авариях. Потребляемая мощность

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						31
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

устройств с питанием от токовой петли столь мала, что они обычно без проблем проходят данную сертификацию.

2.1 Электрическая схема токовой петли

Для передачи данных с аналогового датчика используется аналоговый интерфейс токовой петли. Для этого в схеме необходим источник, превращающий напряжение в ток (в том случае если сигнал с первичного преобразователя в виде напряжения) с линейной зависимостью, для того в схему включен операционный усилитель. Т.к. ОУ, охваченный обратной связью, стремится уравнять свои входы, т.е. напряжение между прямым и инверсным входом равно нулю, то можно считать, что U_{in} засажен напрямую на R_0 . И ток через R_0 получается равным U_{in}/R_0 . Сопротивление входов ОУ настолько большое, что можно считать, что ток туда не втекает. А так как R_0 часть петли, то ток в петле будет равен току R_0 , вне зависимости от сопротивления линии и сопротивления нагрузки. В качестве источника питания можно взять независимый стабилизированный источник на 15 В. На другой стороне петли достаточно снять падение напряжения на резисторе нагрузки R_n .

На рисунке 2.2 приведена схема токовой петли.

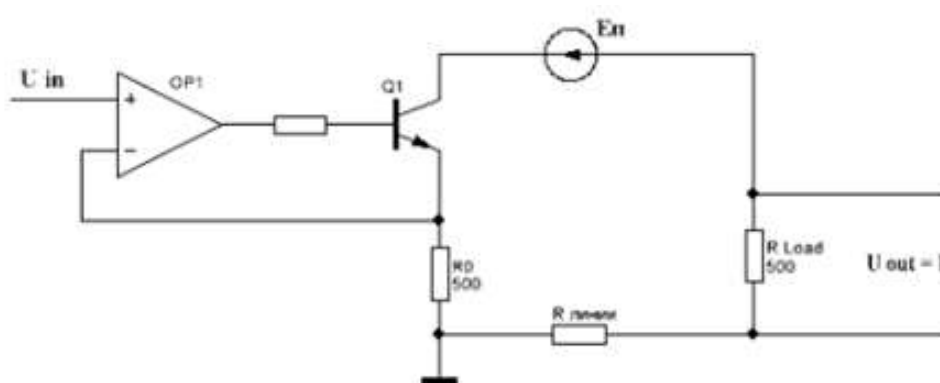


Рисунок 2.2 – Электрическая схема токовой петли

Схема более точной передачи данных, которая показана на рисунке 2.3.

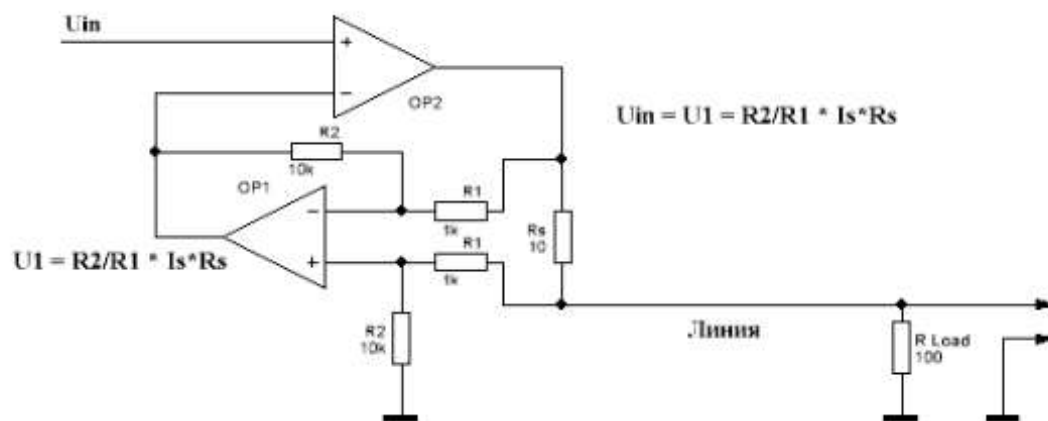


Рисунок 2.3 – Схема более точной передачи данных

В данной схеме есть специальный измерительный резистор R_s , и на нем ОУ измеряем падение напряжения, потом данное напряжение поступает на вход во второй ОУ. Т.к. конструкция из ОУ1 является для ОУ2 обратной связью, а он выводит разность на своих входах в ноль, то получаем, что:

$$U_{in} = \frac{R_2}{R_1} * I_s * R_s,$$

$$R_2 = 10k,$$

$$R_1 = 1k,$$

$$R_s = 10,$$

Получаем зависимость:

$$I_s = \frac{U_{in}}{100},$$

Данная зависимость имеет хорошую линейность, особенно если взять прецизионные усилители с Rail-2-Rail выходом. Если нужна максимальная точность, то лучше применить готовую микросхему. Существует и масса специализированных формирователей токовой петли, например MAX15500.

Гальваническую развязку аналоговой токовой петли можно сделать на изолирующих усилителях, например на ISO124. Сама схема гальванической развязки показана на рисунке 2.4.

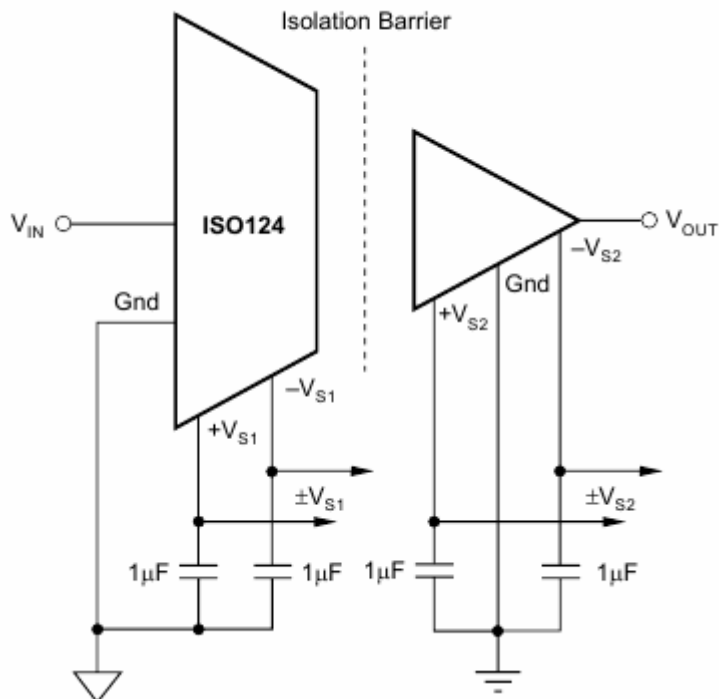


Рисунок 2.4 – Схема гальванической развязки

2.2 Поиск патентных решений

Maxim Integrated MAX12900 представляет собой малопотребляющий высокоинтегрированный аналоговый интерфейс (AFE) для токовой петли 4-20 мА, который представлен на рисунке 2.5.

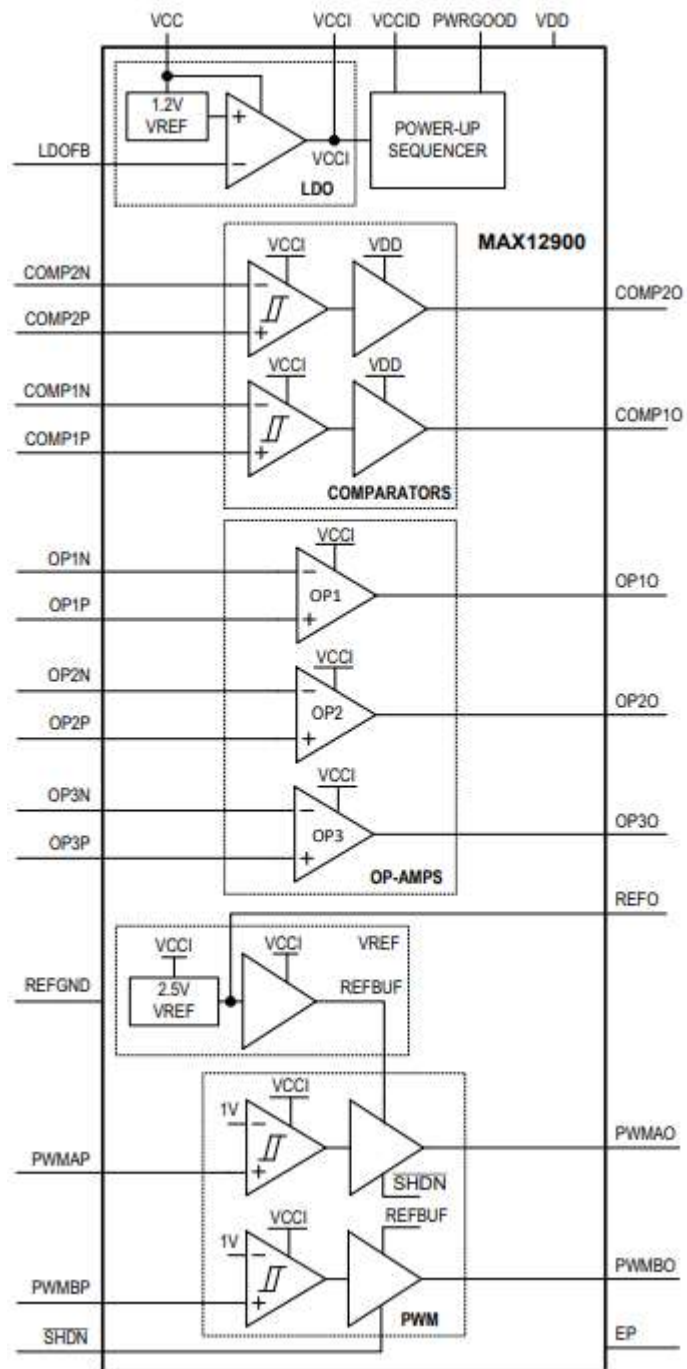


Рисунок 2.5 – MAX12900 – малопотребляющий высокоинтегрированный аналоговый интерфейс (AFE) для токовой петли 4-20 мА

MAX12900 обеспечивает не только передачу данных, но и питание напрямую от токовой петли. Микросхема объединяет в одном корпусе множество функциональных блоков: стабилизатор напряжения LDO; две схемы для формирования ШИМ-сигналов; два малопотребляющих и стабильных ОУ общего назначения; один широкополосный ОУ с нулевым смещением; два

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

обратной полярности, а защита входов токовой петли отвечает требованиям IEC61000-4-2 и IEC61000-4-4 (Рисунок 2.7).

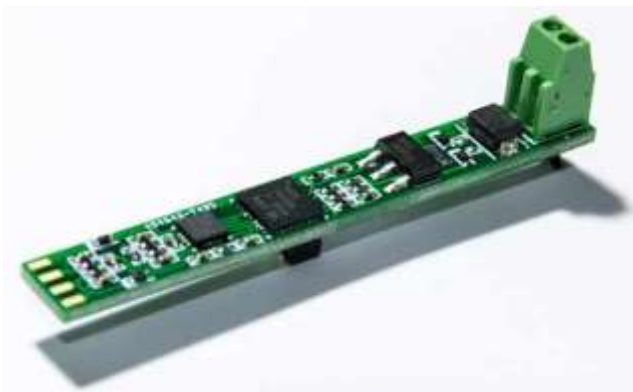


Рисунок 2.7 – Модуль Smart Analog Combo

Двухпроводной (питающийся от токовой петли) формирователь выходного сигнала способен с установленной точностью поддерживать ток петли в диапазоне 4...20 мА (Рисунок 18).

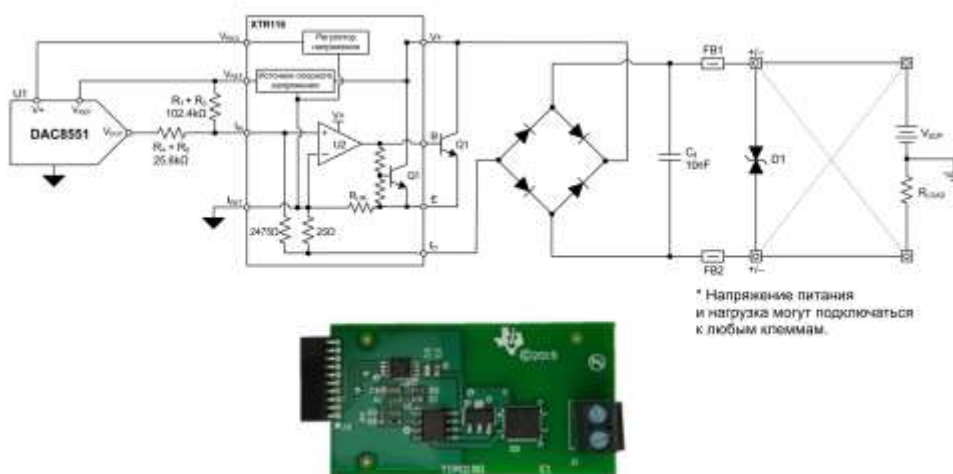


Рисунок 2.8 – Двухпроводной формирователь выходного сигнала

Описанная конструкция также включает схемные решения для защиты от помех, согласно IEC61000-4 (в России действует ГОСТ Р 51317.4), а также мостовой выпрямитель, обеспечивающий функциональную независимость устройства от полярности питающего напряжения [11].

Конструкция передатчика должна соответствовать следующим требованиям:

- напряжение питания ≤ 36 В;
- вход трехпроводной SPI;
- выход 4...20 мА с максимальной допустимой полной погрешностью без регулировки (TUE) 0,5% длины шкалы;
- выходное напряжения передатчика токовой петли до 12 В;
- обеспечение успешного прохождения испытаний на ЭМС согласно IEC61000-4 (ГОСТ Р 51317.4) с минимальным влиянием на точность системы.

Упрощенная форма преобразователя напряжения в ток показана на Рисунке 2.9.

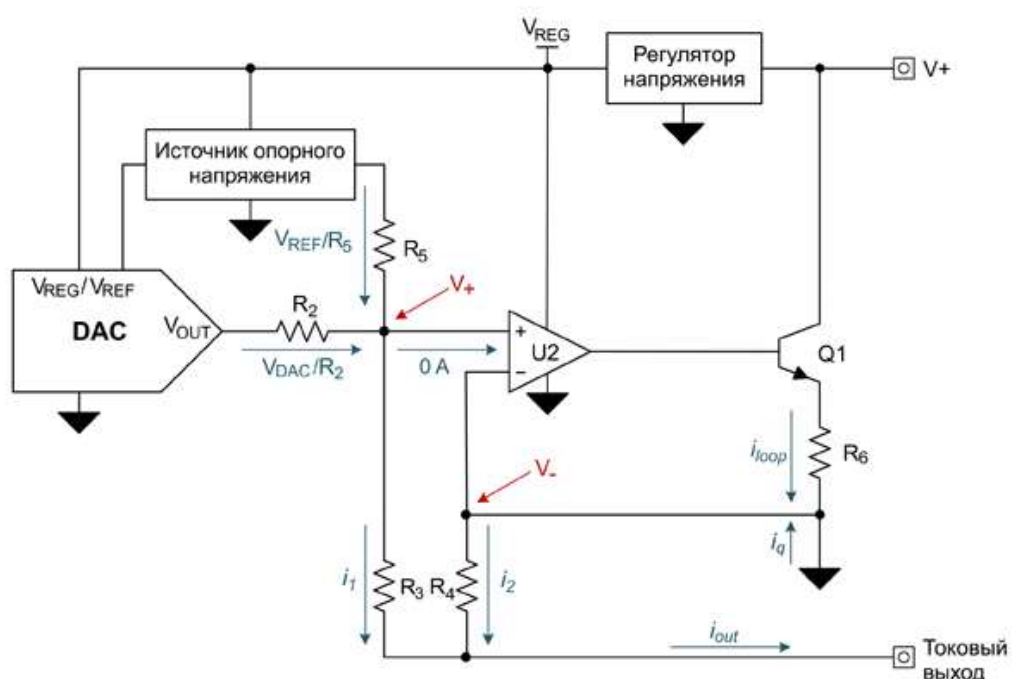


Рисунок 2.9 – Упрощенная схема преобразования напряжения в ток

Такую конструкцию обычно называют двухпроводным передатчиком токовой петли 4-20 мА с питанием от самой токовой петли. Передатчик имеет только две клеммы: для подключения питания и для подключения выходного соединения. Он работает в режиме ведомого и поддерживает связь с ведущим узлом, – модулем аналоговых входов ПЛК, – путем точного управления величиной своего выходного тока. В соответствии с требованиями стандартов связи типа токовая петля 4-20 мА суммарная токовая нагрузка, потребляемая передатчиком, не должна превышать 4 мА [12].

Наличие отрицательной обратной связи операционного усилителя $U1$ способствует поддержанию уровней напряжения на инвертирующем ($V -$) и неинвертирующем ($V +$) входах операционного усилителя на одинаковом уровне. В схеме передатчика инвертирующий вход ($V -$) операционного усилителя напрямую подключен к локальной земле, следовательно, потенциал на неинвертирующем ($V +$) входе также близок к потенциалу локальной земли. Это означает, что разность потенциалов на резисторе $R2$ соответствует выходному напряжению ЦАП (V_{OUT}), а разность потенциалов на резисторе $R5$ равняется опорному напряжению (V_{REF}). По резисторам $R2$ и $R5$ протекают токи. В соответствии с первым правилом Кирхгофа, по резистору $R3$ протекает ток I_1 , который можно рассчитать по формуле:

$$i_1 = \frac{V_{DAC}}{R_2} + \frac{V_{REF}}{R_5}.$$

Для того чтобы напряжения на входах операционного усилителя были равны друг другу, необходимо, чтобы ток i_2 , протекающий по резистору $R4$, создавал на нем такое же падение напряжения, что и ток i_1 создает на резисторе $R3$. Ток покоя i_q компонентов схемы (регулятора, усилителя, ЦАП и других) составляет некоторую часть тока i_2 . Затем операционный усилитель воздействует на базу биполярного транзистора с n-p-n-переходом $Q1$ для создания недостающего тока i_{loop} , необходимого для того чтобы привести падение напряжения на резисторах $R3$ и $R4$ к одному уровню [13].

Так как падения напряжений на резисторах $R3$ и $R4$ равны, то изменение значений сопротивления этих резисторов приведет к изменению токов, протекающих по каждому из них. Как следствие, появляется возможность увеличения тока, протекающего через резистор $R4$, за счет управления соотношением сопротивлений резисторов $R3$ и $R4$, согласно формуле:

$$V_+ = i_1 \times R_3,$$

$$V_- = i_2 \times R_4,$$

$$V_+ = V_-,$$

$$i_2 = \frac{i_1 \times R_3}{R_4}.$$

Положительный эффект от увеличения тока через резистор R4 заключается в том, что большая часть выходного тока формируется непосредственно из петли через транзистор Q1, а не через элементы входного каскада. Все это, а также использование компонентов с малым энергопотреблением обеспечивает низкое потребление тока. Токи i_1 и i_2 складываются и формируют выходной ток i_{out} , как описано в формуле:

$$i_{OUT} = i_1 + i_2 = \frac{V_{DAC}}{R_2} + \frac{V_{REF}}{R_5} + \frac{R_3}{R_4} \times \left(\frac{V_{DAC}}{R_2} + \frac{V_{REF}}{R_5} \right),$$

$$i_{OUT} = \left(\frac{V_{DAC}}{R_2} + \frac{V_{REF}}{R_5} \right) \times \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right).$$

Полная передаточная функция, где в роли переменной выступает входной код ЦАП, описывается формулой:

$$i_{OUT}(CODE) = \left(\frac{V_{DAC} \times CODE}{2^N \times R_2} + \frac{V_{REF}}{R_5} \right) \times \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right).$$

где N – разрядность ЦАП.

Резистор R6 служит для уменьшения коэффициента усиления транзистора Q1 и, следовательно, уменьшения коэффициента петлевого усиления преобразователя напряжения в ток, что способствует получению схемы с более стабильными параметрами. Сопротивление резисторов R2, R3, R4 и R5 выбирается в

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						40
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

соответствии с диапазоном выходных напряжений ЦАП, напряжением регулятора и требуемого диапазона выходных токов.

Конструкция передатчика предусматривает наличие регулятора напряжения для понижения напряжения питания, – обычно 24 В, – до уровня, соответствующего напряжению питания точных аналоговых компонентов. В качестве регулятора напряжения могут использоваться линейные регуляторы с малым падением напряжения, DC/DC-преобразователи или шунтирующие регуляторы [14].

Промышленная среда может быть очень опасной для чувствительных электронных компонентов. Существуют схемотехнические решения, которые позволяют защитить оборудование от возможных поломок, вызванных неправильным подключением внешних источников, а также избежать губительного влияния опасных электромагнитных возмущений, спровоцированных работой находящегося рядом оборудования. Использование некоторых из таких решений позволяет значительно повысить надежность электронных систем. На рисунке 2.10 показано одно из таких решений, применяемое для нашего передатчика.

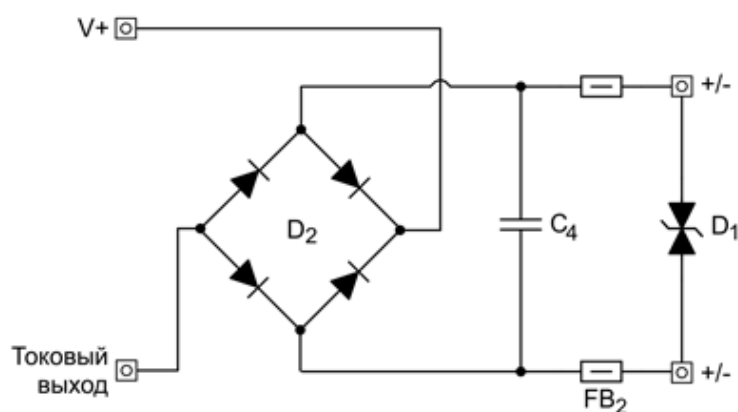


Рисунок 2.10 – Диодный мост и защитные элементы

Защита от подключения напряжения питания обратной полярности обеспечивается включением в схему диодного моста. Два диода расположены таким образом, что их катоды соединены со входом напряжения положительной

полярности передатчика, а аноды – с каждой из двух клемм для внешнего подключения. Соответственно, другие два диода расположены таким образом, что их аноды подключены к выходу передатчика, а катоды – к каждой из клемм для внешнего подключения. Такое решение позволяет передатчику сохранять работоспособность при любой полярности питающего напряжения, тем самым защищая схему от повреждений в результате ошибок во время монтажа или ремонта проводов токовой петли [15].

Выходным напряжением называют максимальное напряжение, которое может поддерживаться на выходных клеммах передатчика токовой петли при условии, что выходной ток передатчика находится в рабочей области. Следующая формула позволяет определить максимально допустимую нагрузку передатчика или минимальное напряжение питания, необходимое для работы с этой нагрузкой:

$$\text{Compliance Voltage} \leq V_{SUP} \times i_{OUT} \times R_{LOAD}.$$

Выходное напряжение передатчика зависит от двух факторов: режима работы транзистора Q1 и требований к напряжению питания регулятора напряжения. Как правило, транзистор находится в нормальном активном режиме работы, но существует вероятность перехода в режим отсечки или насыщения. Инверсный режим работы транзистора невозможен благодаря наличию в схеме диодного моста, предотвращающего попадание на входы передатчика напряжения обратной полярности.

Ток эмиттера транзистора создает падение напряжения на резисторе R6, которое, в свою очередь, соответствует напряжению эмиттера. Рост этого напряжения может привести к переходу транзистора в режим отсечки. Для поддержания нормального активного режима необходимо повышать напряжение базы – выходное напряжение компаратора U2 – пропорционально росту напряжения эмиттера. При определенных условиях выходное напряжение может достичь предела и транзистор Q1 все-таки перейдет в режим отсечки. Для того

									Лист
									42
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ				

чтобы избежать такой ситуации и повысить устойчивость работы схемы, выбирают резистор R6 с небольшим номинальным сопротивлением.

Есть вероятность, что транзистор Q1 перейдет в режим насыщения, но, как правило, напряжение «коллектор-эмиттер» меньше чем напряжение, необходимое для работы регулятора напряжения. Следовательно, величина выходного напряжения передатчика в большей степени определяется величиной напряжения питания регулятора напряжения, которое зависит от сопротивления резистора R4, сопротивления нагрузки и сопротивления соединительных проводов.

Для реализации передатчика токовой петли 4-20 мА используются компоненты с малым энергопотреблением. На рисунке 2.11 показана подробная схема передатчика с указанием величин дискретных компонентов и конкретных интегральных схем, используемых в проекте.

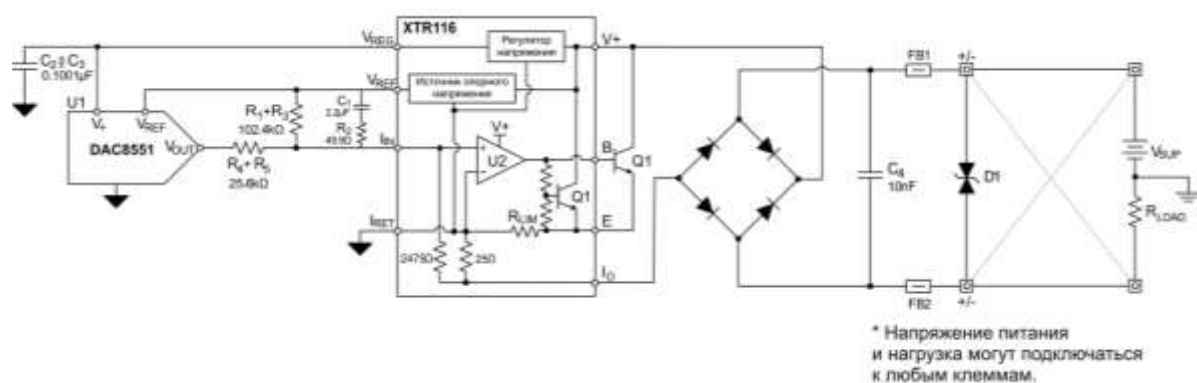


Рисунок 2.11 – Подробная схема передатчика

XTR116 – это полноценный буферный процессор для передатчика токовой петли с питанием от петли, используемый в системах промышленной автоматизации и АСУ ТП. В его состав входят: регулятор напряжения 5 В, источник опорного напряжения 4,096 В и цепь преобразования напряжения в ток. Выходные напряжения регулятора и источника опорного напряжения могут использоваться для питания ЦАП или датчиков, осуществляющих формирование входного напряжения XTR116. Максимальная допустимая полная погрешность без регулировки XTR116 составляет 0,25% длины шкалы относительно его входного

напряжения. Дополнительная погрешность возникает из-за неточности установления опорного напряжения [16].

Погрешность ЦАП снижает точность всей измерительной системы в целом, поэтому тип ЦАП подбирают таким образом, чтобы его погрешность была меньше или соизмерима с погрешностью XTR116. Погрешность смещения, усиления, а также показатели дифференциальной и интегральной нелинейностей ЦАП формируют суммарную погрешность, которая должна соответствовать максимально допустимой полной погрешности без регулировки XTR116, равной 0,25% длины шкалы. Для правильного сопряжения с XTR116 необходим ЦАП с напряжением питания 5 В и опорным напряжением 4,096 В. Для данной схемы выбран ЦАП DAC8551 с максимально допустимой полной погрешностью 0,33% длины шкалы и потребляемым током 250 мкА в номинальном режиме работы. DAC8551 хорошо работает с источником питания 5 В и опорным напряжением 4,096 В от XTR116.

Двунаправленный TVS-диод используется для шунтирования высоковольтных помех и перенаправления их энергии в землю. Такие диоды имеют следующие характеристики: рабочее напряжение, напряжение пробоя, ток утечки и номинальную мощность. Значение рабочего напряжения определяет максимальную величину напряжения, под которым диод способен находиться длительное время, не переходя в режим пробоя. На вольт-амперной характеристике диода рабочее напряжение соответствует точке перегиба, в которой через диод начинает протекать небольшой ток утечки. При увеличении напряжения выше рабочего через диод протекает больший ток. Рабочее напряжение TVS-диода должно превышать верхний допустимый предел напряжения питания [17].

Напряжение пробоя TVS-диода должно быть достаточно малым, для того чтобы обеспечить защиту всех компонентов передатчика, подключенных к выходным клеммам, а также иметь некоторый запас по напряжению для продолжения защиты в момент, когда через диод потечет ток и его напряжение

высокоточными, чтобы обеспечить точность работы передатчика. Это касается резисторов, используемых для регулирования коэффициента усиления (R4 и R5) и коэффициента смещения (R1 и R3). Резистор R2 и конденсатор C1 включены для стабилизации опорного напряжения, и их точность не критична.

Приводим расчет погрешностей передатчика токовой петли, выполненный на основании неопределенностей, указанных в документации на каждый компонент, используемый в схеме. Расчеты выполнены при условии работы оборудования при комнатной температуре [18].

ЦАП вносит в систему погрешности трех видов, это погрешность смещения, погрешность усиления, а также погрешность, связанная с нелинейностью передаточной характеристики ЦАП. Все эти составляющие описаны в документации на ЦАП. Так как погрешности ЦАП являются некоррелированными, то есть не связанными величинами, суммарную погрешность определим как корень из суммы квадратов:

$$TUE_{DAC} = \sqrt{OffsetError_{DAC}^2 + GainError_{DAC}^2 + LnearityError_{DAC}^2},$$

Как и ЦАП, преобразователь напряжения в ток XTR116 вносит в работу системы погрешности смещения и, усиления, а также погрешность, связанную с нелинейностью передаточной функции. Каждая из этих погрешностей является некоррелированной величиной. Суммарную погрешность определяем как корень из суммы квадратов:

$$TUE_{XTR116} = \sqrt{OffsetError_{XTR116}^2 + GainError_{XTR116}^2 + LnearityError_{XTR116}^2},$$

В состав XTR116 входит источник опорного напряжения, который также вносит дополнительную погрешность в работу передатчика. Он является и источником опорного напряжения для ЦАП, а, следовательно, точность его работы влияет на погрешность усиления ЦАП, а также на линейность передаточной

функции ЦАП, потому что точность установления величины младшего разряда связана с точностью установления опорного напряжения. Опорное напряжение используется для установления тока смещения резисторами R1 и R3 и тем самым влияет на погрешность усиления преобразователя напряжения в ток. Как мы видим, погрешности, связанные с неточностью установления опорного напряжения, связаны с коэффициентом корреляции +1, то есть вычисление общей погрешности сводится к алгебраической сумме ее составляющих [19].

Резисторы R3, R4 и опорное напряжение используются для создания тока смещения во время калибровки системы. Погрешность этих резисторов вносит вклад в общую погрешность смещения:

$$TUE_{Resistors} = \sqrt{OffsetError_{Resistors}^2 + GainError_{Resistors}^2 + LinearityError_{Resistors}^2}$$

Общая суммарная погрешность передатчика может быть определена как корень из суммы квадратов отдельных ее составляющих, которые описаны выше и являются некоррелированными величинами.

Вывод по второй главе: В данной главе был произведен обзор интерфейса токовой петли 4-20 мА который будет работать в датчике давления на базе отечественных элементов с процессором Миландр К1986ВЕ92Q1. Существует несколько причин использования данного интерфейса вместо классических (RS-232, RS-485 и т.д). Во-первых, низкоомный контур в токовой петле обеспечивает высокую стойкость к внешним шумам. В соответствии с законом Кирхгофа сумма токов замкнутого контура равна нулю. По этой причине в токовой петле невозможно ослабление или усиление тока. На практике питание токовой петли осуществляется от источника напряжения 12 до 30 В, но электроника передатчика преобразует напряжение в ток.

3 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

3.1 Принципиальная схема датчика давления.

Принципиальная схема датчика давления представлена на рисунке 3.1.

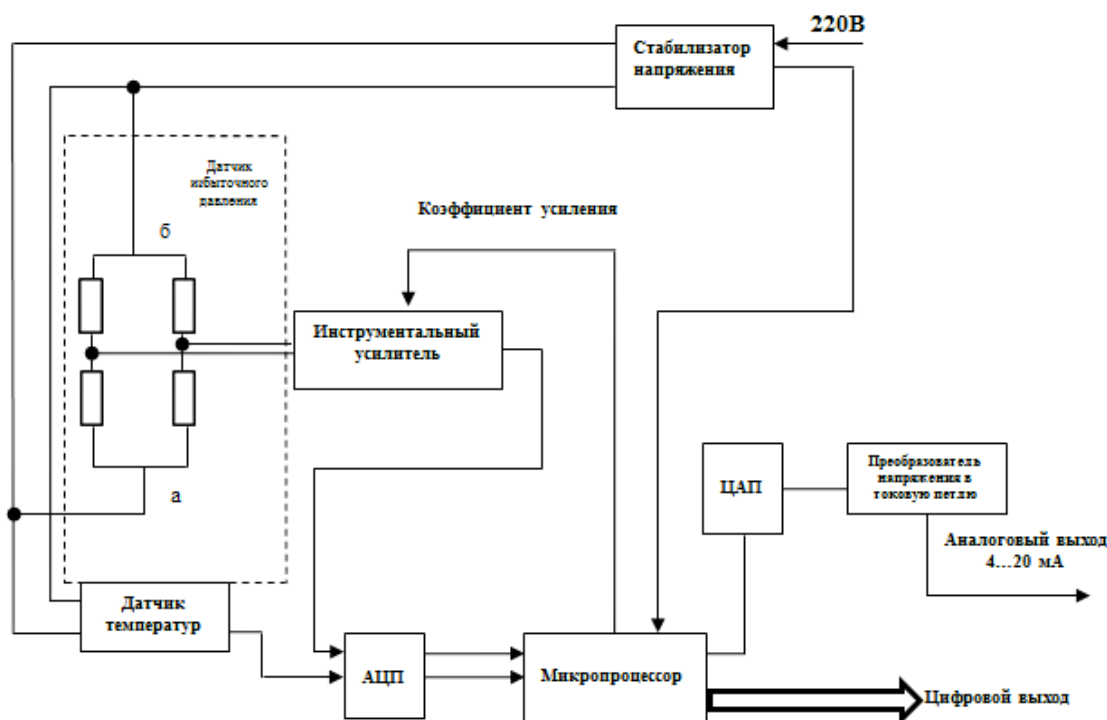


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема датчика давления.

В качестве чувствительного элемента используется измерительная упругая мембрана и наклеенный на нее тензорезистор.

Тензорезистор — это полупроводниковый резистор, значение сопротивления которого зависит от его деформации. Он состоит из чувствительного элемента в виде зигзагообразного проводника, который нанесен на гибкую подложку.

Схема начинает свою работу при поступлении на вход стабилизатора напряжения 220В.

Функциональная схема состоит из следующих элементов:

Стабилизатор напряжения — служит для питания схемы, а также для получения высоких метрологических характеристик в широком диапазоне рабочих температур. Питание измерительного моста, датчика температуры осуществляется

импульсным напряжением от стабилизатора напряжений. Это напряжения поступает на выводы *a* и *b* измерительного моста.

Датчик избыточного давления — служит для регистрации основного сигнала (избыточного давления). Он состоит из измерительной упругой мембраны, которая под действием давления прогибается. На мембрану наклеивается один тензорезистор, который под действием давления так же прогибается и изменяет величину сопротивления. В результате изменяется сопротивление всего измерительного моста.

Так как сигнал с выходной диагонали моста довольно мал, то перед тем как его подать на АЦП его необходимо усилить. Для этого используется инструментальный усилитель.

Для компенсации температурной погрешности датчика избыточного давления используется датчик температуры, прикрепленный к корпусу датчика давления.

Сигналы с выхода дифференциального усилителя и датчика температуры поступает на входы АЦП. Где преобразуются в цифровой сигнал.

С выхода АЦП цифровые значения сигнала с датчиков поступают на микропроцессор.

Далее микропроцессор:

- Производит регистрацию значений температуры, избыточного давления.
- Вычисляет величину погрешности вносимые температурой и атмосферным давлением.
- Выводит цифровое значение на дисплей.

После микроконтроллера на ЦАП поступает цифровая величина, которую он преобразует в аналоговую.

Далее выходная величина с ЦАП поступает на преобразователь напряжения в ток, для вывода значения в стандарте 4..20 мА.

В разрабатываемой схеме используется цифровое и аналоговое значение выходной величины. Это связано с тем, что необходимо контролировать избыточное давление непосредственно на производстве. Помимо этого данный

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						49
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

сигнал нужно передавать оператору на дальние расстояния. Поэтому используют токовую петлю 4..20 мА, так как данная передача сохраняет точность измеряемой величины, за счет исключения погрешности от проводов. Данный тип передачи считается типовым.

Минимальное давление, которое может зарегистрировать датчик давления, можно вычислить исходя из разрядности АЦП. Выберем микроконтроллер – К1986ВЕ92Q1

Вычислим цену деления АЦП:

$$c = \frac{1}{2^n - 1},$$

где $n = 12$, т.к. выбранный АЦП 12-битный.

Умножив c на максимальное давление датчика, получим минимальное давление:

$$p_{min} = \frac{p_{max}}{2^n - 1},$$

$$p_{max} = 5 \text{ МПа},$$

$$p_{min} = \frac{5000000}{2^{12} - 1} = 1221 \text{ Па}.$$

Таким образом нижняя граница диапазона измеримого давления составляет 1221 Па.

Рассчитанный диапазон измеряемых давлений 1221 Па – 5 МПа.

Согласно ГОСТ 22520-85 Датчики давления, разрежения, и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП выберем стандартный диапазон измерения: от 1,6 кПа до 4 Мпа [20].

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						50
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

3.2 Выбор микроконтроллера. Технические характеристики МК

Мной был выбран российский микроконтроллер фирмы Миландр K1986BE92QI, технологические характеристики выбранного микроконтроллера приведены на рисунке 3.2.

	<u>1986BE91T</u> <u>1986BE94T</u>	1986BE92Y, K1986BE92QI	<u>1986BE93Y</u>
Корпус	4229.132-3, LQFP144,100 (**)	H18.64-1B, LQFP64	H16.48-1B
Ядро	ARM Cortex-M3		
ПЗУ	128 Кбайт Flash		
ОЗУ	32 Кбайт		
Питание	2.2...3.6В		
Частота	80 МГц		
Температура	минус 60°C...+125°C (**)		
USER IO	96	43	30
USB	Device и Host FS (до 12 Мбит/с), встроенный PHY		
UART	2	2	2
CAN	2	2	2
SPI	2	2	1
I2C	1	1	нет
2xADC 12 разрядов 1 Мвыб/с	16 каналов	8 каналов	4 канала
DAC 12 разрядов	2	1	1
Компаратор	3 входа	2 входа	2 входа
Внешняя шина	32 разряда	8 разрядов	нет

Рисунок 3.2 – Технические характеристики микроконтроллеров

Микроконтроллеры российского производства, семейства K1986BE9x:

Микроконтроллеры серии 1986BE9x, является отечественным аналогом микроконтроллерам серии STM. В качестве ядра данного микроконтроллера используется всем известный Cortex-M3. В микроконтроллер встроена ПЗУ объемом 128 Кбай и ОЗУ объемом 32 Кбайт. Рабочей частотой микроконтроллера считаются частоты до 80 МГц. UART, SPI и I2C являются стандартным интерфейсом микроконтроллера, имеющие скорость работы передачи 12 Мбит/с и 1,5 Мбит/с, контроллера внешней системной шины, которая позволяет работать со

стабильными статическими ПЗУ и ОЗУ, а так же другими внешними устройствами. Микроконтроллер включает в себя три 16-разрядных таймера у которых имеется 4 канала для схем захвата и ШИМ с способная выполнять функцию формирования «мертвых зон» и аппаратную блокировку.

Микроконтроллер имеет встроенные RC генераторы HSI и LSI а так же внешние генераторы HSE и LSE. Так же присутствуют схемы умножения тактовой частоты для ядра PLL и интерфейса USB. Две схемы тактовой частоты делают возможным применять гибкие настройки скорости работы микроконтроллера.

Архитектура системы памяти позволяет уменьшить потенциальные конфликты во время работы системы и повысить общую производительность благодаря матрице системных шин. Одной из основных задач контроллера DMA является процесс ускорения обмена информацией без участия ядра процессора между оперативной памятью и периферией.

Также в микроконтроллере имеется 24-х разрядный системный таймер с двумя таймерами управления. Кроме того микроконтроллер включает в себя два 12-битный высокоскоростных АЦП способных преобразовать информации в цифровой формат от 8 внешних каналов, а так же от встроенного датчика опорного напряжения и температуры. Так же имеется встроенный ЦАП обладающий разрядностью в 12-битов и компаратор, обладающий двумя входами и внутренней шкалой напряжений [21].

Регулятор мощности для внутреннего цифрового блока вырабатывает 1,8 В и не требует дополнительных внешних элементов. Таким образом, для работы микроконтроллера достаточно внешнего напряжения от 2,2 до 3,6 В. Микроконтроллер также реализует внешний домен с питанием от батареи, для работы в реальном времени и хранения определенных данных при отсутствии основного источника питания. Встроенные детекторы напряжения могут контролировать уровень мощности внешней сети, а также уровень напряжения аккумулятора. В случае сбоя питания, схемы аппаратного сброса оборудования,

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						52
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

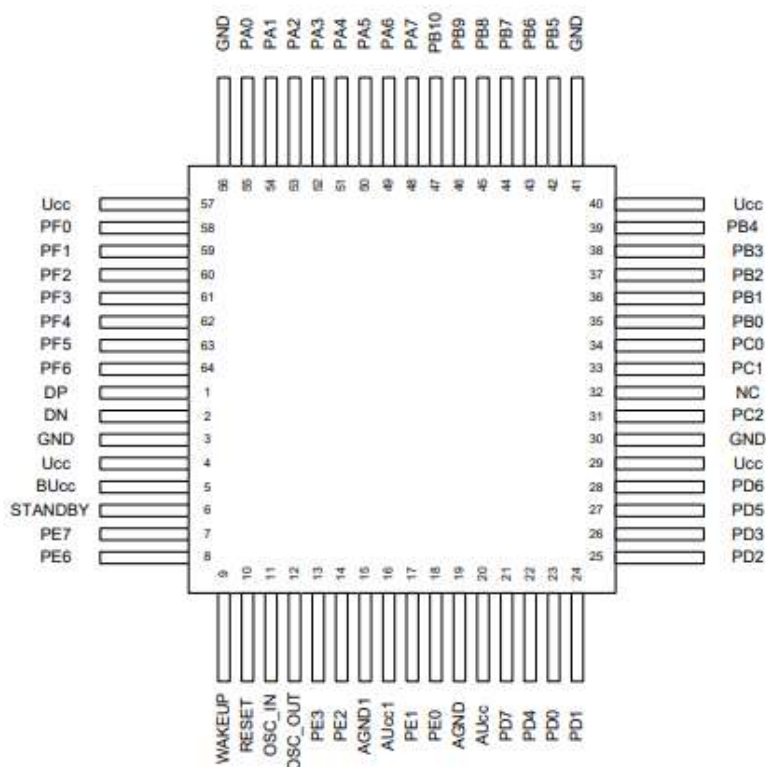


Рисунок 3.4 – Расположение выводов в 64-х выводном корпусе N18.64-1B

типы выводов питания микроконтроллеры данной серии обладают следующими особенностями:

выводы U_{CC} : за основное питание микросхемы отвечает данный вывод. Входное значение напряжения на данном выводе должно быть в пределах от 2,2-3,6 В. Если используется аналогово-цифровые преобразователи или же цифро-аналоговые, то входное напряжение не должно выходить за предел от 2,4 до 3,6 В. Если соединение осуществляется через интерфейс USB, входное напряжение должно быть в диапазоне 3,0-3,6 В.

выводы GND: данный вывод является основным для общего питания.

выводы AGND: аналоговый вывод для общего питания AU_{CC} . Эти контакты должны быть подключены к заземлению, но при этом должны быть приняты меры по снижению шума в цепи.

выводы AU_{CC} и AU_{CC1} : с точки зрения помехоустойчивости данные выводы являются наиболее требовательными. Данные выводы включают аналоговую периферию микроконтроллер, включая физическую часть интерфейса USB,

поэтому при проектировании схемы, тогда нужно работать с АЦП, ЦАП, внутренним компаратором или схемой USB. Рекомендуется обеспечить дополнительную изоляцию от основного напряжения. В данном случае эту роль берет на себя конденсатор емкостью 0,1 мкФ.

вывод V_{UCC} : данный порт питание предназначен для батарейного домена. В нашем случае данный порт не используется и по этому он просто будет объединён с портом U_{CC} . Используется только в тех случаях, когда основное питание отсутствует. Основная цель данного вывода это питание генератора и батарейного домена. В случае падения напряжения на выводе U_{CC} ниже 2,0 В., происходит смена режима питания с основного типа на батарейный. Обратный процесс происходит автоматически, когда уровень напряжения превышает значение в 2 В.

выводы AGND1: данный вывод должен быть соединен с землей. Для снижения помех так же используется конденсатор. Вывод AGND1 является выводом для общего аналогово питания AU_{CC1} .

Принцип подачи питания на микроконтроллер приведен на структурной блок схеме (рисунок 3.5).

						<i>Лист</i>
						55
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>	<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	

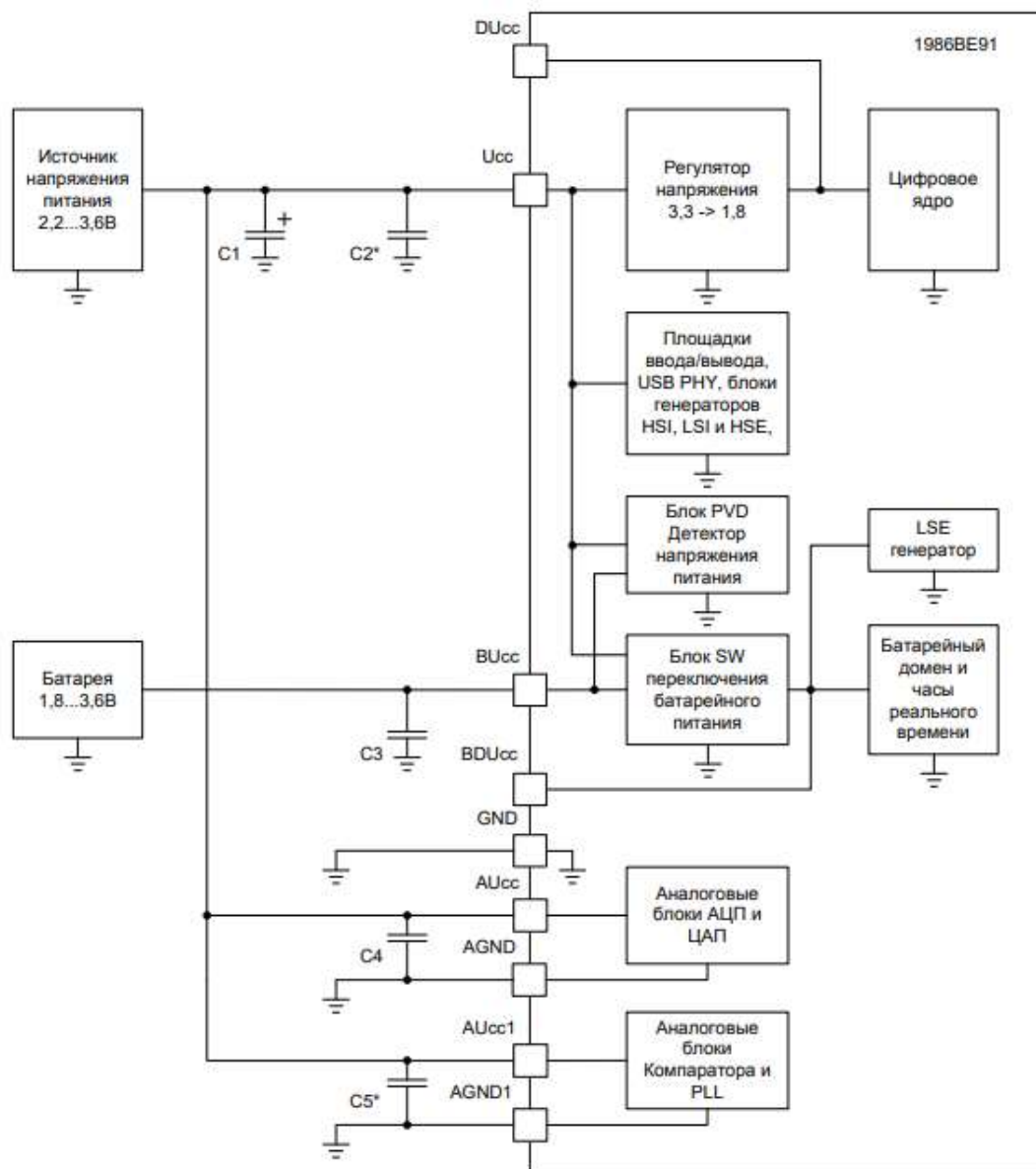


Рисунок 3.5 – Блок-схема подачи питания на микроконтроллер

У каждого вывода питания микроконтроллера установлены конденсаторы, которую играют важную роль в снижении помех. Все конденсаторы кроме C1 равны 0.1 мкФ. C1 же имеет емкость равную 22 мкФ.

3.3 Понятие аналого-цифрового преобразования. Типы АЦП

Аналого-цифровое преобразование – это процесс преобразования входного аналогового сигнала в дискретный код (цифровой сигнал). Аналого-цифровой преобразователь, это устройство, которое выполняющее данное преобразование.

Более востребованными типами АЦП являются:

- Сигма-дельта АЦП.
- АЦП Последовательного приближения.

АЦП последовательного приближения:

В области систем сбора данных, когда необходимо мультиплексировать несколько входных сигналов, часто встречается АЦП последовательного приближения. В современных АЦП последовательного приближения разрядность составляет от восьми до восемнадцати бит, а частота преобразования до нескольких мегагерц. Выходные значения чаще всего передаются через стандартный последовательный интерфейс (например, I2C или SPI), но так же имеют место быть устройства с параллельным выходом (конечно, они значительно больше по габаритам и имеют большее число выводов).

АЦП последовательного приближения работает по принципу алгоритма сравнения. Сначала происходит измерение величины входного сигнала, то есть происходит сравнение входного напряжения с рядом величин, генерируемых следующим образом:

1) Половина опорного напряжения устанавливается на выходе ЦАП.

2) Если сигнал $>$ установленного значения, то далее он сравнивается с напряжением, лежащим посередине оставшегося интервала ($3/4$ опорного). Если сигнал $<$ установленного значения, то следующий сравнение будет происходить с меньшей половиной оставшегося интервала ($1/4$ опорного).

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

На рисунке 3.6 приведена схема АЦП последовательного приближения.

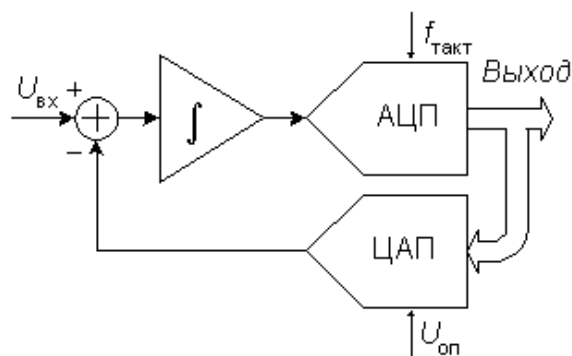


Рисунок 3.7 – Последовательность сигма-дельта модуляторов первого порядка

Принцип работы этой схемы основан на разнице между сигналами $U_{вх}(t)$ и ЦАП (на выходе), полученными в предыдущем цикле цепи. Результат разности интегрируется, и затем преобразуется в код через параллельный АЦП. После последовательность кодов передается в цифровой фильтр нижних частот.

В большинстве случаев однобитные сигма-дельта модуляторы используются как часть интегральных схем, где компаратор используется в качестве АЦП, а аналоговый переключатель - в качестве ЦАП.

Блок-схема сигма-дельты АЦП показана на рисунке 3.8.

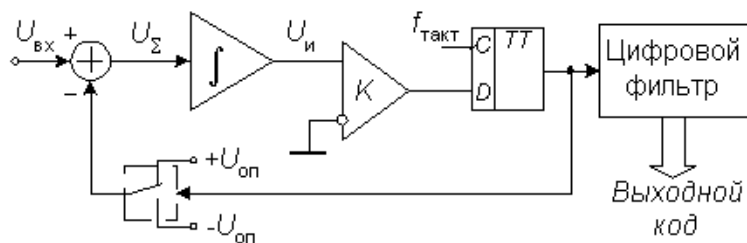


Рисунок 3.8 – Блок-схема сигма-дельты АЦП

Модулятор измеряет разность между аналоговым входным сигналом и аналоговым сигналом на выходе обратной связи ЦАП. Далее интегратор обрабатывает аналоговое напряжение на выходе, результат вычитания передается 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 возвращает в контур обратной связи, где его ожидает 1-битовый ЦАП. 1-битный АЦП

- оцифровать один из 16 внешних каналов;
- запускать два АЦП синхронно для увеличения скорости выборки;
- оцифровать значение внутреннего источника опорного напряжения;
- выработать прерывание при выходе оцифрованного значения за заданные пределы.

Для осуществления начала преобразования необходимо 28 тактов синхронизации C_ADC. Частота процессора PCLKd может выступать в качестве синхросигнала либо частота ADC_CLK, формируемая в блоке «Сигналы тактовой частоты».

Структурная схема контроллера АЦП изображена на рисунке 3.9

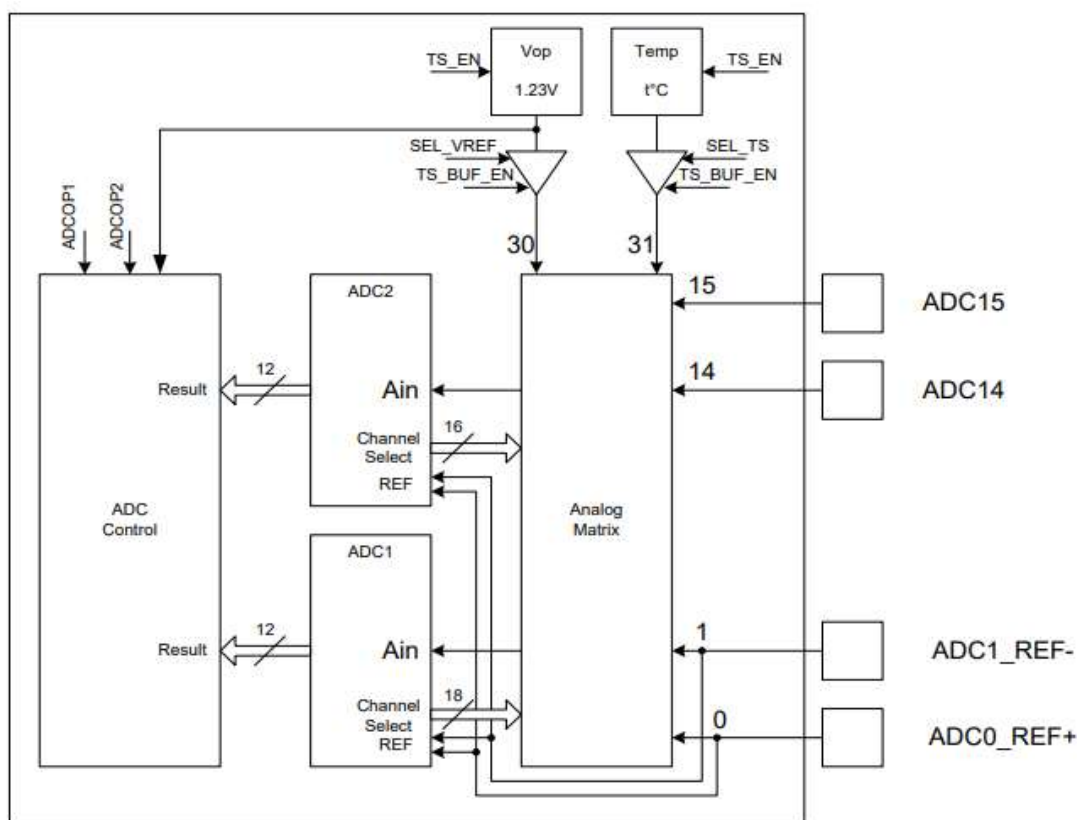


Рисунок 3.9 – Структурная схема контроллера АЦП

Для того чтобы уменьшить потребление тока, мы можем использовать датчик температуры в качестве источника опорного напряжения, а не свой источник собственного напряжения АЦП. Чтобы сделать это, необходимо соединить блок датчика температуры и опорного напряжения. После подключения источник

3.6 Источник питания

В качестве источника питания для разрабатываемого датчика давления будем использовать блок питания HRPG-150-15 [22].

В таблице 3.1 представлены технические параметры блока питания.

Таблица 3.1 – Технические параметры блока питания

Выходное напряжение, В	15
Выходной ток, А	10
Мощность, Вт	150
Количество выходов, шт	1
КПД	86%
Размеры, мм	159x97x38
Коррекция коэффициента мощности	Да

3.6.1 Корректор коэффициента мощности

Схема корректора коэффициента мощности представлена на рисунке 3.11.

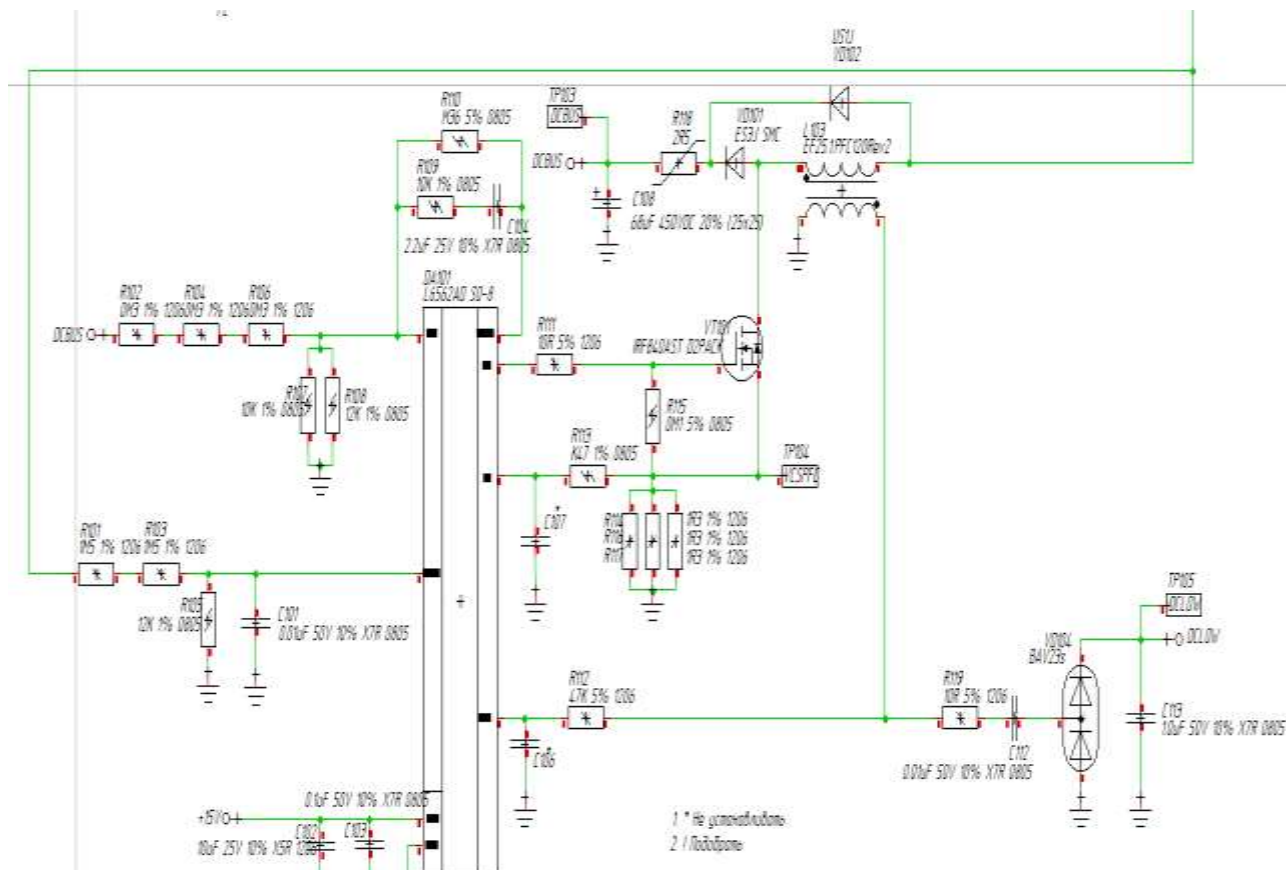


Рисунок 3.11 – Схема корректора коэффициента мощности

Схема состоит из микросхемы управления (DA101). Корректор коэффициента мощности – это параметр, который описывает искажения, возникающие в результате нагрузки на линию переменного тока. Есть два типа искажения – гармоническое и нелинейное. Гармонические искажения возникают в результате реактивной нагрузки и представляют собой фазовый сдвиг между током и напряжением [23].

Нелинейные искажения поступают в сеть через «нелинейные» нагрузки:

индуктивные катушки, состоящие из двух встречно намотанных индуктивностей;

транзистора (VT101), работающего в ключевом режиме;

электролитического конденсатора накапливающего энергию;

токового шунта для отслеживания протекающего тока;

обратной связи, сигнальных токоограничивающих резисторов для отслеживания входного напряжения и напряжения на электролите;

и системы отслеживающей размагничивание индуктора передающей часть энергетики на служебное питание первичной стороны устройства.

3.6.2 ШИМ преобразователь

Схема ШИМ преобразователя представлена на рисунке 3.12.

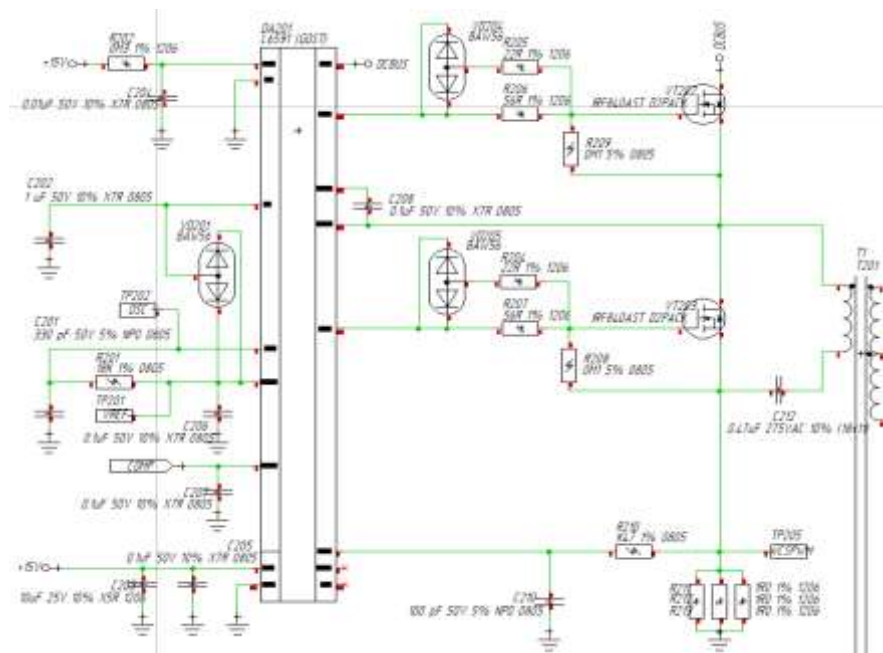


Рисунок 3.12 – Схема ШИМ преобразователя

ШИМ преобразователь представляет собой полумост. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – это метод преобразования сигнала, при котором длительность импульса изменяется (скважность), а частота остается неизменной. В английской терминологии обозначается как PWM.

Схема состоит из микросхемы управления (L6591), ШИМ преобразователя и двух ключей, попеременно пропускающих ток в разном направлении по первичной обмотке трансформатора, токового шунта для отслеживания протекающего тока, системы задания частоты преобразователя, и оптопары передающей сигнал с системы управления.

3.6.3 Система управления

Система управления предназначена, во-первых, для измерения выходного тока и напряжения, и его подстройки, во-вторых для формирования управляющего сигнала на ШИМ преобразователь, для стабилизации выходных характеристик. Схема система управления представлена ниже на рисунке 3.13.

Реализована схема на 4х операционных усилителях объединенных в одном корпусе (DA301). Первый ОУ измеряет выходное напряжение через делитель напряжения и формирует сигнал управления на оптопару. Второй измеряет выходной ток по падению на токовом шунте и дополняет сигнал управления первым ОУ. Третий ОУ обеспечивает подстройку выходных характеристик с помощью подстроечного резистора, и четвертый ОУ служит для стабилизации опорного напряжения полученного с помощью стабилизатора (VD203) из вторичного служебного питания

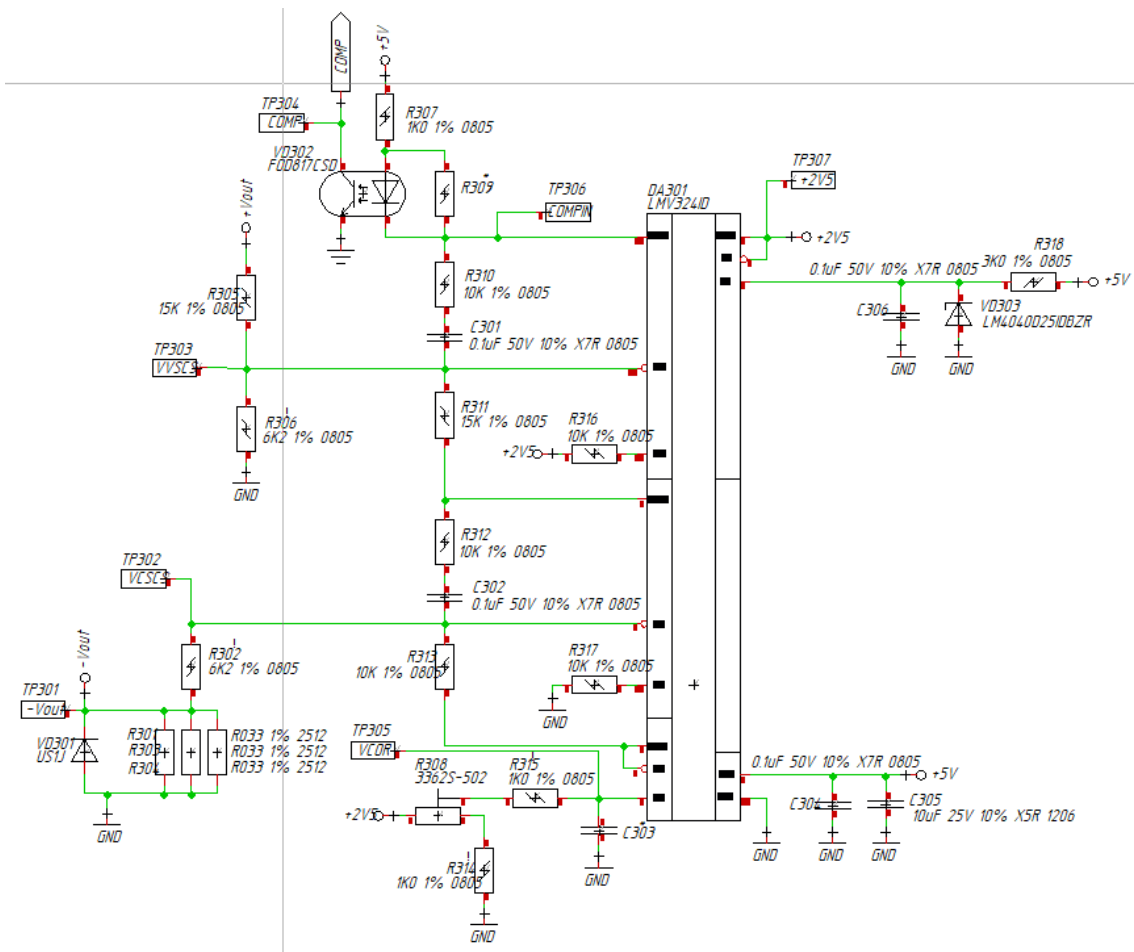


Рисунок 3.13 – Схема системы управления

3.7 Схема преобразователя давления

Основная цель преобразователя давления заключается в том, чтобы непрерывно производить измерение и преобразование абсолютного давления в токовый выходной сигнал 4-20 мА.

Питание, которое потребляет преобразователь давления от блока питания, находится в пределах от 12 до 36 В. В моем случае потребляемое питание преобразователем давления равно 15 В.

Сопротивление нагрузки не должно быть больше расчетного значения:

$$R \leq \frac{(U - 12)}{20} \text{ кОм,}$$
$$R \leq \frac{(15 - 12)}{20} = 0.15 \text{ кОм.}$$

где U – напряжение питания, В.

Сам преобразователь давления представляет собой корпус, в котором находится измерительный блок и электронный блок обработки сигнала. Чувствительным элементом измерительного блока или же приемником давления является первичный преобразователь. В свою очередь в роли чувствительного элемента для первичного преобразователя выступает пластина, с кремниевыми пленочными тензорезисторами, которая прочно соединена с мембранной [24].

Оказываемое давление рабочей среды на приемник давления преобразуется в деформацию чувствительного элемента, которым и является мембрана, при этом вызывая изменения электрического сопротивления тензорезисторов. В свою очередь первичный преобразователь формирует на выходе электрический сигнал, который далее преобразуется электронным блоком в токовый выходной электрический сигнал.

Принципиальная схема будущего датчика давления приведена на рисунке 3.14

									Лист
									67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ				

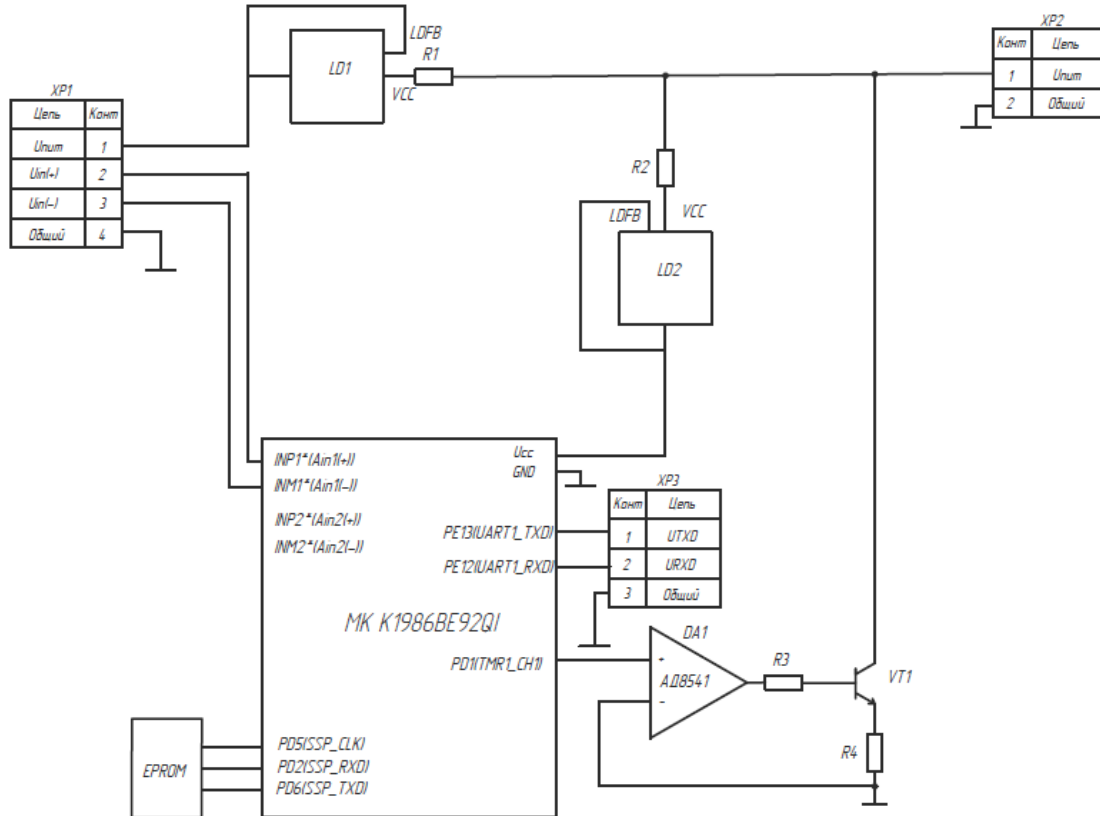


Рисунок 3.14 – Принципиальная схема датчика давления

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В LTSPICE И РАСЧЁТ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА МЕМБРАНЫ

4.1 Моделирование в LTspice

LTspice - это универсальная среда для создания электрических цепей с интегрированным симулятором комбинированного моделирования. Программа позволяет производить быстрое изменение параметры электронных схем и ее компонентов а так же тестировать производительность новых опций и находить оптимальные решения.

В LTspice реализована полная библиотека компонентов корпорации Linear Technology (редкие модели пассивных элементов и интегральных микросхем, включая импульсные контроллеры и регуляторы). В данной программе используются стандартные модели электронных компонентов SPICE. Так же пользователь имеет возможность добавлять сторонние библиотеки в уже существующую базу данных и создавать свои собственные элементы и шаблоны.

Структура данного редактор является иерархической, а электронные схемы средней и высокой сложности создаются путем создания подсхем. Единственное что может ограничить пользователя в создании иерархий со сложной структурой, это компьютерный ресурсы.

Данный симулятор позволяет:

- производить амплитудно-частотный анализ;
- анализ гармоник, включая расчет уровней в процентах и общего коэффициента гармонических искажений;
- анализ переходных процессов;
- спектральный анализ шумовых характеристик в выбранной точке цепи, а также шумовых характеристик, приведенных ко входу;
- спектральный анализ.

									Лист
									69
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ				

4.1.1 Моделирование интерфейса токовая петля

Я буду использовать для моделирования более точную схему передачи данных, которая была описана в главе 2. В данной схеме есть специальный измерительный резистор R_s , и на нем ОУ измеряем падение напряжения, потом данное напряжение поступает на вход во второй ОУ. Т.к. конструкция из ОУ1 является для ОУ2 обратной связью, а он выводит разность на своих входах в ноль.

Сама схема токовой петли приведена на рисунке 4.1.

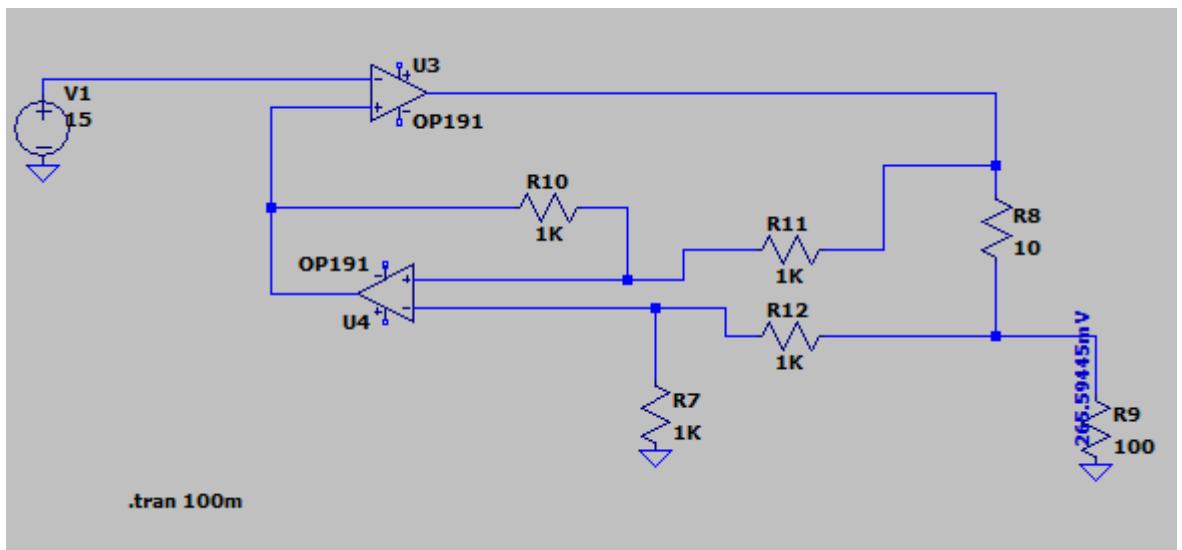


Рисунок 4.1 – Моделирование схемы более точной передачи данных

Снимем значения на выходе токовой петли при различных значениях и рода тока.

В таблице 4.1 представлены результаты измерения выходного сигнала.

Таблица 4.1– результаты измерений выходного сигнала.

Вход		Выход	
Постоянный	Переменный	постоянный	переменный
3 В	3 В	44,4 мВ	44,406 мВ
5 В	5 В	81,2361 мВ	81,235155 мВ
7 В	7 В	118,13046 мВ	118,13046 мВ
9 В	9 В	155,0398 мВ	155,0398 мВ
11 В	11 В	191,93585 мВ	191,93585 мВ
13 В	13 В	228,79562 мВ	228,79562 мВ
15 В	15 В	265,59445 мВ	265,59445 мВ

На рисунке 4.2 представлено значение на выходе при постоянном токе равном 15В, которое соответствует 265,6 мВ.

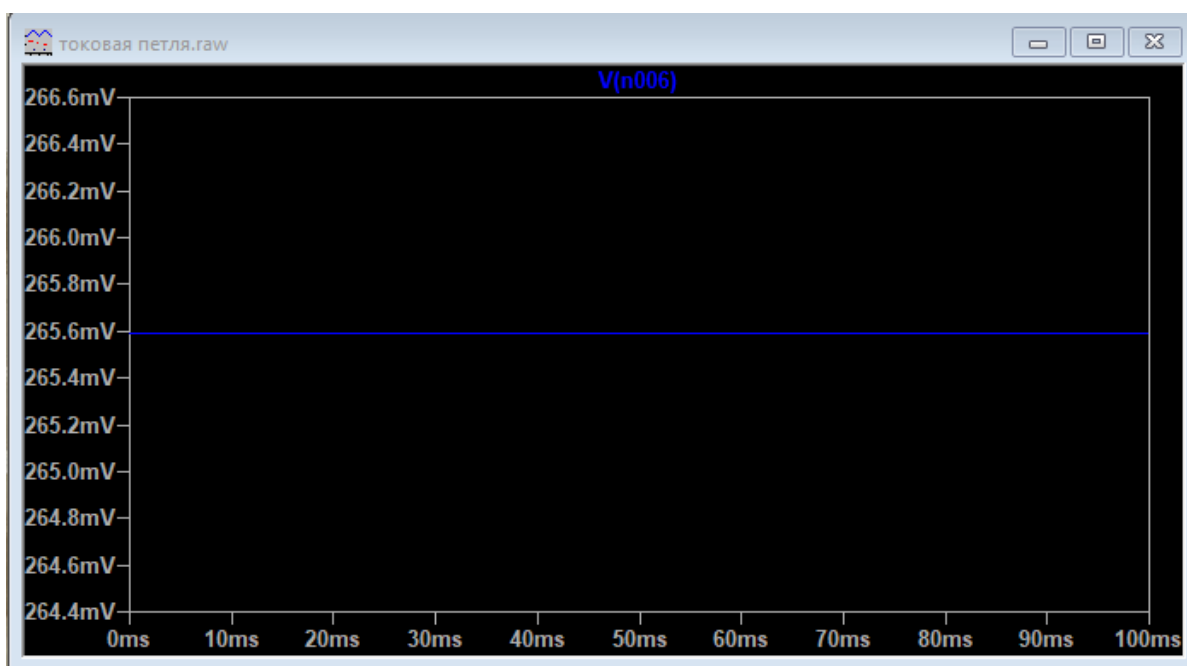


Рисунок 4.2 – Значение выходного напряжения

Данному значению напряжению на выходе соответствует выходной значение тока равное 2,66мА, приведенное на рисунке 4.3.

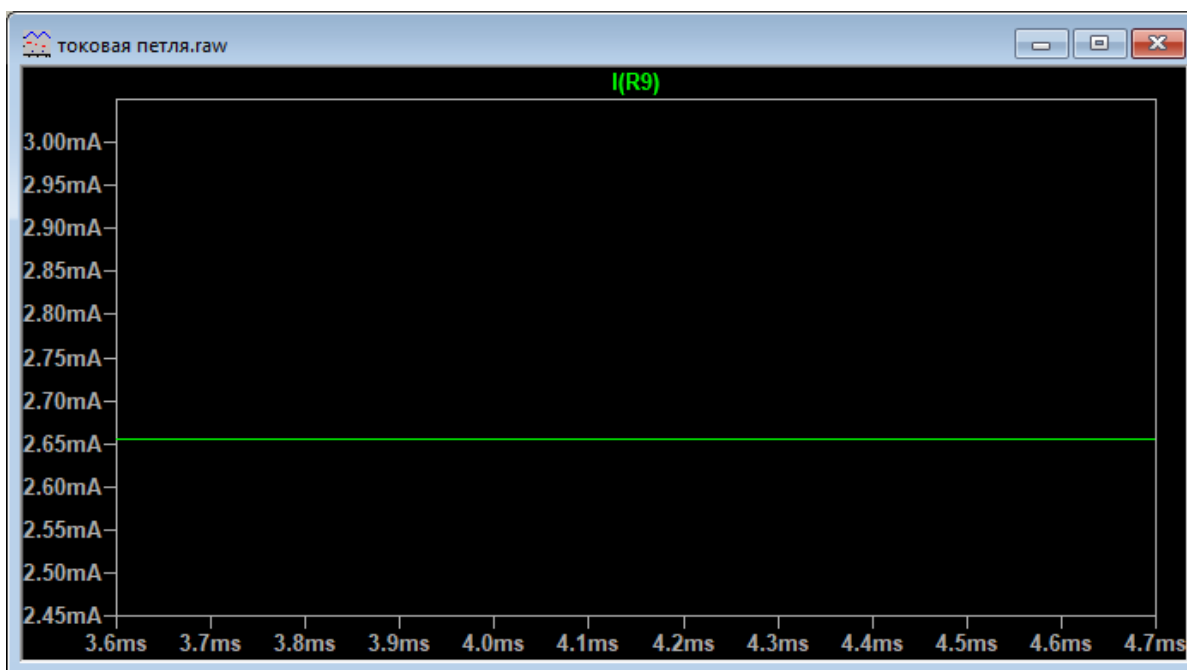


Рисунок 4.3 – Значение тока на выходе токовой петли

Таким образом, можно сделать вывод, что какого бы рода ток мы не подавали на токовую петлю, на выходе не будет присутствовать искажение сигнала.

4.1.2 Моделирование дифференциального усилителя

С выхода тензометрического преобразователя всегда малый сигнал и для того чтобы считывать сигналы с помощью АЦП, нам необходимо усилить его, так как АЦП микроконтроллера воспринимает сигнал от 0 до 3В, то, при поступлении сигнала с датчика давления на АЦП, происходит потеря части диапазона напряжения, по этому будем использовать дифференциальный усилитель.

Схема используемого мной дифференциального усилителя приведена на рисунке 4.4.

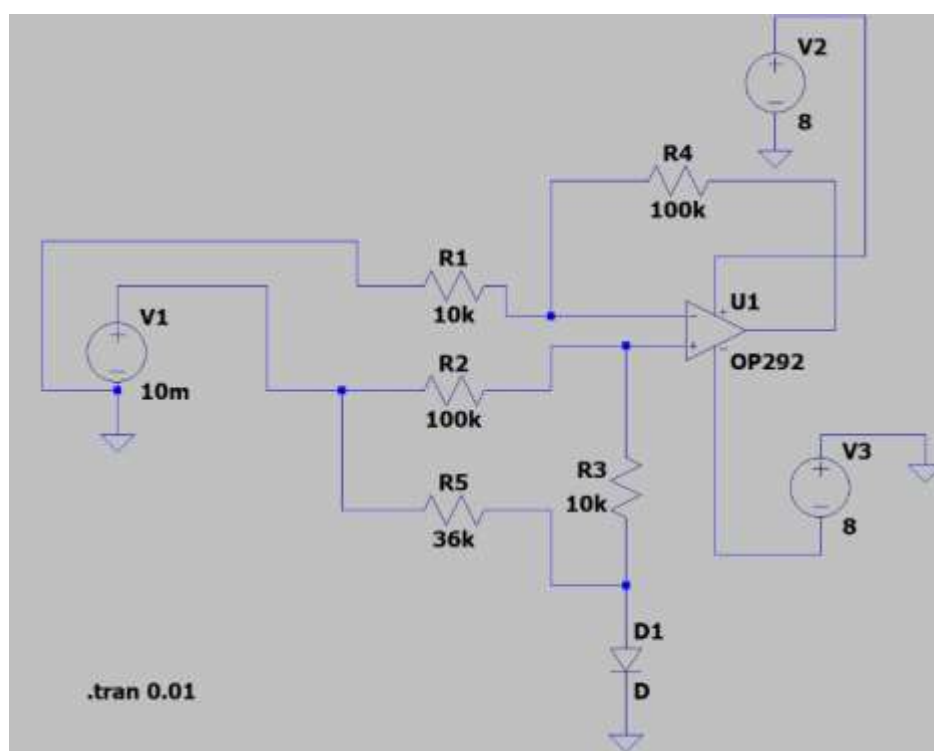


Рисунок 4.4 – Схема дифференциального усилителя

Данная схема построенная на российской базе элементов. В схеме используются SMD резисторы мощностью в 0,125 Вт и с точностью в $\pm 1\%$.

В качестве источник опорного напряжения используется шунтовой программируемый источник опорного напряжения – TL431ILPR, точность

которого составляет $\pm 2,2\%$, а выходное напряжение лежит в пределах 2,495 – 36 В.

В качестве операционного усилителя используется Двухканальный операционный усилитель малой мощности – LM2904DG, характеристики которого приведены на рисунке 4.5.

Тип усилителя	общего применения
Кол-во каналов	2
Скорость нарастания выходного сигнала, В/мкс	0.6
Частота единичного усиления, МГц	1
Токовое смещение на входе, нА	45
Напряжение смещения на входе, мкВ	2000
Ток собственного потребления, мА	1.5
Выходной ток на канал, мА	40
Напряжение питания однополярное(+)/двуполярное (\pm), В	+3...32, $\pm 1.5...16$
Рабочая температура, °C	-40...+105
Корпус	soic-8 (0.154 inch)
Вес, г	0.15

Рисунок 4.5 – Характеристики Двухканальный операционный усилителя

Далее проиллюстрируем все интересующие нас характеристики данного дифференциального усилителя.

Напряжение питание дифференциального усилителя изображено на рисунке 4.6.

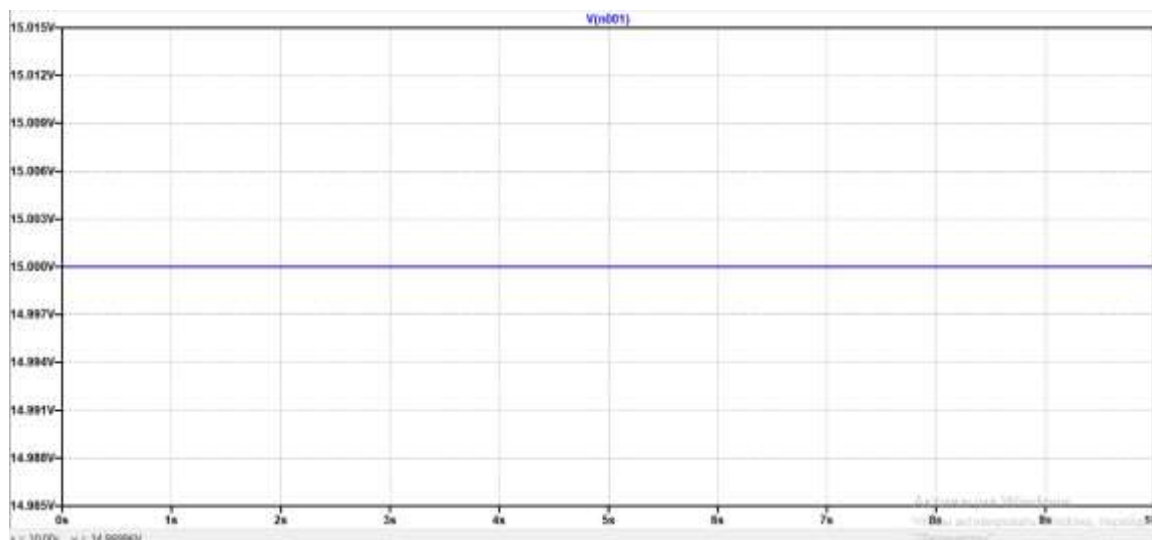


Рисунок 4.6 – Напряжение питание дифференциального усилителя

Выходной сигнал на источнике опорного напряжения TL431ILPR изображено на рисунке 4.7.

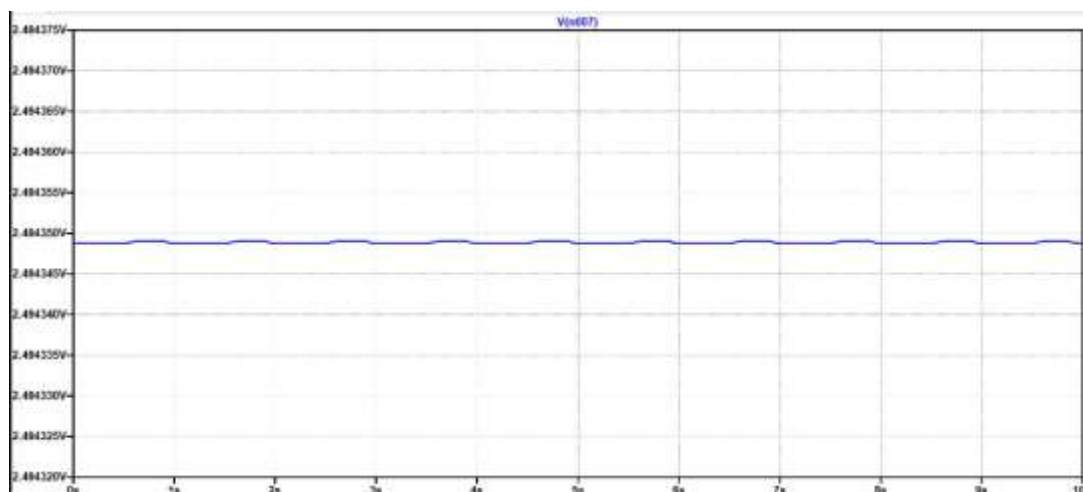


Рисунок 4.7 – Выходной сигнал на источнике опорного напряжения TL431ILPR

Напряжение на V1 изображено на рисунке 4.8.

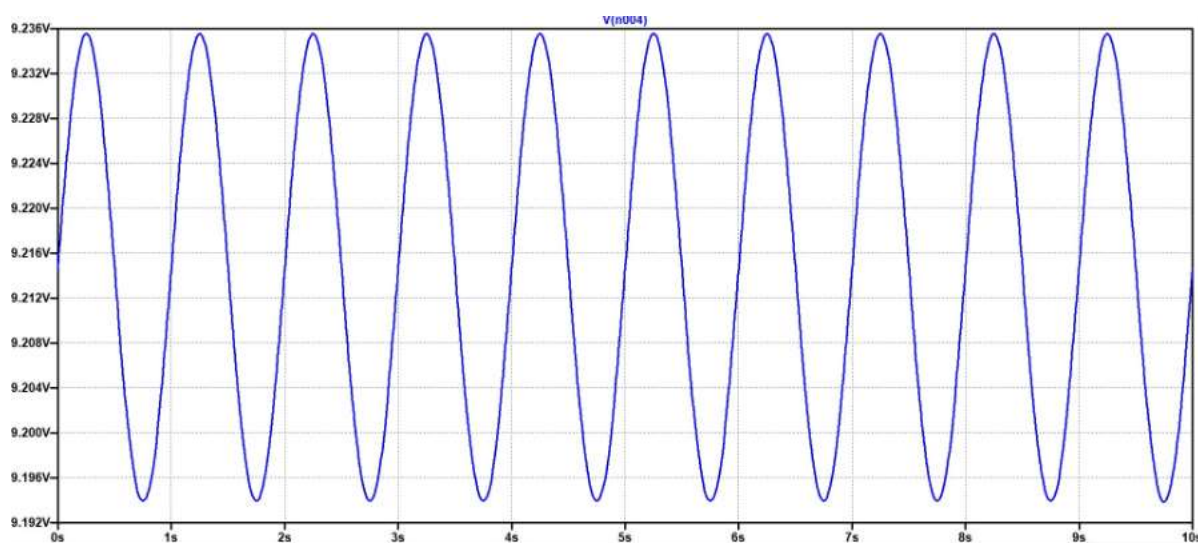


Рисунок 4.8 – Напряжение на V1

Выходной сигнал проектируемого дифференциального усилителя изображено на рисунке 4.9



Рисунок 4.10 – Схемы преобразования для тензорезистивного датчика давления

Внутренняя камера для датчика избыточного давления герметично делится на две полости упругой или мягкой мембранной, как показано на рисунке 4.11.

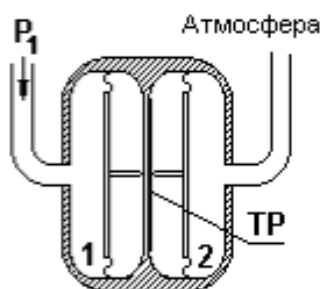


Рисунок 4.11 – Внутренняя камера для датчика избыточного давления

От воздействием агрессивных компонентов окружающей среды мембрана с тензорезисторами защищают плоскими воздухонепроницаемыми мембранами с нулевой жесткостью. Эти мембраны выполняют преобразование давления в силу, которую затем преобразует упругая мембрана с тензорезисторами [25].

Под воздействием измеряемой среды мембраны изгибаются, и датчики изменяют свое сопротивление, что приводит к дисбалансу моста Уитстона. Баланс линейно зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от приложенного давления.

На рисунке 4.12 показан упрощенный вид тензорезистивного чувствительного элемента.

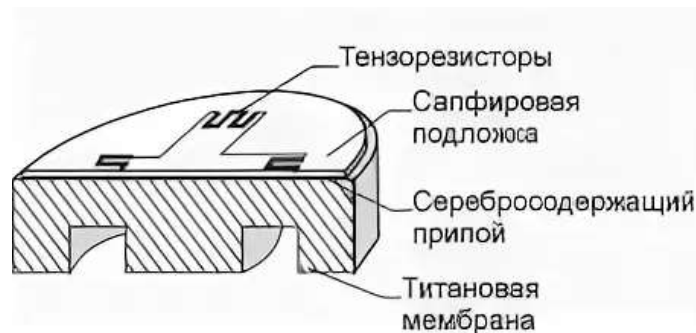


Рисунок 4.12 – упрощенный вид тензорезистивного чувствительного элемента

Определим чувствительность к давлению мембранного преобразователя с мостовой тензорезистивной схемой:

$$S = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_n \times P_{\text{НОМ}}},$$

$$S = \frac{500}{15 \times 20.625} = 1.616 \left(\frac{\text{мВ}}{\text{КПаВ}} \right),$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение при номинальном давлении мВ;

E_n – напряжение питания, В;

$P_{\text{ном}}$ – номинальное давление, КПа.

На схему подаётся напряжение питания равное 15 В, тогда при приведённых величинах сопротивления на диагонали моста будет подаваться напряжение:

$$U_n = 0.6 \times 15 = 9 \text{ В.}$$

Когда все 4 плеча моста активны, деформацию ε_n одного из тензорезистора при номинальной нагрузке можно определить по следующей формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{k} \times \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{k} \times \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_n}$$

7) Объем, который заполнится несжимаемой жидкостью при прогибе мембраны под воздействием номинального эффективного давления:

$$V = \frac{\pi \times r_a^2 \times \omega_B(0)}{2},$$
$$V = \frac{3.14 \times 4 \times 0.0000298}{2} = 0.000047 \text{ мм}^3.$$

8) Поскольку полость между кремниевой мембраной и гофрированной мембраной разделяющего металла заполнена несжимаемой жидкостью, отклонение центра гофрированной металлической мембраны при номинальном эффективном давлении можно найти из равенства вытесненного объема двумя мембранами:

$$W_B^{\text{НОМ}}(0) = \frac{2 \times V}{\pi \times R_a^2},$$

где R_a – радиус разделительной металлической гофрированной мембраны. Для нашего случая примем значение R_a за 30мм.

$$W_B^{\text{НОМ}} = \frac{2 \times 0.47}{3.14 \times 30^2} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ мм.}$$

4.3 Выбор способа гофрировки воспринимающей мембраны

Рассмотрим вариант конструкции мембраны с пальчатым профилем гофрировки, изображенный на рисунке 4.13.

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						80
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

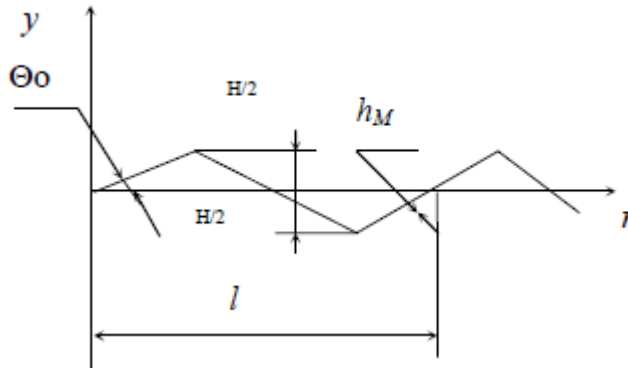


Рисунок 4.13 – Конструкция мембраны с пильчатым профилем гофрировки

Рассчитаем для данного варианта конструкции металлической мембраны эквивалентное давление при максимальной величине прогиба металлической мембраны:

$$p_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_M \times h_M^4}{R_a^4} \left(a \frac{W_B^{\text{НОМ}}(0)}{h_M} + b \frac{(W_B^{\text{НОМ}}(0))^3}{h_M^3} \right), \text{Па} \quad (1)$$

где h_M – толщина металлической мембраны, м;

a, b – коэффициенты, зависящие от параметров гофрировки мембраны.

E_M – модуль упругости материала металлической мембраны, Па;

Самостоятельно выбираем параметры гофрировки:

- $H = 1 \text{ мм}$ - глубина гофрировки;
- $h_M = 0,15 \text{ мм}$ - толщина металлической мембраны;
- $\theta_0 = 15^\circ$ – угол наклона гофрировки.

Рассчитываем коэффициенты гофрировки:

$$k_1 = \frac{1}{\cos 15^\circ} = 0.97$$

$$k_2 = \frac{1^2}{0.97 \times 0.15^2} + 0.97 = 46.4$$

$$\alpha^2 = k_1 \times k_2,$$

$$\alpha = \sqrt{46.4 \times 0.97} = 7$$

Выбираем поправочные коэффициенты:

$$\eta = 1.015$$

$$\xi = 1.075$$

Далее рассчитываем коэффициенты a и b зависящие от параметров гофрировки

Для коэффициента a :

$$a = \frac{2 \times (3 + \alpha) \times (1 + \alpha)}{3 \times k_1 \left[1 - \left(\frac{\mu}{\alpha} \right)^2 \right]} \times \eta,$$

$$a = \frac{2 \times (3 + 7) \times (1 + 7)}{3 \times 0.97 \times \left[1 - \left(\frac{0.184}{7} \right)^2 \right]} \times 1.015 = 12.5$$

Для коэффициента b :

$$b = \frac{32 \times k_1}{\alpha^2 - 9} \times \left(\frac{1}{6} - \frac{3 - \mu}{(3 + \alpha) \times (\alpha - \mu)} \right) \times \xi,$$

$$b = \frac{32 \times 0.97}{7^2 - 9} \times \left(\frac{1}{6} - \frac{3 - 0.184}{(3 + 7) \times (7 - 0.184)} \right) \times 1.07 = 0.098$$

Далее произведем расчет $p_{экр}$ по формуле (1):

						<i>Лист</i>
					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	82
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

$$p_{\text{ЭКВ}} = \frac{195 \times 10^9 \times 0.15^4}{30^4} \times \left(12.5 \times \frac{3.3 \times 10^{-4}}{0.15} + 0.098 \frac{(3.3 \times 10^{-4})^3}{0.15^3} \right) = 3.4$$

Для анализа и выбора оптимальной конструкции металлической гофрированной мембраны построим график зависимости эквивалентного давления от прогибов центра металлической мембраны (Рисунок 4.14).

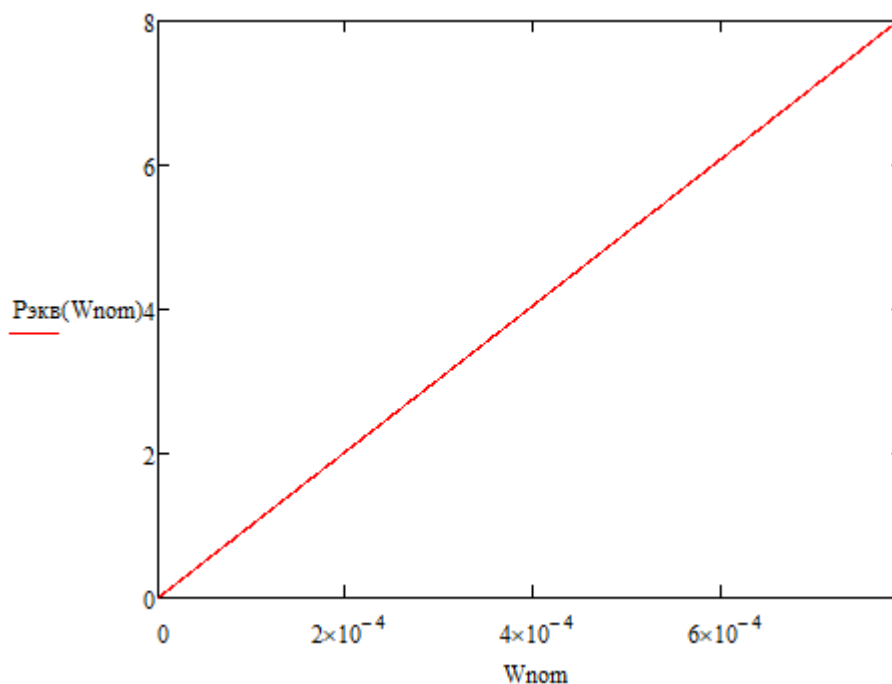


Рисунок 4.14 - График зависимости эквивалентного давления от прогибов центра металлической мембраны

Из графиков видно, что зависимость эквивалентного давления от величины прогибов металлической мембраны практически полностью линейна, а значит линейным будет и упругая характеристика $WB(0) = f(P_{\text{ЭКВ}})$. Проанализировав полученные данные приходим к выводу, что в проектируемом нами датчике необходимо использовать пильчатый профиль гофрировки воспринимающей металлической мембраны.

Вывод по четвертой главе: В данной главе было произведено моделирование интерфейса токовой петли 4-20 и дифференциального усилителя. Убедились в том,

что выходное значение токовой петли не будет зависеть от рода тока, а так же проверили выходной сигнал разработанного дифференциального усилителя.

Так же были произведены расчеты для мембраны будущего тензорезистивного датчика давления.

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						84
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

1. проведен аналитический обзор существующих конструкций датчиков давления;
2. разработана возможная схема электронной платы, включая интерфейс токовой петли;
3. были подобраны элементы отечественного производства;
4. произведено моделирование дифференциального усилителя в программе LTspice, а так же проведен расчет параметром электрических схем.

						<i>Лист</i>
						85
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>	<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные понятия и определения.
2. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова // Издательство стандартов, – М.: – 2005. – 460с.
3. Все про измерения параметров рабочих средств механических устройств. – <https://megapaskal.ru/?action=mobiledisable>.
4. Тензорезисторы. – https://www.bookasutp.ru/chapter6_3_5.aspx.
5. Датчики давления. Типы, характеристики, особенности, подбор. – <http://kontech-system.com.ua/articles/datchiki-davlenija-tipu-harakteristiki-osobennosti-podbor>.
6. Датчик давления Метран – 150. <https://n-g-e.ru/catalog/metran150>.
7. Преобразователь дифференциального давления Deltabar S PMD70. – <http://www.pkimpex.ru/opisanie/preobrazovatel-davleniya-deltabar-s-pmd70>.
8. EJX430A преобразователь избыточного давления. – <http://market.kip-postavka.ru/catalog/29/EJX430A.html>.
9. Андрусевич, А.В. Аналоговая токовая петля – решение от MAXIM / А.В. Андрусевич // Компоненты и технологии. – 2009. – 2-е изд. – № 8(97). – С. 74-76.
10. Пыльский, В.А. Формирователь сигнала параметрических датчиков «Токовая петля» и его применение в высокоточных измерительных управляющих системах / В.А. Пыльский // Элементы и устройства вычислительной техники систем управления. – 2008. – 2-е изд. – № 3(90). – С. 101-115.
11. Шевченко, А.А. Применение формирователя сигнала параметрических датчиков для измерения температуры / А.А. Шевченко // Вестник СГТУ. – 2010. – 4-е изд. – № 2(50). – С.17-20.
12. Гуреев, В.В. Метод компенсации ошибки измерений сопротивления резистивных датчиков температуры в токовой петле / В.В. Гуреев // Вестник СГТУ. – 2009. – 2-е изд. – № 2(43). – С. 45-49.

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						86
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

13. Асташкин, А.В. Пассивный преобразователь интерфейсов EIA 232 – «Токовая петля» / А.В. Асташкин // Вестник ТГУ. – 2016. – 2-е изд. – № 2(63). – С. 11-15.
14. Аникуев, С.В. Преобразование напряжения 1-5 В в сигнал токовой петли 4-20 мА / С.В. Аникуев // Методы и средства повышения эффективности использования электрооборудования. – 2016. – № 3(23). – С. 680-683.
15. Панферов, Д.В. Особенности применения импульсных понижающих регуляторов напряжения во вторичных источниках электропитания приборов с двухпроводным интерфейсом «Токовая петля 4-20 мА» / Д.В. Панферов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – 2-е изд. – № 2(69). – С. 20-27.
16. Григорьев, П.А. Разработка цифрового задатчика аналоговых сигналов на основе микроконтроллера серии AVR производства ATMEL / П.А. Григорьев // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018. – 179 с.
17. Львова, А.А. Линейная петлевая схема точной обработки сигналов с датчиков / А.А. Львова // Вестник СГТУ. – 2004. – № 3. – С. 102-112.
18. Пономарев, А.Ю. Приемопередатчик интерфейса 4-20 мА / А. Ю. Пономарев // Программные системы: теория и приложения. – 2015. – 53 с.
19. Аронов, А.А. Формирователь напряжения на RS-485 / А.А. Аронов // Современные проблемы коммуникаций. – 2019. – 351 с.
20. ГОСТ Р 22520-85. Датчики давления, разрежения, и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП.
21. Спецификация микроконтроллеров серии 1986BE9x и K1986BE9x. – <https://ic.milandr.ru/upload/iblock/be5/be5168666b738750aafb7f2968470702.pdf>.
22. Блок питания HRPG-150-15. – https://www.chipdip.ru/product0/8001901680?from=suggest_product.
23. Готтлиб, И.М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы И.М. Готтлиб. – М.: Постмаркет, 2002 – 541 с.

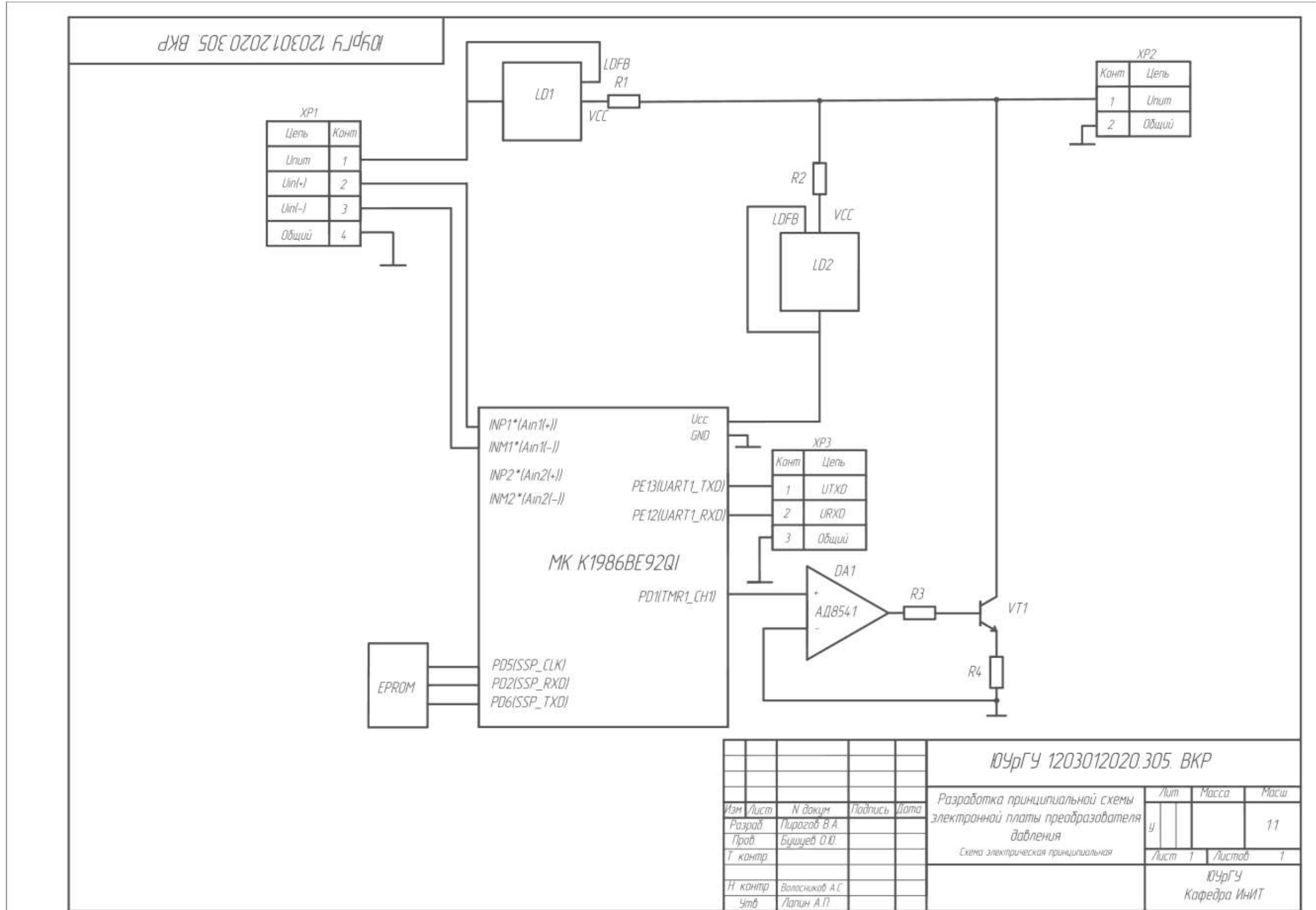
24. Преобразователь давления в электрический сигнал. – <https://moypatent.ru/patent/208/2082129.html>.

25. Тензорезистивные датчики давления. – <https://students-library.com/library/read/48484-tenzorezistivnye-datciki>.

					<i>ЮУрГУ – 120301. 2020. 305 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						88
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Принципиальная схема разработанного датчика давления.



ЮУрГУ 1203012020.305. ВКР				
Изм	Лист	N докум	Подпись	Дата
Разраб		Пирогов В.А.		
Проб		Бушнев О.Ю.		
Т. контр				
Н. контр		Волосников А.С.		
Чтв		Лапин А.П.		
Разработка принципиальной схемы электронной платы преобразователя давления Схема электрическая принципиальная				
		Лит	Масса	Масш
		у		11
		Лист 1	Листов 1	
ЮУрГУ Кафедра ИНИТ				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Перечень элементов

Поз. обозна- чение	Наименование	Кол.	Примечание
DA1	Микросхема интегральная AD8541	1	
DD1	Микросхема K1986BE92QI	1	
GB1	Источник питания SP-150-15	1	
D1	Операционный усилитель LM2904DG	1	
	Резисторы		
R1, R3	Резисторы SMD-0805-0,125 10 кОм ±1%	2	
R2, R4	Резисторы SMD-0805-0,125 100 кОм ±1%	2	
R5	Резистор SMD-0805-0,125 36 кОм ±1%	1	
U1, U2	Операционный усилитель OP191	2	
U3	Операционный усилитель OP292	1	
XP1, XP2	Соединитель Б22-2	2	
<i>ЮУрГУ-120301.2020.305 ПЗ</i>			
Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб	Пирогов В.А.		
Провер	Бущев О.Ю.		
Т.контр			
Н.контр	Волосникав А.С.		
Утв			
Разработка принципиальной схемы электронной платы преобразователя давления Перечень элементов			Лит У Лист 1 Листов
			<i>ЮУрГУ Кафедра ИНИТ</i>