

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-измерительной техники

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____/ А.Л. Шестаков /

« ____ » _____ 2019 г.

Методика описания физических эффектов, используемых в средствах измерения физических величин

(наименование темы работы (проекта))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ-12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР

(код направления/специальности, год, номер студенческого)

Руководитель, доцент

_____/ А. П. Лапин /

« ____ » _____ 2019 г.

Автор

студент группы КЭ – 463

_____/ Г. Р. Юнусова /

« ____ » _____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент

_____/ А.С. Волосников /

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Юнусова Г.Р. Методика изучения физических эффектов, используемых в средствах измерения физических величин. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН, КЭ-463; 79 с. 29 илл., библиогр. список – 43 наим.

Выпускная квалификационная работа направлена на анализ физических эффектов, применяемых при измерении давления и температуры. В ходе данной работы был проведен аналитический обзор литературы по физическим эффектам. Рассмотрены существующие классификации.

В заключении проделанной работы была разработана новая методика описания физических эффектов, используемых в средствах измерения физических величин. Она содержит такие пункты как: наименование физического эффекта, краткое описание физического эффекта, наименование воздействия, наименование результата воздействия, структурная схема физического эффекта, параметры физического объекта, описание математической модели физического эффекта, описание физической реализации данного эффекта, условия проявления ФЭ, внешние факторы, препятствующие его проявлению, представление зависимости выходного сигнала датчика давления от входной величины, графическое представление данной зависимости, конструктивная реализация физического эффекта в датчике температуры, вид температуры и область применения ФЭ.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	Юнусова Г.Р.				МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проз.</i>	Лапин А.П.						3	
<i>Н.контр.</i>	Волосников А.С.				ЮУрГУ Кафедра ИНИТ			
<i>Утв.</i>	Лапин А.П.							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ЭФФЕКТАМ... 8	8
1.1 Постановка задачи.....	8
1.2 Понятие физического эффекта	8
1.3 Структура описания характеристик и свойств физического эффекта.....	12
1.4 Классификация физических эффектов.....	15
Выводы по разделу 1.....	19
2 МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	20
2.1 Постановка задачи.....	20
2.2 Требования к методике описания физических эффектов при измерении давления	20
2.3 Описание физических эффектов, используемые для измерения давления	22
Выводы по разделу 2.....	41
3 МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ	42
3.1 Постановка задачи.....	42
3.2 Требования к методике описания физических эффектов при измерении температуры.....	42
3.3 Описание физических эффектов, используемые для измерения температуры	43
Выводы по разделу 3.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	67
ПРИЛОЖЕНИЯ	71
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Известные физические эффекты и явления.....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Пример описания тензорезистивного эффекта.....	72
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Пример описания емкостного эффекта	74

									Лист
									4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Пример описания эффекта Зеебека	76
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Пример описания пьезорезонансного эффекта	78

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		5

ВВЕДЕНИЕ

Мы стоим у истоков революции, которая фундаментально изменит нашу жизнь, наш труд и наше общение. По масштабу, объему и сложности это явление, которое считают четвертой промышленной революцией, не имеет аналогов во всем предыдущем опыте человечества [1, с. 8].

Четвертая промышленная революция может «роботизировать» человечество, и для многих людей это непоправимо изменит то, как выглядит их работа, среда, семейная жизнь и сама идентичность. Но она же сможет привести человечество к новому коллективному и моральному сознанию, основанному на общем чувстве предназначения. И мы обязаны стремиться ко второму варианту.

Современная промышленная революция предполагает самое активное использование датчиков для измерения физических величин, причем предпочтительно основанных на новых физических эффектах.

Физическая величина – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них [2, с. 20].

Физический эффект – это закономерность проявления результатов взаимодействия объектов материального мира, осуществляемого посредством физических полей [3, с. 8].

Принцип работы датчиков для измерения физических величин, основан на использовании различных физических эффектах (ФЭ), которые обладают определенной спецификой применения. Исследования ФЭ являются одним из основных направлений в приборостроении при разработке, создании и изучении новых датчиков [4, с. 145]

Анализ литературных источников в области приборостроения [4], [5] и [6] показывает, что отсутствуют работы, содержащие последовательное, четкое описание процедуры использования физических эффектов для построения

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

датчиков физических величин. В связи с этим *актуальной* является задача выделения основных этапов реализации физических эффектов в современных датчиках. Таким образом, перед нами стоит задача создания методики изучения ФЭ для создания датчиков.

Новизна данной ВКР состоит в разработке новой методики для описания физических эффектов. Оригинальность методики подтверждается публикации в научном журнале Вестник ЮУрГУ 2019 [11].

Практическое использование, предполагает внедрение в учебный процесс по направлению подготовки студентов 12.03.01 «Приборостроение».

Цель данной выпускной квалификационной работы заключается в создание методики описания физических эффектов, позволяющей в упорядоченном виде хранить информацию о физических эффектах в базе данных.

Задачи выпускной квалификационной работы подразумевают в себе следующие этапы:

1. Провести обзор литературных источников по физическим эффектам.
2. Разработать методику описания физических эффектов.
3. Описать физические эффекты, используемые для измерения давления и температуры по предложенной методике.

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ЭФФЕКТАМ

1.1 Постановка задачи

Задачей настоящего раздела является изучение понятия «физический эффект» и присущие ему основные закономерности проявления. Рассмотрение модели физического эффекта и структуры его описания.

Кроме того, требуется изучить существующие классификации физических эффектов.

1.2 Понятие физического эффекта

Физические процессы протекают при взаимодействии объектов материального мира и они сопровождаются различными эффектами. Эффект – это результат, следствие каких-либо причин, действий [3, с.8].

Большое количество эффектов широко применяются в технике.

Существует четыре типа взаимодействия: всемирное тяготение, электромагнитное, ядерное и слабое взаимодействие. Каждому типу соответствует определенное физическое поле, которое имеет ряд модификаций. Например, электрическое поле может быть электростатическим, переменным, вихревым и так далее [3, с. 8].

Результатом взаимодействия является эффект, который проявляется на объектах, на которые направлены определенные взаимодействия. На рисунке 1 изображена схема представления отдельного физического эффекта.

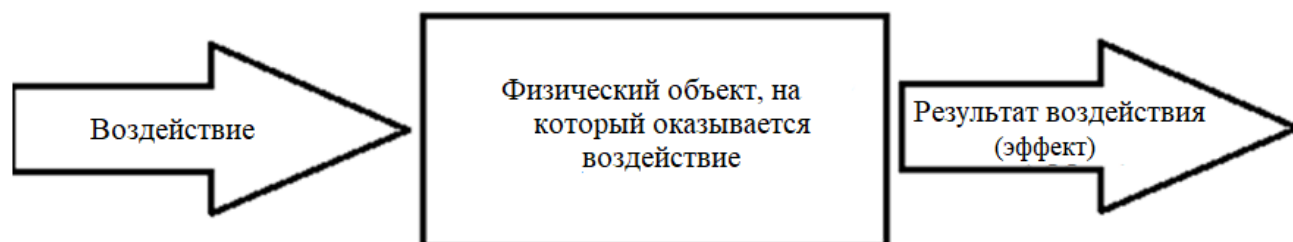


Рисунок 1 – Структурная схема физического эффекта.

Известны следующие общие *закономерности проявления* физических эффектов [3, с. 9]:

1. При одном воздействии на объект может проявляться несколько результатов воздействия. От структуры физического объекта зависит их число. Изменяя число и состав структурных элементов, при заданном воздействии можно получать необходимые результаты воздействия.

2. На один объект может быть оказано несколько воздействий. Они делятся на основные и дополнительные. Основное – это воздействие на объект результат, от которого представляет другое, отличное от воздействия, физическое поле. Дополнительное – это воздействие, которое приводит к количественному изменению результата, получаемого от основного воздействия.

3. На одном объекте могут проявляться несколько физических эффектов. Если какое-либо воздействие приводит к новому результату воздействия, то на одном объекте проявляются два разных физических эффекта.

4. Значение результата воздействия может регулироваться и обуславливается следующими факторами: количественным изменением воздействия, введением дополнительных воздействий, введением еще одного основного воздействия, изменением структуры объекта, изменением параметров объекта.

5. При постоянстве условий воздействия и свойств объекта проявляются одни и те же результаты воздействия, одни и те же значения их параметров.

Модель физического эффекта.

Модель физического эффекта характеризует зависимость результата воздействия (эффекта) от воздействия и должна удовлетворять следующим требованиям [3, с. 10]:

- отражать условия взаимосвязи физического эффекта друг с другом;
- давать количественную характеристику проявления физического эффекта;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

– обеспечивать описание процесса проявления физического эффекта во времени: переходные процессы (наложение воздействия, снятие воздействия) и установившийся процесс;

– быть пригодной для использования в инженерной практике, в частности при проектировании;

– обеспечивать определение результатов воздействий при заданных воздействиях, значениях варьируемых параметров физического объекта, временных характеристик.

В общем случае модель физического эффекта имеет вид (1):

$$C = f(A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}, (b_1, b_2, \dots, b_n), t), \quad (1)$$

где, $A_{\text{осн}}$, $A_{\text{доп}}$ – параметры основного и дополнительного воздействий;

(b_1, b_2, \dots, b_n) – кортеж параметров физического объекта;

C – результата воздействия;

t – время, характеризующее проявление физического эффекта [3, с. 10].

Обобщенную схему физического эффекта представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Обобщенная схема физического эффекта.

Для многих физических эффектов пока не известны строгие математические зависимости между воздействием и результатом воздействия. В этом случае используются эмпирические зависимости, либо экспериментальные данные.

Модель физического эффекта может изменяться при переходе от одного класса объектов на другой.

Результат воздействия зависит от используемых веществ и материалов. Не все известные вещества и материалы, на которых проявляется физический эффект, нашли свое практическое применение. Обычно используются только те, которые позволяют получить наибольший эффект и удовлетворяют определенным требованиям. Именно из-за этого поиск новых веществ и материалов считается важнейшей научной и технической задачей.

Объединение необходимой информации по веществам и материалам возможна только на основе разработке методики описания по свойствам веществ и материалов.

										<i>Лист</i>
										11
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>						

1.3 Структура описания характеристик и свойств физического эффекта

В настоящее время существует ряд подходов к формированию концептуальных моделей представления физических знаний в виде физического

эффекта, характеризующихся различными уровнями сложности и специализацией

алгоритма синтеза физического принципа действия (ФПД). Следует отметить, что большинство методов формирования ФПД сводятся к соединению выходного воздействия одного физического эффекта с входным воздействием другого физического эффекта в случае равенства наименования воздействия и их качественных характеристик. Однако для всех методик целостности ФПД характерны неосуществимые структуры из-за неполноты описания модели ФЭ. [7, с. 4].

Основные закономерности проявления физического эффекта, условия их взаимосвязи, принципы технической реализации физического эффекта в объектах техники определяют структуру описания физического эффекта. Она содержит определенные данные [3, с. 14].

1. Наименование физического эффекта. Носит вспомогательный характер, так как не отражает, как правило, сущности физического эффекта.

2. Код физического эффекта. Является основным элементом для поиска информации о физическом эффекте. Он может нести определенную информационную нагрузку, например о типе воздействия и результате воздействия.

3. Наименование воздействия и его характеристика. Наименование физического поля, которое оказывает воздействие на физический объект и показывает его разновидность, например поле электрическое, вихревое. Характеризует воздействие во времени и пространстве.

4. Наименование результата воздействия и его характеристика. Дается информация о параметрах каждого результата воздействия и о тех частях объекта

									Лист
									12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

или окружающего объект пространства. В которых проявляется результат воздействия.

5. Схема физического эффекта. Дает наглядное представление о количестве и типах воздействий. Позволяет сравнить физические эффекты между собой.

6. Перечень материалов и веществ, на которых проявляется физический эффект и их характеристики.

7. Описание сущности физического эффекта. Содержит популярное описание одной из наиболее распространенных концепций, объясняющих сущность происходящих физических процессов.

8. Условия проявления физического эффекта, внешние факторы, препятствующие его проявлению. Дают представление о возможной сфере применения физического эффекта, о требованиях, которых должны предъявляться к изделиям, функционирование которых будет основываться на данном физическом эффекте.

9. Модель физического эффекта. Характеризует взаимосвязь воздействия и результата воздействия и результата воздействия, показывает взаимозависимые параметры, совокупность физических констант и ограничений.

10. Параметры физического объекта (материала, вещества), входящие в модель физического эффекта. В табличной форме даны значения физических констант веществ и материалов и свойств, которыми характеризуются воздействия и результаты воздействий.

11. Варианты геометрической формы физического объекта с пространственной привязкой к ним воздействий и результатов воздействий. Информация позволяет оценить приемлемость физического эффекта для конкретных цепей, способствуют процессу конструкторской проработки технической реализации физического эффекта.

12. Область применения физического эффекта. Дано представление о возможных направлениях поиска дополнительной информации по практическому использованию физического эффекта.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

- 13. Примеры практического применения физического эффекта.
- 14. Информационные источники данных о сущности физического эффекта.
- 15. Информационные источники данных о практическом применении физического эффекта.

В основе методов воздействия или контроля в современной технической системе всегда находится первичный физический эффект.

Существует множество физических явлений и эффектов, типы трансформации свойств вещества и энергии, которые могут использоваться в технических системах [8 с. 4].

Они главным образом использованы в датчиках, которые являются источником информации о текущем состоянии технической системы. Сами датчики могут иметь сложную структуру с использованием нескольких преобразований контролируемой физической величины. Выходной сигнал датчики, как правило, электрические.

После обработки информации, полученной от датчиков в технических системах генерируется управляющее воздействие, которое внедрена в исполнительные механизмы также с использованием физических свойства материи [8 с. 4].

Знание физических законов, явлений и эффектов помогло лучше понять принципы работы технических систем, их фундаментальные физические возможности и ограничения.

Рассмотрим несколько вариантов классификации физических эффектов.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

1.4 Классификация физических эффектов

Важнейшие физические эффекты, применяемые в датчиках неэлектрических величин, были открыты на протяжении XIX – XX веков (Таблица 1).

Таблица 1 – Физические эффекты

Эффект	Год открытия	Автор открытия
Термоэлектрический	1821	Т.И. Зеебек
Электромагнитная индукция	1831	М. Фарадей
Эффект Маттеуччи	1847	Маттеуччи
Магнитоупругий	1865	Э. Виллари
Эффект Холла	1879	Э.Г. Холл
Пьезоэлектрический	1880	Ж.и П. Кюри
Тензорезистивный	1881	Хвольсон
Фотоэлектрический	1888	Столетов
Туннельный эффект	1928	Л.И. Мадельштам
Эффект Джозефсона	1962	Б. Джозефсон

Тогда же были изобретены основные виды средств классической измерительной техники. Но лишь в начале XX века потребности в производственных и исследовательских измерениях достигли такого развития, при котором выявились все преимущества электрических средств измерения неэлектрических величин перед прежними механическими: дистанционность, возможность одновременных многоканальных измерений с унификацией сигнала и централизованной регистрацией, прекрасные динамические свойства, способность работать в недоступных местах и тяжелых условиях [6, с. 3].

Учеными П.Д. Головиным и А.В. Блиновым в 2003 году в статье «Физические явления (эффекты) используемые для построения первичных преобразователей (датчиков)» была предложена классификация по принципу действия физических

эффектов и явлений. В данной таблице было представлено 14 принципов, применяемых при измерении давления (Приложение А). Представленная классификация является не полной, т.е. не учитывает большое количество физических эффектов и явлений, которые могут применяться в датчиках давления.

Из классификации делаем вывод, что наиболее используемые эффекты измерения давления, это:

- емкостной;
- тензорезистивный;
- пьезорезистивный;
- пьезорезонансный, резонансный.

А для температуры, наиболее используемые физические эффекты это:

- емкостной;
- контактная разность потенциалов;
- пьезорезонансный, резонансный;
- Z-эффект в п/п р-п-структурах.

Существует много физических явлений и эффектов, видов преобразования свойств материи и энергии, которые могут быть использованы в технических системах.

В первую очередь эти явления используются в датчиках (сенсорах), которые являются источником информации о текущем состоянии технической системы. Сами датчики могут иметь сложную структуру, используя несколько преобразований контролируемой физической величины. Выходные сигналы датчиков, как правило, являются электрическими.

После обработки информации, полученной от датчиков, в транспортном средстве генерируется управляющее воздействие, которое реализуется в исполнительных механизмах (ИМ) также с использованием физических свойств вещества [8 с. 4].

									Лист
									16
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

Знание физических законов, явлений и эффектов помогает лучше понять принципы работы технических систем, их фундаментальные физические возможности и ограничения.

Рассмотрим один из вариантов классификации физических законы, явления и эффекты, показанные на рисунке 3 [8 с. 5].



Рисунок 3 – Классификация физических явлений и эффектов

Внешние эффекты и явления – это когда под воздействием воспринимаемой физической величины изменяется положение какой-либо части (органа) элемента, которое затем может посредством дополнительных преобразований превратиться в перемещение индикатора или входного органа ИМ. Типичным примером является отклонение рамки с током в магнитном поле – принцип работы стрелочных индикаторов [8 с. 5].

Внутренние эффекты позволяют получить непосредственную функциональную связь между изменением воздействия исходной физической величины и электрическими, магнитными и другими свойствами и параметрами вещества. Внутренние эффекты в свою очередь подразделяются на простые и сложные внутренние эффекты.

Простые внутренние эффекты – эффекты, когда выходной сигнал появляется в результате только одного воздействия (механического, теплового или др.). Другие воздействия считаются несущественными, хотя реально всегда имеют место.

Сложные эффекты – когда естественный выходной сигнал определяется результатом действия не менее двух различных внешних воздействий на вещество [8 с. 5].

На рисунке 4 приведена классификация основных явлений, используемых при измерениях физических величин [9 с. 23].

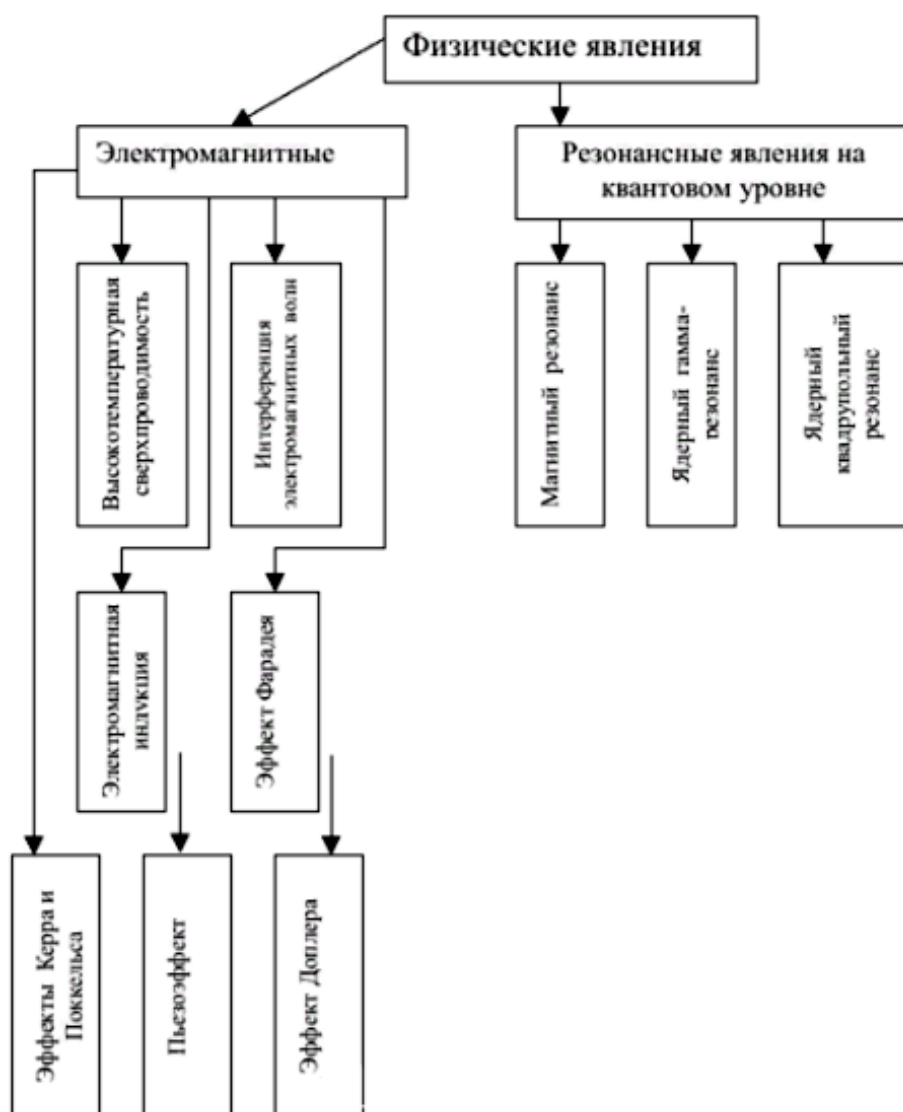


Рисунок 4 – Классификация основных явлений, используемых при измерениях физической величины

В настоящее время существуют и другие классификации, но мы возьмем за основу классификацию Головина (Приложение А).

Выводы по разделу 1

1. Был проведен обзор литературных источников по теме ВКР. Существующий справочник Лукьянцева [3] дает нам понятие физического эффекта и поясняет основные характеристики, связанные с ФЭ. Так же имеется структура описания физических эффектов, но многие эффекты, рассмотренные там, скорее подходят для машиностроения, и они малопригодны для средств измерения.

2. Показано, что предпочтительнее рассматривать физические эффекты, которые даны в статье [6] и представлены в Приложение А.

3. На основе анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что четкого и понятного описания ФЭ для конструирования средств измерений нет. Возникает задача разработки единой и понятной методики описания ФЭ.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

2 МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

2.1 Постановка задачи

Изучив научную библиографию [3], [5], [16], [21], [28] и [29] мы убедились, что для всех физических эффектов нет последовательной и одинаковой методики описания, которая содержала бы все необходимые параметры. Необходимо заняться разработкой методики описания физических эффектов, которые используются в средствах измерения физических величин.

Эту методику необходимо проверить на примере тензорезистивного и емкостного эффектов, которые используются для измерения давления.

2.2 Требования к методике описания физических эффектов при измерении давления

Методика – система правил, изложение методов обучения чему-либо или выполнения какой-нибудь работы [10].

За основу возьмем ранее предложенную нами методику, которая была опубликована в журнале вестник ЮУрГУ [11, с. 2]:

- 1) описание математической модели физического эффекта;
- 2) описание физической реализации данного эффекта;
- 3) представление зависимости выходного сигнала датчика давления от входной величины;
- 4) графическое представление данной зависимости;
- 5) конструктивная реализация физического эффекта в датчике.

Данная методика имеет такие преимущества, как наглядность и простоту изложения [11, с. 2].

Предложим следующую методику описания физических эффектов отличную от предложенной Лукьянцем, именно областью применения физических эффектов.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		20

Проиллюстрируем данную методику на примере тензорезистивного и емкостного эффектов. Она имеет следующий вид:

1. Наименование физического эффекта для измерения давления.
2. Краткое описание физического эффекта для измерения давления.
3. Наименование воздействия.
4. Наименование результата воздействия.
5. Структурная схема физического эффекта для измерения давления.
6. Параметры физического объекта (материала, вещества), входящие в модель ФЭ.
7. Описание математической модели физического эффекта.
8. Описание физической реализации данного эффекта.
9. Условия проявления ФЭ, внешние факторы, препятствующие его проявлению.
10. Представление зависимости выходного сигнала датчика давления от входной величины.
11. Графическое представление данной зависимости.
12. Конструктивная реализация физического эффекта в датчике давления.
13. Вид давления.
14. Область применения ФЭ.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

2.3 Описание физических эффектов, используемые для измерения давления

2.3.1 Тензорезистивный эффект

Одним из востребованных физических эффектов, реализованных в датчиках давления, является тензорезистивный эффект. Данное явление связано с изменением электрического сопротивления при механической деформации. Данный эффект задействуют в датчиках давления, в качестве тензодатчика (реагирующее на механическую деформацию, вызванную механическим напряжением).

На тензорезистор воздействует сила, а результатом воздействия является изменение электрического сопротивления проводника (рисунок 5).

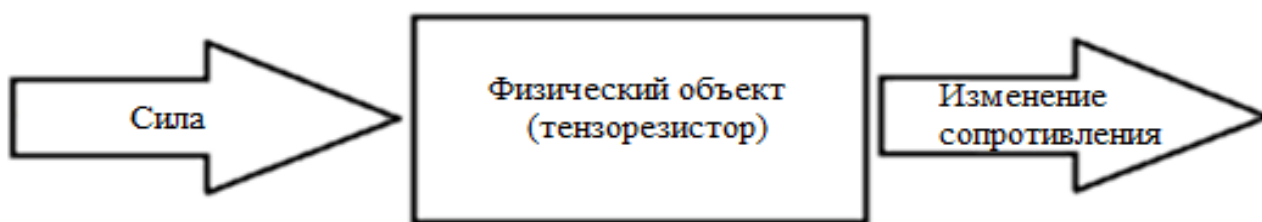


Рисунок 5 – Структурная схема тензорезистивного эффекта

Для любого типа тензочувствительных материалов, проводниковых и полупроводниковых, тензоэффект характеризуется величиной тензочувствительности, который устанавливает связь между относительным изменением сопротивления и относительной деформацией в направлении измерений [13, с.50].

Материал, который наиболее часто используется в тензорезисторе, являются константан и нихром [17, с. 3]. Их характеристики представлены в таблице 2.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Таблица 2 – Характеристики материалов

Материал	Состав	Тензо-чувствительность	Удельное электросопротивление * 10 ⁶ , Ом*м	Рабочая температура, К
Константан	60% Cu, 40% Ni	2	0,44- 0,52	673
Нихром	80% Ni, 20% Cr	2,1- 2,3	1,0- 1,1	1273

В качестве образца возьмем проводник – резистор, на который оказывает давление сила F , в результате чего длина проводника увеличивается, а площадь поперечного сечения уменьшается, при этом объем остается постоянным. Сопротивление резистора определяется по следующей формуле 2:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала [Ом · м],

S – площадь проводника [м²],

l – длина проводника [м].

Самыми первыми в своем роде тензоэлементами были металлические нити, расположенные на диэлектрической пленке. В настоящее время они изготавливаются из фольги и константана (сплава меди и никеля) или монокристаллических полупроводниковых материалов (кремний, легированный бром) [15, с. 3].

Приведем наглядный пример проводника-резистора, на который действуют силы F , в следствии чего увеличивается его длина и уменьшается площадь поперечного сечения. (рисунок 6 и 7).

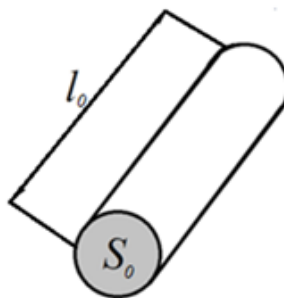


Рисунок 6 – Проводник в исходном состоянии

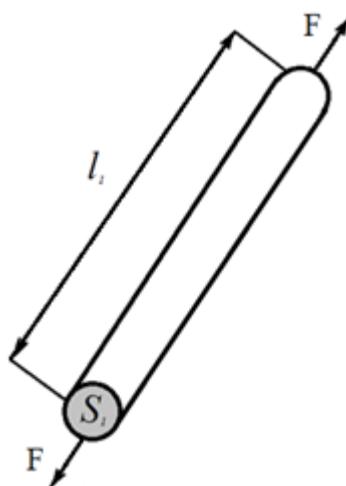


Рисунок 7 – Проводник в деформированном состоянии

где F – силы воздействующие на резистор, [Ом];

l_0 – длина проводника, [м];

l_1 – длина деформированного проводника, [м];

S_0 – площадь проводника, [м²];

S_1 – площадь деформированного проводника, [м²];

Найдем сопротивление резистора в обычном состоянии по формуле (2):

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{S_0}.$$

Найдем сопротивление резистора в деформированном состоянии:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S_1}.$$

Найдем разницу между сопротивлением резистора в обычном состоянии и в деформированном:

$$\Delta R = R_0 - R_1.$$

Обычно, в реальных устройствах, тензорезистор (рисунок 8) наклеивается на пружинную диафрагму. Под воздействием приложенного давления диафрагма деформируется, вместе с ней деформируется и тензорезистор [5, с. 64].

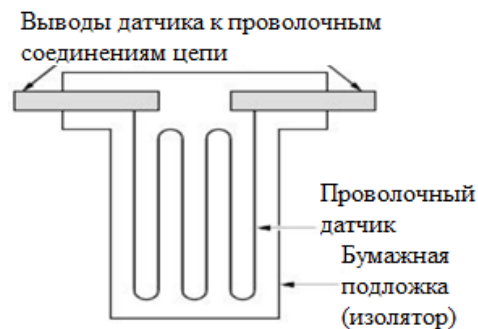


Рисунок 8 – Классический пример тензорезистора.

Классическая система тензорезистивного сенсора, представленная на рисунке 8, сделана из металла, проводника и подложки. При деформации в упругих пределах применяемого металла можно многократно нагружать сенсор без увеличения погрешности. Металлы, однако, подлежат усталости при повторных циклах нагружения, и они начинают «течь», если напряженность выше их упругого предела. Это общий источник ошибки металлических тензорезистивных сенсоров: если приложено давление выше нормы, они имеют тенденцию потерять точность из-за пластической деформации подложки и резистора.

Современные технологии производства сделали возможным изготовление подложки из кремния вместо металла. Кремний показывает

									Лист
									25
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

высокие линейные упругие свойства в узком диапазоне деформаций и высокое сопротивление к усталости. Когда кремниевый тензорезистивный сенсор перенапрягается, он разрушается полностью, а не «течет», как металлический сенсор. Это считают лучшим результатом, поскольку это ясно указывает на потребность в замене сенсора, тогда как металлический тензорезистивный сенсор продолжает функционировать после перенапряжения. Чтобы определить его неисправность, датчик давления необходимо демонтировать и проверить на установке для калибровки [5, с. 64].

Условия проявления тензорезистивного эффекта зависят от вида деформации и температуры.

При реализации тензорезистивного эффекта для измерения давления используется мост Уитстона. Данная мостовая схема является наиболее популярной для измерения давления (Рисунок 9).

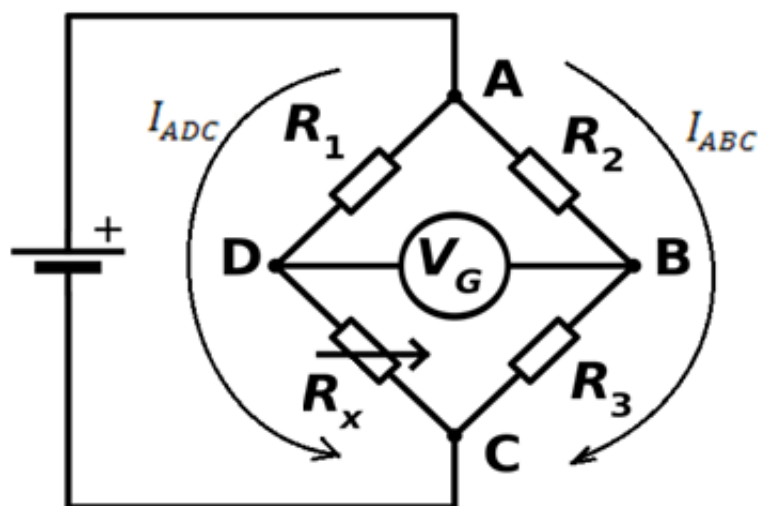


Рисунок 9 – Мостовая схема Уитстона, используемая в датчиках давления
 R_1, R_2, R_3 – резисторы, номиналы которых известны; V_G – гальванометр;
 R_x – тензорезистор

Данный измерительный мост широко используется для измерения сопротивления, где можно реализовать тензорезистивный эффект [12, с. 67].

Тензорезистор R_x крепится на элемент, подверженный деформации. Полезным сигналом в данном случае является напряжение на диагонали моста между точками D и B. Если выполняется равенство (3), то мост находится в состоянии равновесия, следовательно напряжение на диагонали будет равно нулю:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}. \quad (3)$$

При появлении деформации, R_x меняет свою величину и мост выходит из состояния равновесия, что приводит к возникновению ненулевого напряжения, в этом случае имеет место выражение (4):

$$\frac{R_1}{R_2} \neq \frac{R_3}{R_x}. \quad (4)$$

Найдем данное напряжение измерительной диагонали U_{DB} моста, через сопротивления плеч и напряжение питания U_{AC} моста. Напряжение U_{DB} :

$$\begin{aligned} U_{DB} &= \varphi_D - \varphi_B = (\varphi_C + U_{R_2}) - (\varphi_C + U_{R_x}) = U_{R_2} - U_{R_x}, \\ U_{DB} &= I_{ADC} \cdot R_2 - I_{ABC} \cdot R_x. \end{aligned} \quad (5)$$

Токи I_{ADC} и I_{ABC} равны соответственно:

$$I_{ADC} = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2}, \quad (6)$$

$$I_{ABC} = \frac{U_{AC}}{R_3 + R_x}. \quad (7)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Таким образом, напряжение U_{DB} будет равно:

$$U_{DB} = \frac{U_{AC}}{R_1+R_2} \cdot R_2 - \frac{U_{AC}}{R_3+R_x} \cdot R_x = U_{AC} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_x}{R_1+R_x} \right) \quad (8)$$

Для примера будем использовать тензорезистор ФКП-3-1000 (1000 Ом) [14]. Согласно паспортным данным ΔR_{MAX} максимальное изменение сопротивления от номинального составляет 6 Ом [15].

В соответствие с номиналом тензорезистора и условием равновесия подбираются остальные параметры моста: $R_1=1000$ Ом, $R_2=1000$ Ом, $R_3=1000$ Ом и зададим напряжение питания $U_{AC} = 20$ В.

Проверим правильность подбора элементов моста по выражению (8):

$$U_{DB} = 20 \cdot \left(\frac{1000}{1000 + 1000} - \frac{1000}{1000 + 1000} \right) = 0 \text{ В}$$

Получим зависимость напряжения измерительной диагонали, как функцию от сопротивления тензорезистора $U_{DB} = f(R_x)$:

$$U_{DB} = 20 \cdot \left(\frac{1000}{1000 + 1000} - \frac{R_x}{1000 + R_x} \right).$$

Представим зависимость $|U_{DB}| = f(R_x)$: графически (рисунок 10).

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

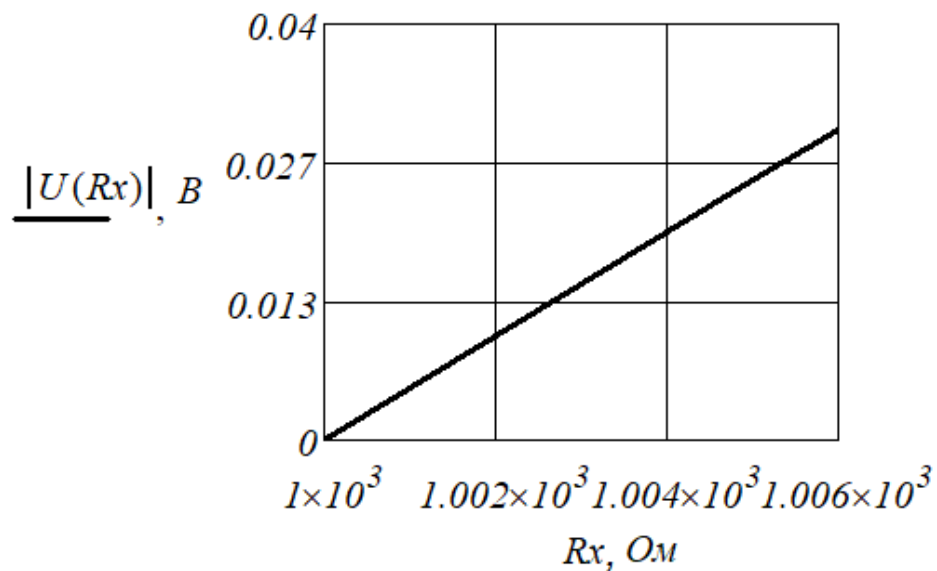


Рисунок 10 – График зависимости $|U_{DB}| = f(R_x)$:

Данная зависимость получилась линейная, так как масштаб был взят малым относительно нелинейности графика из пределов изменения сопротивления тензорезистора.

Схема Уитстона реализуется в датчике [12], конструкция которого представлена на рисунке 11.

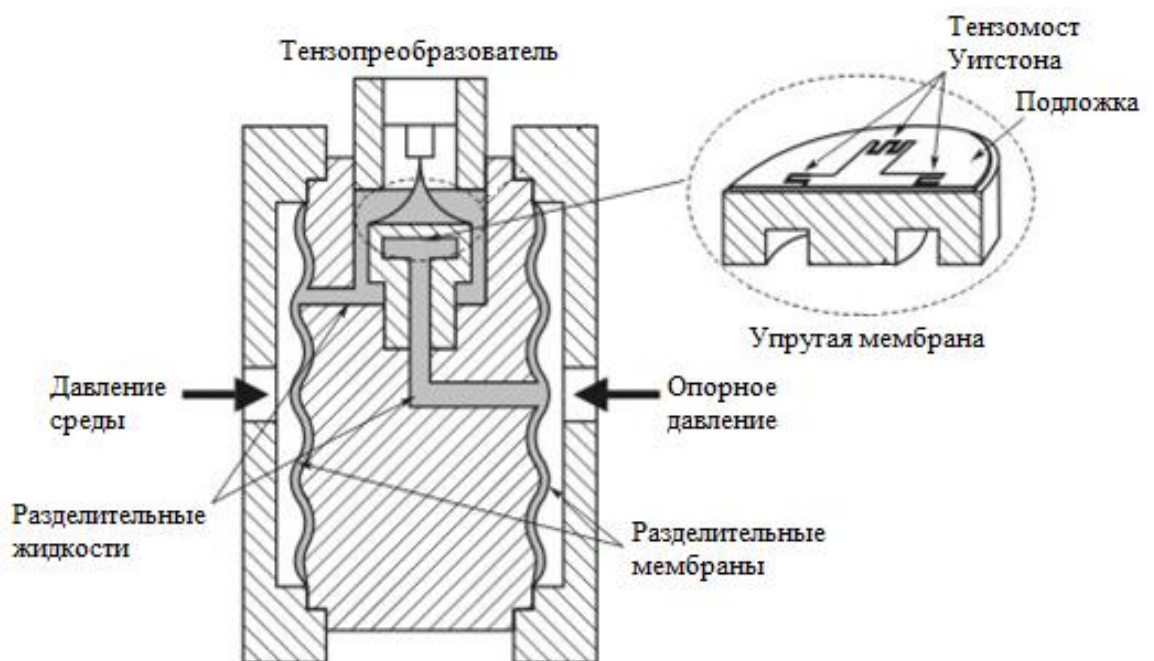


Рисунок 11 – Конструкция тензорезистивного датчика

Данный тип сенсора нашел применение в аналоговых однопредельных датчиках избыточного и абсолютного давления.

Тензорезистивный эффект используется для измерения силы, давления, механических напряжений, крутящих моментов и прочее. На этом эффекте основана работа тензодатчиков [19, с. 35].

Изложенное выше описание тензорезистивного эффекта можно свести в таблицу (Приложение Б).

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		30

2.3.2 Емкостной эффект

Емкостный метод – это метод, основанный на зависимости изменения электрической ёмкости между обкладками конденсатора и измерительной мембраны от подаваемого давления [22, с. 2].

На конденсатор воздействует давление, а результатом воздействия является изменение емкости переменного конденсатора (рисунок 12).

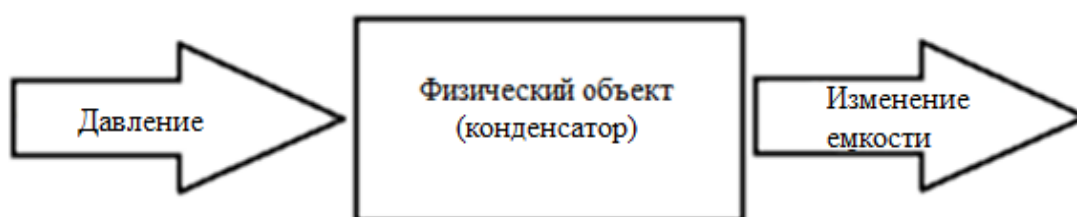


Рисунок 12 – Структурная схема емкостного эффекта

Электрический конденсатор – это элемент электрической цепи, предназначенный для использования его ёмкости. Конденсатор представляет собой систему из двух электродов (обкладок), разделённых диэлектриком, и обладает способностью накапливать электрическую энергию.

В керамических конденсаторах диэлектриком является высококачественная керамика: ультрафарфор, тиконд, ультрастеатит. Обкладкой служит слой серебра, нанесенный на поверхность. Керамические конденсаторы применяются в разделительных цепях усилителей высокой частоты [23, с. 3]. Конденсаторы на основе металлизированной пленки применяются в высоковольтных источниках электропитания. Их характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3– Характеристики материалов

Диэлектрик	Диапазон измерения температуры, °С	Диэлектрическая проницаемость
Силиконовое масло	-50...+200	2,2 ... 2,8

Основным преимуществом ёмкостного метода является защита от перегрузок (измененная мембрана при перегрузке ложится на стенки «обкладки» конденсатора, длительное время не подвергаясь деформации, при снятии перегрузки мембрана восстанавливает исходную форму, при этом дополнительная калибровка сенсора не требуется), также обеспечивается высокая стабильность метрологических характеристик, уменьшение влияния температурной погрешности за счет малого объема заполняющей жидкости непосредственно в ячейке [23, с. 73].

Выражение для емкости плоского конденсатора :

$$C = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (9)$$

где C – емкость плоского конденсатора, [Ф];

S – площадь пластин конденсатора, [м²];

d – расстояние между обкладками, [м];

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;

$\varepsilon_0 = 8,87 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая постоянная вакуума, [Ф/м].

В практике измерения давления наибольшее значение и распространение получили ёмкостные преобразователи давления, использующие функциональную зависимость емкости от зазора между электродами $C(d)$ при обеспечении одновременно минимально возможной зависимости $C(\varepsilon)$ и $C(S)$. На рисунке 13 и 14 приведен датчик давления, использующий функциональную зависимость $C(d)$. [11, с. 12].

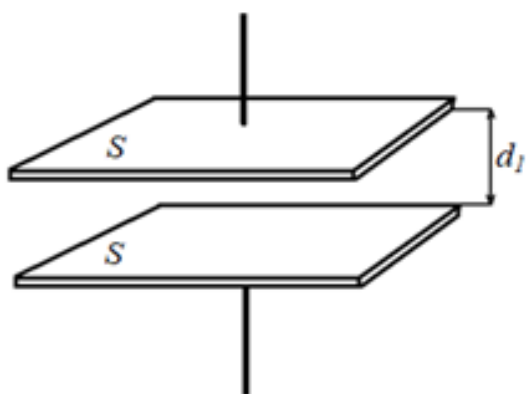


Рисунок 13 – Конденсатор без воздействия сил на обкладки

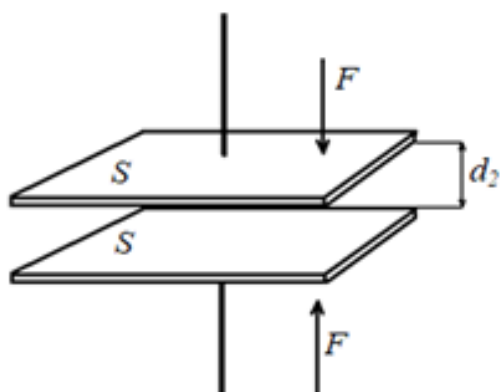


Рисунок 14– Конденсатор под воздействием сил F на обкладки

Наряду с решением основной задачи по повышению термоустойчивости емкостных датчиков давления, усилия разработчиков за рубежом и у нас в стране направлены на решение задач повышения линейности и стабильности характеристики преобразования, дистанционности, защиты от агрессивной среды и перегрузки давлением, снижения габаритных размеров, массы и стоимости [25, с. 42].

Для защиты емкостного чувствительного элемента датчика от воздействия агрессивной среды, давление внутрь передается при помощи разделительных мембран, а опорные поверхности корпуса емкостных чувствительных элементов выполнены по профилю этих мембран. Внутренняя полость между мембранами заполняется жидким диэлектриком. Это решение используется с целью исключения выхода из строя преобразователя при избыточных импульсных

									Лист
									33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

давлениях, возникающих в измеряемых средах, поскольку разделительные мембраны, защищающие рабочую мембрану от агрессивных сред, изготавливаются очень тонкими с тем, чтобы их жесткость была много меньше жесткости рабочей мембраны (упругого чувствительного элемента). Неподвижные электроды емкостного чувствительного элемента профилированы под сферу [22, с. 3].

В зависимости от того, какой параметр в датчике является информативным (связанным функционально с измеряемой величиной), с какой средой, и в каких внешних условиях он должен работать, выбирают принципы его проектирования: принцип действия и конструктивное выполнение, материалы элементов конструкции, технологию изготовления и принципы преобразования выходного сигнала в форму, удобную для передачи и регистрации. По конструктивному решению чувствительных элементов (конденсаторов) емкостные датчики подразделяют на плоскопараллельные, коаксиальные, стержневые, с обкладками, выполненными из сеток, и т.д. Несмотря на кажущиеся отличия, конструктивные решения можно свести в основном к двум типам: коаксиальному и плоскопараллельному [22, с. 3].

Датчики с переменными расстояниями (зазорами) d обычно применяют при измерениях, связанных с малыми перемещениями (менее 1 мм), например, прогибами мембран датчиков давления; датчики с переменной площадью перекрытия обкладок контролируемой средой применяют в уровнемерах, а датчики с переменной диэлектрической проницаемостью – в измерителях несплошности [4, с. 15].

Дальнейшее развитие датчиков давления диктует необходимость повышения их надежности, точности и одновременного уменьшения габаритных размеров. Это связано, в первую очередь, с широким использованием датчиков на подвижных объектах, где уменьшение габаритов и массы оборудования позволяет увеличить общий коэффициент полезного действия объекта и объем формируемой информации. Особенно важно

это при работе датчиков в ограниченных пространствах: во внутренних полостях агрегатов, двигателей, гидроцилиндров, под обшивками летательных аппаратов, в переносных устройствах, где ограничения в габаритных размерах играют решающую роль при выборе датчика. Кроме того, снижение габаритно-весовых показателей ведет к уменьшению энергопотребления и материалоемкости, однако при этом должны сохраняться метрологические характеристики датчиков. Именно такие задачи на сегодняшний день стоят перед разработчиками современной датчиковой аппаратуры [22, с. 6].

Ключевым элементом в емкостном датчике давления является емкостная ячейка, которая имеет конструкцию, представленную на рисунке 15.

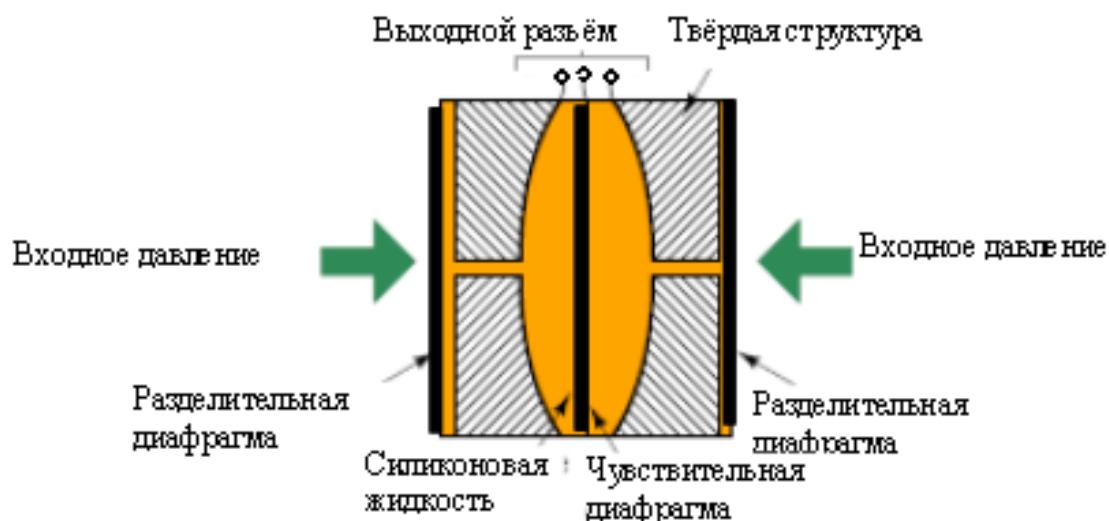


Рисунок 15– Конструкция емкостной ячейки

Для измерения давления с использованием емкостного эффекта используем мост Саути, представленный на рисунке 16.

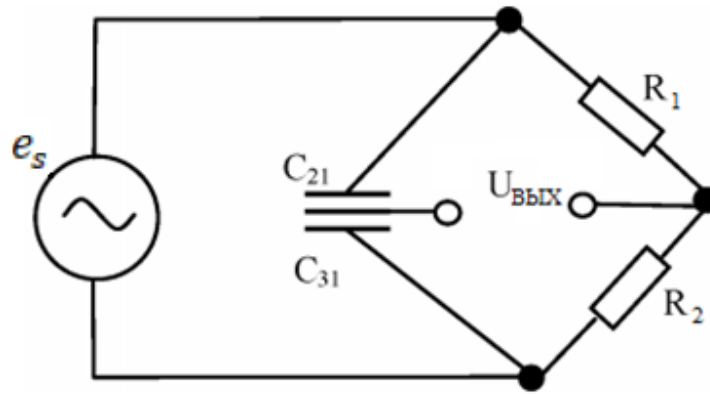


Рисунок 16 – Схема моста Саути

C_{21}, C_{31} – конденсаторы с неизвестной емкостью; R_1, R_2 – резисторы известных номиналов; e_s – переменный источник питания

e_s

Условия проявления емкостного эффекта зависит от давления и изменения температуры. Под влиянием температуры изменяются размеры обкладок, величины зазоров, значения диэлектрической проницаемости диэлектриков.

Для моста переменного тока условие баланса выполняется следующем соотношении импедансов:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_3}{z_4} \quad (10)$$

где z_i – импеданс i -ветви.

Напряжение на выходе измерительной схемы имеет вид [13]:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}}, \quad (11)$$

где C_{21}, C_{31} – емкости конденсаторов емкостной ячейки, [Ф],

e_s – напряжение источника питания, [В].

Зададим конкретные номиналы элементов электрической схемы: $R_1, R_2 = 1$ кОм, $C_{21}, C_{31} = 1$ мкФ, $e_s = 20$ В, $\omega = 100$ рад/с.

Проверим условие равновесия моста по формулам (6) и (7) соответственно:

$$\frac{1}{i \cdot w \cdot C_{21}} = \frac{1}{i \cdot w \cdot C_{31}},$$

$1 = 1$ – равенство выполняется,

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{20}{2} \cdot \frac{10^{-6} - 10^{-6}}{10^{-6} + 10^{-6}} = 0.$$

Получим зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta C)$ по формуле (7):

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{20}{2} \cdot \frac{(10^{-6} + \Delta C) - (10^{-6} - \Delta C)}{(10^{-6} + \Delta C) + (10^{-6} - \Delta C)} = 10^{10} \cdot \Delta C,$$

где ΔC – изменение ёмкостей конденсаторов C_{21} и C_{31} , [Ф].

Графическая зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta C)$ представлена на рисунке 17.

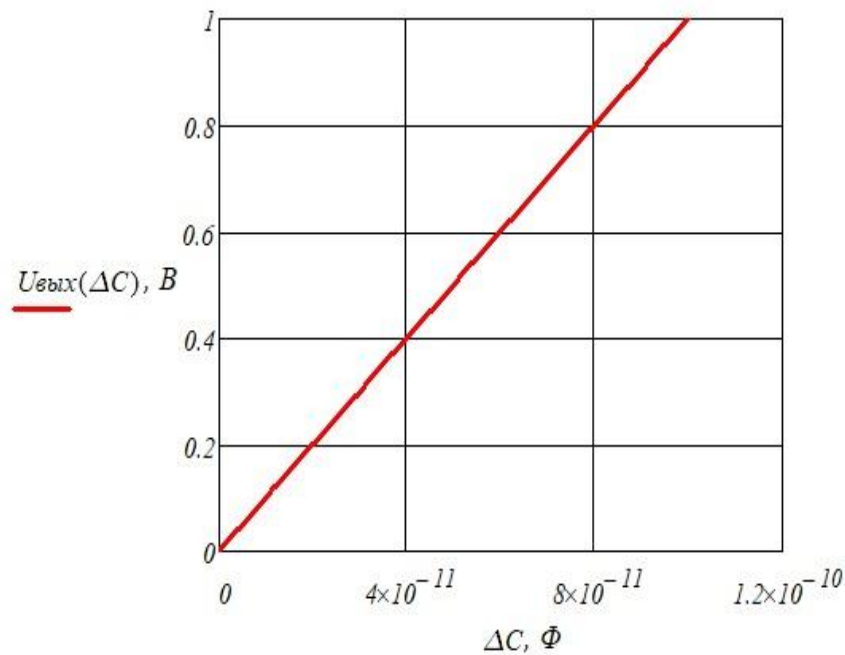


Рисунок 17 – Графическая зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta C)$

Электрическая схема реализуется в сенсоре, представленном на рисунке 18.

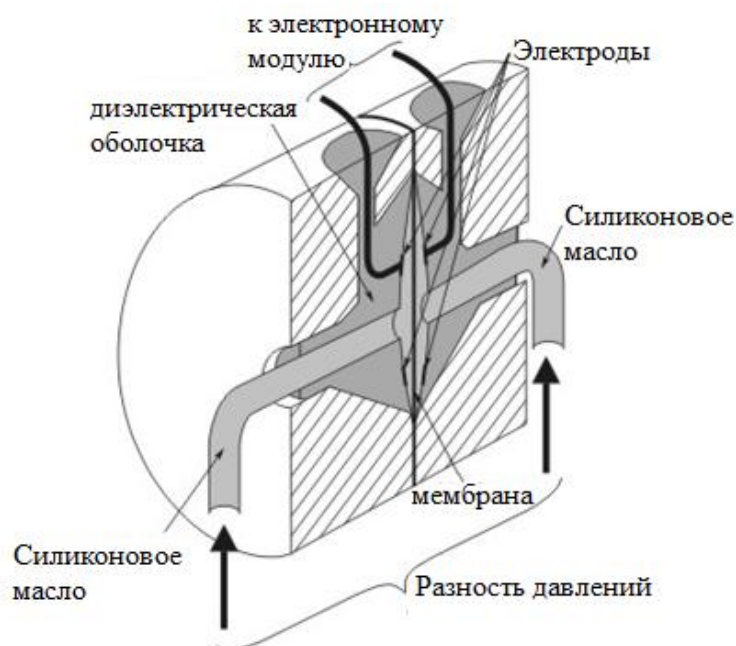


Рисунок 18 – Измерительный преобразователь емкостного датчика давления

Емкостной эффект используется в качестве уровнемеров, в качестве динамометров – приборов для измерения давлений сил; для измерения кручения вала; измерения вибраций, ускорений, однако наиболее широко они используются для измерения малых перемещений и величин, легко преобразуемых в перемещение, например давлений.

Изложенное выше описание емкостного эффекта можно свести в таблицу (Приложение В).

До недавнего времени конструкторы относились с предубеждением к емкостным датчикам, полагая, что схемы с емкостными датчиками не обеспечивают ни достаточной точности, ни стабильности работы приборов. Считалось обязательным для получения устойчивого сигнала на выходе емкостного датчика питать его напряжением высокой частоты, достигающей сотен килогерц, а иногда даже десятков мегагерц. Наличие такой высокой частоты в свою очередь приводило к потерям в паразитных емкостях, соединительных

проводах и т. п. Для того чтобы повысить амплитуду сигнала, снимаемого с емкостного датчика, и улучшить стабильность показаний, некоторые авторы разработок применяли в первом каскаде усилителя электрометрические лампы, допускающие включение сотен мегом в цепь управляющей сетки и, однако все эти меры мало улучшали стабильность систем с емкостными датчиками и в то же время значительно усложняли конструкцию приборов [22, с. 23].

Проведенные в настоящее время работы показали, что причина нестабильности работы систем с емкостными датчиками лежит в неправильном подходе конструкторов к проектированию датчиков, в частности, в неправильном расположении изолирующих элементов конструкции, нестабильность свойств которых и приводит к ошибкам в работе систем. Эти трудности оказались преодолимыми, и уже созданы приборы с емкостными датчиками, обеспечивающие высокие точности и стабильность работы, выдерживающие тяжелые режимы эксплуатации.

В настоящее время установлено, что емкостные датчики обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими датчиками. К их достоинствам относятся [22, с. 23]:

- 1) потребность весьма малых усилий для перемещения подвижной части (ротора) емкостного датчика;
- 2) малое потребление энергии;
- 3) простота изготовления;
- 4) использование дешевых материалов;
- 5) отсутствие контактов (в некоторых отдельных случаях - один токосъем с помощью кольца и щетки);
- 6) высокая точность и стабильность работы систем, с емкостными датчиками;
- 7) возможность широкой регулировки приборов с некоторыми типами емкостных датчиков.

К недостаткам емкостных датчиков следует отнести высокое внутреннее сопротивление, достигающее десятков и даже сотен мегом, высокие требования к

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

сопротивлению крепежных изолирующих деталей и необходимость работы на повышенной (по сравнению с 50 Гц) частоте. Однако в большинстве случаев крепления емкостных датчиков могут быть выполнены и из обычных материалов, а практика показывает, что емкостные датчики дают хорошие результаты на широко распространенной частоте 400 Гц.

Ценные качества емкостных датчиков – малая величина механического усилия, необходимого для перемещения его ротора, возможность регулировки выхода следящей системы и высокая точность работы – делают емкостные датчики незаменимыми в приборах, в которых допускаются погрешности лишь в сотые и даже тысячные доли процента [24, с. 53].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Выводы по разделу 2

1. В данном разделе ВКР рассмотрен вариант методики, применительно к физическим эффектам, используемых для измерения давления. Особенности данной методики заключается в том, что позволяет учесть математическую модель, физическую реализацию данного эффекта, вид давление и т.д.

2. При изучении физических эффектов, используемых для измерения давления, в методику было добавлено несколько дополнительных пунктов. Таких как: наименование воздействия и результата воздействия оказывающее влияние на физический эффект, область применения ФЭ и т. д.

3. Рассмотрим использование предложенной методики, для описание другой группы физических эффектов, а именно измерение температуры.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

3 МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1 Постановка задачи

Нами был предложен вариант методики описания физических эффектов, используемых для измерения давления.

Необходимо проверить универсальность этой методики для описания других ФЭ.

Сделаем это на примере физических эффектов, которые используются для измерения температуры.

3.2 Требования к методике описания физических эффектов при измерении температуры

1. Наименование физического эффекта для измерения температуры.
2. Краткое описание физического эффекта для измерения температуры.
3. Наименование воздействия.
4. Наименование результата воздействия.
5. Структурная схема физического эффекта для измерения температуры.
6. Параметры физического объекта (материала, вещества), входящие в модель ФЭ.
7. Описание математической модели физического эффекта для измерения температуры.
8. Описание физической реализации данного эффекта.
9. Условия проявления ФЭ, внешние факторы, препятствующие его проявлению.
10. Представление зависимости выходного сигнала датчика давления от входной величины.
11. Графическое представление данной зависимости.
12. Конструктивная реализация физического эффекта в датчике температуры.
13. Вид температуры.
14. Область применения ФЭ.

									Лист
									42
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

3.3 Описание физических эффектов, используемые для измерения температуры

3.3.1 Эффект Зеебека

Основной способ добычи электричества в большом количестве в настоящее время осуществляется за счет явления электромагнитной индукции, которое предполагает механическое движение проводника в магнитном поле. Однако существует другой способ получения этого вида энергии: с помощью температуры. Чтобы понять, в чем заключается суть этого процесса, следует рассмотреть эффект Зеебека [33, с. 36].

В физике под термоэлектрическими процессами понимают процессы обратимого характера, которые связаны с явлениями переноса заряда (электрический ток) и тепла (теплопроводность). Выделяют три разных термоэлектрических явления, которые связаны между собой. Это эффекты:

Зеебека;

Пельтье;

Томсона (Кельвина).

Возникновение термо-ЭДС в цепи при различных температурах контактов материала.

На термопару воздействует разная температура, а результат воздействия преобразование в термоэлектродвижущую силу (термо-ЭДС) (Рисунок 19).

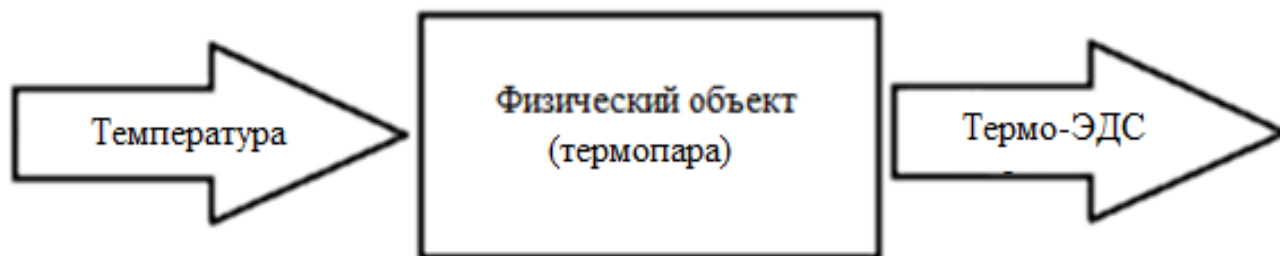


Рисунок 19 – Структурная схема эффекта Зеебека

Для изготовления термопар использует несколько видов сплавов металлов. Каждый сплав обладает характеристиками и предназначен для конкретного применения. Как показано в таблице 4 каждый из сплавов обозначен стандартным буквенным кодом.

Каждый вид проволоки термопары, можно определить с помощью цветового кода для отдельных проводников. Существует несколько систем цветового кодирования, используемых по всему миру, но в большинстве из них отрицательный вывод помечается красным цветом.

Таблица 4 – Вид термопар

Тип	Размер	Диапазон ° F	Диапазон ° C
J (железо и константан)	8	-70 до 1400	-57 до 760
	14	-70 до +1100	-57 до 593
	20	-70 до 900	-57 до 482
	24	-70 до 700	-57 до 371
K (хромель и алюмель)	8	-70 до 2300	-57 до 1260
	14	-70 до 2000	-57 до 1093
	20	-70 до 1 800	-57 до 982
	24	-70 до +1600	-57 до 870
N (нихросил и нисил)	8	-70 до 2300	-57 до 1260
	14	-70 до 2000	-57 до 1093
	20	-70 до 1800	-57 до 982
	24	-70 до +1600	-57 до 870
T (медь и константан)	14	-70 до 700	-57 до 371
	20	-70 до 500	-57 до 260
	24	-70 до 400	-57 до 200
E (хромель и константан)	8	-70 до +1600	-57 до 871
	14	-70 до 1200	-57 до 649
	20	-70 до 1000	-57 до 538

Продолжение таблицы 4

R, S (платина и платина / 13% родия)	24	-50 до +2650	-46 до 1 454
B (платина / родий 6% & платиной / 30% родия)	24	32 до 2650	0 до 1454

Термопары типов R, S и B обычно оснащены керамической закрытой защитной трубкой. Для металлических рукавов или защитных труб требуется внутренняя, закрытая защитная трубка.

Часто используемые типы термопар это R, S, B [31, с. 3]. Их характеристики представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики термопар

Тип	Сочетание материалов	Максимальная температура применения	Возможный диапазон температур
		°C	
R	Платина – 13% родий/платина	1770	от -50 до 1768°C
S	Платина – 10% родий/платина	1770	от -50 до 1768°C
B	Платина – 30% родий/платина-6%	1825	от 0 до 1820°C

В 1823 г. Т. Зеебек установил, что в цепи, состоящей из разнородных проводящих материалов, возникает термоэлектрический ток, если контакты материалов имеют различную температуру. Если цепь разорвать в произвольном месте, то на концах разомкнутой цепи появляется разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой (термоЭДС). Зеебек доказал, что разность потенциалов в разомкнутой цепи dU зависит от разности температур и вида материала [32, с. 16].

$$dU = \alpha dT, \quad (12)$$

или

$$U = \alpha(T_2 - T_1), \quad (13)$$

где $\alpha = \frac{dU}{dT}$ – термоэлектрический коэффициент Зеебека.

dU принято считать положительной величиной, если потенциал горячего контакта выше, чем потенциал холодного.

Из пункта выше можно сделать вывод о том, что представляет собой это термоэлектрическое явление. Его суть заключается в следующем: если соединить два любых материала между собой в один контур и подвергнуть их контакты разности температуры, то в контуре потечет ток (Рисунок 20).

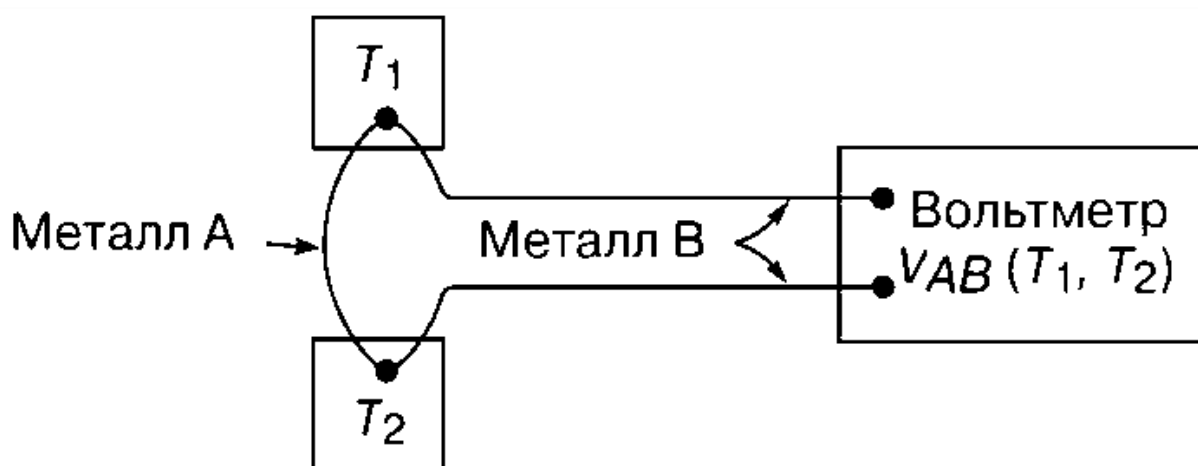


Рисунок 20 – Схематическое изображение измерения термоэлектродвижущей силы: V_{AB} – термоэлектродвижущая сила (ТЭДС)

Заметим, что для наблюдения этого эффекта должны выполняться следующие условия:

- Наличие замкнутого контура (электрический ток не существует в разорванной цепи).
- Наличие контакта из двух разнородных металлов (если проводники, приводимые в контакт, будут сделаны из одного материала, то никакой разности

потенциалов не будет наблюдаться). Этими материалами могут быть такие пары, как металл и другой металл, металл и полупроводник или два полупроводника разного типа (р и n).

- Наличие разности температур между двумя контактами проводников. Эта разность лежит в основе явления возникновения ЭДС (сила электродвижущая). Отметим, что нагревать (охлаждать) следует именно контакт двух материалов, а не какой-либо один из них.

Возникновение эффекта Зеебека вызвано несколькими составляющими [32, с. 62].

1. Различная зависимость средней энергии электронов от температуры в различных веществах.

Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; В полупроводниках в дополнение к этому концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

ЭДС, возникновение которой описывается данным механизмом, называется объёмной ЭДС.

2. Различная зависимость от температуры контактной разности потенциалов.

Контактная разность потенциалов вызвана отличием энергий Ферми у контактирующих различных проводников. При создании контакта химические

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

потенциалы электронов становятся одинаковыми, и возникает контактная разность потенциалов, равная

$$U = \frac{F_2 - F_1}{e}, \quad (14)$$

где F – энергия Ферми, e – заряд электрона.

На контакте тем самым существует электрическое поле, локализованное в тонком при контактном слое. Если составить замкнутую цепь из двух металлов, то U возникает на обоих контактах. Электрическое поле будет направлено одинаковым образом в обоих контактах – от большего F к меньшему. Это значит, что если совершить обход по замкнутому контуру, то в одном контакте обход будет происходить по полю, а в другом – против поля.

Если температура одного из контактов изменится на dT , то, поскольку энергия Ферми зависит от температуры, U также изменится. Но если изменилась внутренняя контактная разность потенциалов, то изменилось электрическое поле в одном из контактов, и поэтому циркуляция вектора E будет отлична от нуля, то есть появляется ЭДС в замкнутой цепи. Данная ЭДС называется контактная ЭДС.

Если оба контакта термоэлемента находятся при одной и той же температуре, то и контактная, и объёмная термоЭДС исчезают [32, с. 25].

Возьмем термопару платина – 13% родий/платина, которая имеет коэффициент термоэдс $\alpha=6,4$ мкВ/С°.

Температуру холодного спая возьмем равную комнатой температуре $T_1=25$ С°. А температуру горячего спая возьмем от -50 до 1768 С°.

Подставим данные в формулу и получим график зависимости напряжения от температуры (рисунок 21).

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

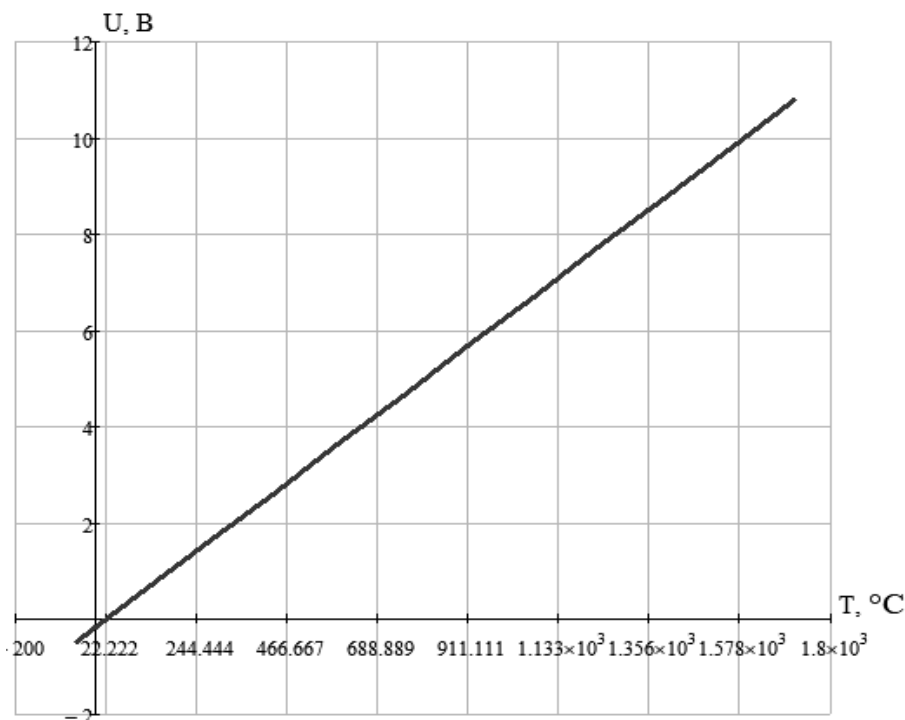


Рисунок 21– График зависимости $|U|=f(T)$

При измерении температуры с помощью термопар используются непосредственное измерение термоЭДС с помощью милливольтметра.

Так как значение термоЭДС, развиваемой термопарой, невелико, для непосредственного измерения ее необходимы высокочувствительные милливольтметры, магнитоэлектрического типа. Приборы этого типа работают на основе взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по подвижной рамке. Для создания достаточного вращающего момента при весьма небольшом токе рамка выполняется из большого числа витков тонкого медного провода. Противодействующий момент создается спиральными пружинами, по которым и подводится ток в рамку. Шкала милливольтметра градуируется непосредственно в градусах и на ней указывается тип термопары, для которой предназначен данный милливольтметр [33, с. 38].

Обозначим через R_B сопротивление милливольтметра, R_T – сопротивление термопары, $R_{\text{ш}}$ – сопротивление соединительных проводов.

Ток, проходящий по рамке милливольтметра под действием термоЭДС $E_{ТП}$ [34, с. 142];

$$I_B = \frac{E_{ТП}}{R_B + R_T + R_{II}} \quad (15)$$

Из этой формулы видно, что показания прибора зависят не только от термоЭДС $E_{ТП}$, но и от сопротивлений R_B , R_T , R_{II} . Так как шкала прибора уже проградуирована для термопары определенного типа, то сопротивления R_B и R_T уже учтены при градуировке. А сопротивления внешней цепи также указываются на шкале (обычно 0,6; 5; 15 или 25 Ом).

Оценим показания прибора, шкала которого проградуирована в милливольтмах. Напряжение на его зажимах $U_B = I_B \cdot R_B$ [34, с. 146].

С учетом (4)

$$U_B = \frac{E_{ТП} R_B}{R_B + R_T + R_{II}} \quad (16)$$

Обозначим внешнее сопротивление цепи $R_{BH} = R_T + R_{II}$ из (15) термоЭДС

$$E_{ТП} = \frac{U_B(R_B + R_{BH})}{R_B} = U_B + U_B \cdot \frac{R_{BH}}{R_B} \quad (17)$$

Из (6) видно, что измеряемое милливольтметром напряжение будет всегда меньше, чем ЭДС термопары, на $U_B(R_{BH}/R_B)$. Эта величина будет тем меньше, чем больше сопротивление милливольтметра R_B по сравнению с внешним сопротивлением R_{BH} . Обычно милливольтметры имеют кроме сопротивления рамки еще добавочное сопротивление из манганина, что в сумме дает не менее 100 Ом [34, с. 156].

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	50
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Обычно градуировка термопар осуществляется при температуре холодного спая $\theta_2 = 0$. На практике при измерении температуры θ_1 холодный спай имеет $\theta_2 \neq 0$. Следовательно, по измеренной термоЭДС нельзя точно определить θ_2 . Необходимо вводить так называемую поправку на температуру холодных спаев.

Если температура холодных спаев известна, то к показаниям измерительного прибора добавляют поправку, соответствующую термоЭДС при θ_2 . Эту поправку следует брать из градуировочной кривой [34, с. 173].

Поправку на температуру холодных спаев можно ввести и механическим путем: при отключенной термопаре сместить стрелку на шкале прибора на отметку, соответствующую температуре холодных спаев (обычно температуре окружающей среды). Применяют также схемы автоматической коррекции температурных погрешностей, в которых используются свойства терморезисторов изменять сопротивление в зависимости от температуры.

Рассмотрим принципиальную схему включения термопары и милливольтметра (рисунок 22). Измерительный прибор может находиться на довольно значительном удалении от термопары. Длина соединительных проводов может составлять несколько метров. В местах присоединения этих проводов также возникают термоЭДС [35].

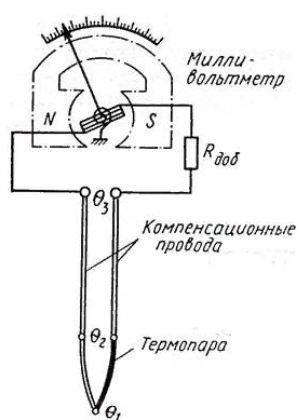


Рисунок 22 – Принципиальную схему включения термопары и милливольтметра

						Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	

Для точной компенсации этих термоЭДС необходим определенный подбор материалов проводов и термопар. Для присоединения термопар служат специальные так называемые компенсационные провода. Каждой паре материалов компенсационных проводов присваивают буквенное обозначение, а каждому материалу придают определенную расцветку, для чего используют оплетку из цветной пряжи или цветные опознавательные нити, проложенные в проводе [35].

Можно привести в пример конструкцию датчика для измерения температуры (рисунок 23) [37, с. 138].

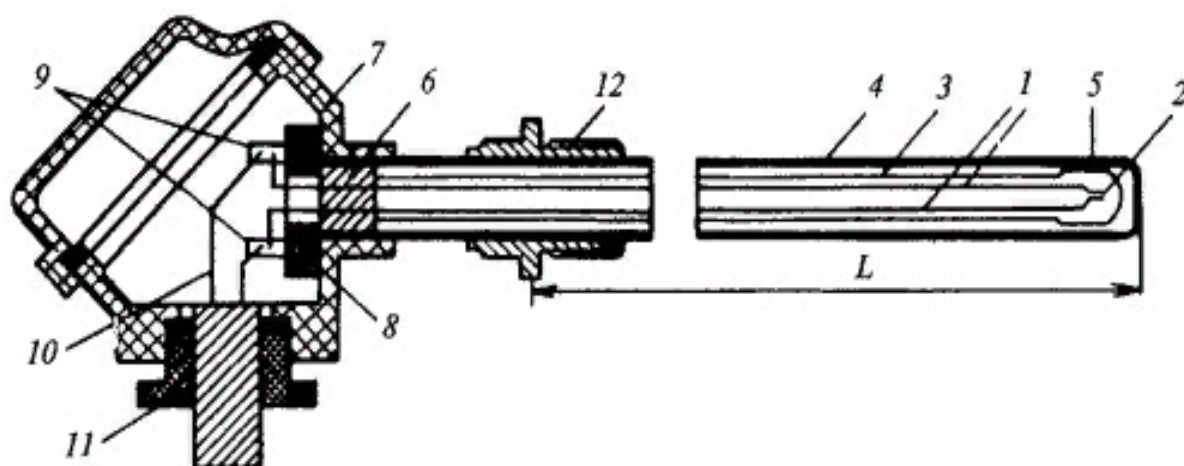


Рисунок 23 – Конструкция датчика температур

- где 1 – термоэлектроды;
 2 – рабочий пай;
 3 – трубка;
 4 – защитная арматура;
 5 – керамический наконечник;
 6 – заливка;
 7 – головка;
 8 – сборка;
 9 – зажимы;
 10 – удлиняющие провода;

11 – герметизированный ввод;

12 – элементы крепления термопреобразователя

Эффект Зеебека используется в качестве генераторов электроэнергии, для измерения температур, а так же в устройствах функциональной теплоэлектроники [36, с. 47].

Наиболее популярным направлением применения эффекта Зеебека являются приборы для измерения температуры, которые называются термопарами. Если известна температура одного конца термопары (комнатная температура), то, погрузив ее второй конец в тело, температуру которого следует определить, и измерив полученную ЭДС, можно легко найти неизвестное значение.

Изложенное выше описание эффекта Зеебека можно свести в таблицу (Приложение Г).

									<i>Лист</i>
									53
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>					

3.3.2 Пьезорезонансный эффект

Пьезоэлектрический резонатор (ПР) – разновидность преобразователей электромеханического типа. Основа пьезорезонатора – механический вибратор из кристаллического или поликристаллического пьезоэлектрического материала, выполняемый обычно в виде элемента правильной формы (прямоугольной пластины, диска, стержня и т. д.). На пьезоэлемент наносится система из двух или более электродов, используемых для возбуждения в нем механических колебаний. Для соединения с источником электрической энергии ПР снабжается токопроводами, а для фиксации в присоединенной конструкции – элементами крепления. В основе работы пьезоэлектрического резонатора лежит пьезоэффект, обеспечивающий преобразование входного электрического напряжения, подводимого к электродам, в механическое напряжение в теле вибратора (обратный пьезоэффект), и ответную реакцию по выходу в виде зарядов на электродах, возникающих в результате деформации вибратора под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) [38 с. 10].

Основой пьезорезонансного частотного датчика является пьезорезонатор, частота которого изменяется под действием измеряемой величины. Изменение частоты может происходить:

- а) при воздействии температуры, которая влияет на геометрические размеры, плотность и, главным образом, на упругие свойства кварца (рисунок 24);
- б) под действием механических напряжений в резонаторе или его деформации, также вызывающих изменение h , ρ и n ;
- в) при присоединении дополнительной массы к резонатору, изменяющей его толщину h и среднюю плотность ρ .

									Лист
									54
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

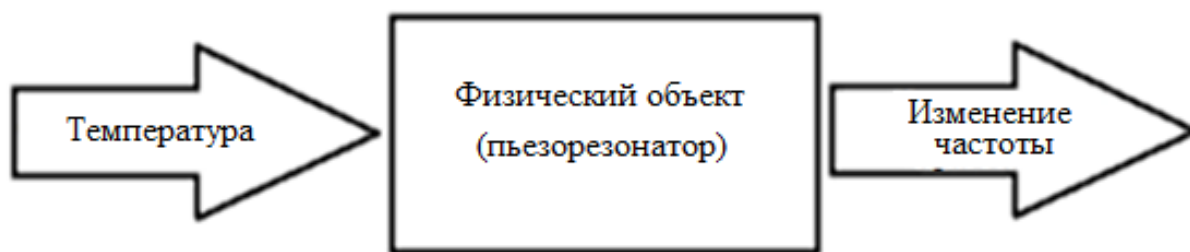


Рисунок 24 – Структурная схема пьезорезонансного эффекта

Кроме кварца используют различные виды пьезокерамики, которые имеют более высокий пьезомодуль (d), но худшие упругие свойства. Все пьезоэлектрики работают при определённом температурном диапазоне, определяемом точкой Кюри [39]. Их характеристики представлены в таблице 6.

Таблица 6– Характеристики материалов

Материал	Температурный диапазон, °С	Добротность колебательного LC-контура
Кварц	530	10^2
Пьезокерамика	150	10^3

По совокупности важнейших показателей для пьезоэлектрических приборов, а именно: диапазону рабочих частот, добротности, временной и температурной стабильности, а также стоимости – пьезоэлектрические резонаторы далеко превзошли другие типы электромеханических резонансных преобразователей [40, с. 27].

Прямой и обратный пьезоэффект описываются линейными соотношениями. Уравнение прямого пьезоэффекта связывает электрическую поляризацию P с механическим напряжением σ [42, с. 5]:

$$P = d \cdot \sigma . \quad (18)$$

Коэффициент пропорциональности d называется пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем), и служит мерой пьезоэффекта.

Обратный пьезоэффект описывается зависимостью [42, с. 5]:

$$x = d \cdot E, \quad (18)$$

где x – деформация;

E – напряженность электрического поля.

Пьезомодуль d для 2 прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение (Рисунок 25 и 26)

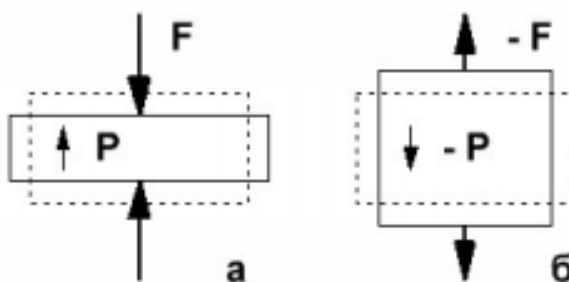


Рисунок 25 – Схематичное изображение прямого (а, б) пьезоэффекта

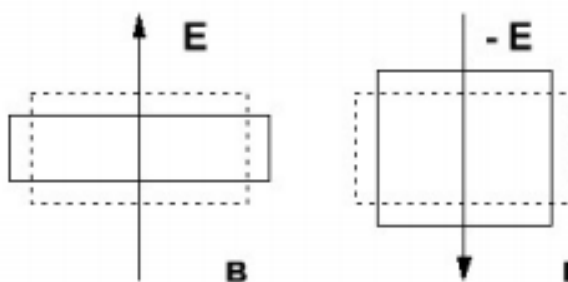


Рисунок 26 – Схематичное изображение обратного (в, г) пьезоэффекта

Стрелками F и E изображены внешние воздействия – механическая сила и напряженность электрического поля. Штриховыми линиями показаны контуры образца из пьезоэлектрика до внешнего воздействия, сплошными линиями – контуры образца при наличии внешнего воздействия. (Для наглядности изменение формы образца во много раз увеличено.);

P – вектор поляризации [41, с. 3].

Применение микропроцессоров и ЭВМ сегодня большое воздействие оказывает на развитие практически всех отраслей *приборостроения*. Эта техника поднимает на новый уровень и пьезорезонансный метод измерений. Можно уверенно говорить о том, что пьезорезонансные методы сформировались сегодня в самостоятельное, интенсивно развивающееся направление, играющее важную роль в технике измерений [41, с. 5].

Пьезоэлектрический резонатор выполняет роль чувствительного элемента в пьезорезонансных датчиках (ПРД) и обладает резонансными электрическими свойствами.

Рассмотрим классификацию предлагаемую в [38]. Такая классификация позволяет проводить анализ средств измерений, используемых при измерении величин, отличающихся по своей природе, но работающих на одном и том же физическом механизме преобразования с единой позиции. В конечном счете, это упрощает оценку метрологических характеристик и конструкции устройств.

Согласно предложенной классификации, почти все пьезорезонансные датчики могут быть отнесены к одной из следующих групп.

1. Пьезорезонансные датчики на основе чувствительности к полям различной физической природы (механическим, тепловым, электромагнитным, оптическим и тому подобное) [38 с. 16].

Среди них наиболее распространёнными являются следующие группы датчиков:

									Лист
									57
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

Пьезорезонансные датчики на основе тензочувствительных пьезорезонаторов, при котором измеряемое воздействие прямо или косвенно создает механические деформации в пьезоэлементе. Преобразование в параметр осуществляется через тензочувствительность пьезорезонатора.

ПДР на основе термочувствительных пьезорезонаторов измеряемый параметр прямо или косвенно воздействует на среднюю температуру пьезоэлемента. Посредством термочувствительности ПР осуществляется преобразование параметра (Рисунок 27) [38 с. 17].

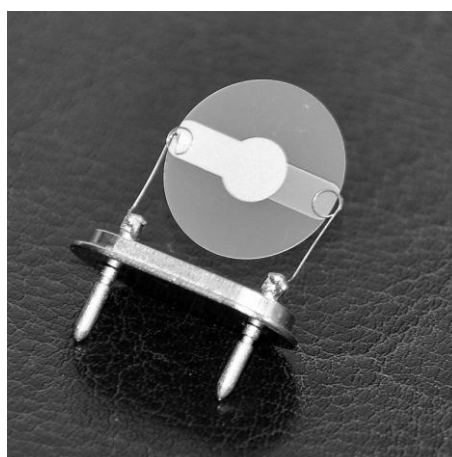


Рисунок 27 – Конструкция пьезоэлектрический резонатор

Пьезорезонансные датчики на основе пьезорезонаторов, чувствительных к акустической нагрузке, комплексному сопротивлению. В этих приборах измеряемый параметр модулирует условия излучения ультразвука с колеблющихся поверхностей пьезоэлемента. Механизм, лежащий в основе работы акустических пьезорезонансных датчиков, будет называться механизмом акустической чувствительности.

Пьезорезонансные датчики на основе масс-чувствительных пьезорезонаторов, используя зависимость параметров резонаторов от массы вещества, закрепленного (сорбированного) поверхностью пьезоэлемента. Преобразование параметра в них осуществляется через массовую чувствительность пьезорезонатора [38 с. 17].

									Лист
									58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР				

2. *Пьезорезонансные датчики на основе чувствительности к вариациям геометрии прибора*, в которой эквивалентные параметры резонаторов изменяются с относительным смещением структурных элементов пьезорезонатора, например, при изменении зазора между электродом и вибратором.

3. *Пьезорезонансные датчики на основе гироскопических пьезопреобразователей*. В этих устройствах измеряемым воздействием является частота вращения пьезовибратора вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонансных колебаний. Работа гироскопических преобразователей основана на появлении переменных сил Кориолиса во вращающемся и колеблющемся вибраторе одновременно с резонансной частотой, пропорциональной частоте вращения и изменяющейся в направлении с частотой колебаний. Силы Кориолиса порождают дополнительные деформации пьезоэлемента, которые через пьезоэлектрический эффект преобразуются в электрическое переменное напряжение с амплитудой, пропорциональной частоте вращения, фаза которой соответствует направлению вращения (Таблица 7) [38 с. 18].

Таблица 7 – Основные типы пьезорезонансных датчиков

Тип пьезорезонатора	Управляемый элемент колебательной системы	Управляемый структурный элемент	Модулируемый параметр	Выходной сигнал ПДР	Тип рабочих колебаний	Измеряемые параметры
Тензочувствительный	Вибратор	Податливость	Частота резонатор, коэффициент связи для многополосных пьезопреобразователей	Частота	Сдвиг по толщине, изгиба	Сила, масса, деформация, ускорение, давление

Продолжение таблицы 7

Термо-чувствительный	—	—	Частота	—	Сдвиг по толщине	Температура, вакуум, скорость потока, электрический ток, напряжение, мощность, состав газа
Геометрически чувствительный	Подвижный электрод	—	Межэлектродная емкость	—	То же	Усилие, давление, ускорение
Массочувствительный	Пленочное покрытие вибратора	Масса	Частота	—	—	Влажность, химический состав микро массы, толщина пленок, давление
Акустический чувствительный	Пленочное покрытие, элементы крепления, окружающая среда	Потери	Импеданс резонатора, коэффициент связи для четырех-полюсного преобразователя	Амплитуда	Продольные, поперечные	Влажность, давление, сила, масса, микро-перемещение
Гироскопический чувствительный	Вибратор	Деформация вибратора	Коэффициент связи многополюсного преобразователя	—	Комбинация продольных и поперечных колебаний	Угловая скорость

Условия проявления пьезорезонансного эффекта зависят от механической деформации, изменения температуры, массы вещества, присоединенного поверхностью пьезоэлемента, а также сил Кориолисса [42, с. 4].

Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора. Когда частота приложенного к пьезорезонатору переменного напряжения изменяется вблизи резонансной частоты упругих колебаний, наблюдается значительное резонансное изменение их амплитуды и, как следствие, такое же резонансное изменение амплитуды тока во внешней цепи. Амплитуда тока во внешней цепи становится максимальной на резонансной частоте. Поэтому пьезоэлектрический резонатор, включенный в электрическую цепь, эквивалентен последовательному колебательному контуру с такой же высокой добротностью, какая характеризует резонансные свойства упругих колебаний (рисунок 28).

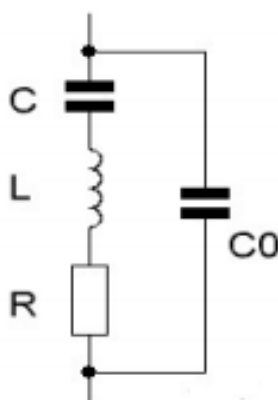


Рисунок 28 – Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора

На рисунке конденсатор C_0 отображает наличие не связанной с пьезоэффектом ёмкости, которой обладают электроды, нанесённые на пьезоэлемент, проводники, соединяющие электроды с внешней цепью и кристаллодержатель. Ёмкость C_0 , называется параллельной или шунтирующей емкостью и имеет типичную величину порядка единиц пФ. Параметрами колебательного контура на рисунке 27, эквивалентного пьезоэлектрическому резонатору является емкость C ,

индуктивность L и резистор R . Эти величины называют динамическими параметрами пьезорезонатора [42, с.4]

Электрическая схема реализуется в сенсоре, представленном на рисунке 29.

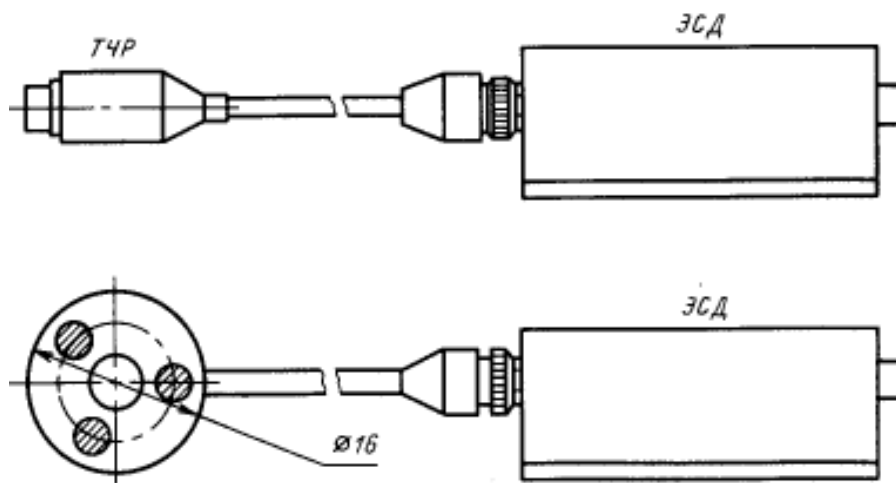


Рисунок 29 – Конструктивные варианты исполнения термодатчиков:

ТЧР – Кварцевые термочувствительные резонаторы

Отечественные датчики типа ПТКИ-01,-02,-03 предназначены для контроля температуры воздуха, поверхностей и материалов. Датчики выполнены в виде двух узлов – термочувствительного резонатора и электронного преобразователя. Последний содержит опорный резонатор и гибридную схему с двумя генераторами и формирователем сигнала разности частоты. Преобразователь ПТКИ-01 – погружного типа.

Преобразователь ПТКИ-02, используемый для контроля температуры поверхности, снабжен магнитным прихватом, обеспечивающим надежный тепловой контакт поверхностей ТЧР и измеряемого узла. Преобразователь ПТКИ-03 предназначен для контроля температуры материалов, устанавливается внутри контролируемого конструктивного элемента [38, с. 111].

Область применения пьезоэлектриков:

1. Преобразователи, в которых используется прямой пьезоэффект, применяют для изменения силы, давления и ускорения.

2. Преобразователи, в которых используется обратный пьезоэффект, используют в ультразвуковых излучателях и преобразователях “напряжение - перемещение”.

3. Преобразователи, у которых используется одновременно прямой и обратный пьезоэффект, так называемые пьезорезонаторы, имеют максимальный коэффициент преобразования одного вида энергии в другой на резонансной частоте [43, с. 52].

В преобразователях температуры, давления, ускорения и так далее могут использоваться в зависимости от кристалла, среза и типа возбуждения

Постоянно расширяется область применений пьезоприборов резонансного типа.

Если раньше основной сферой пьезорезонаторов были радиотехнические системы и устройства связи, то сегодня рынок этих устройств определяется потребностями часовой промышленности, микропроцессорной техники, производство товаров культурно-бытового назначения.

Бурный прогресс пьезоэлектроники создал хороший фундамент для развития перспективного направления в технике измерений – пьезорезонансных датчиков, работа которых основана на управлении параметрами пьезорезонаторов и других топов пьезоприборов резонансного типа внешними воздействиями [38, с. 2]

										Лист
										63
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР					

Выводы по разделу 3

1. В данной главе рассмотрели вариант методики, применительно к физическим эффектам используемых для измерения температуры.
2. Убедились в универсальности этой методики. Она так же подходит для описания другой физической величины, такой как температура.
3. Показали, что выше изложенная методика может быть использована в учебном процесс по направлению подготовки студентов 12.03.01 «Приборостроение».

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		64

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В условиях современного производства возникает задача создания новых средств измерений и связи с этим становится актуальной задача, связанная с исследованиями физических эффектов которые могут быть использованы в современных датчиках. В работе, мы рассмотрели реализацию некоторых эффектов в датчиках давления и датчиках температуры.

Главной целью работы было кратко, ясно и понятно изложить всю суть этих эффектов. Эта ВКР является методикой последовательного изучения физических эффектов и явлений при измерении давления и температуры.

2. Проведен обзор наиболее авторитетных литературных источников по физическим эффектам. Отмечено, что существует большое их количество, которые описывают физические эффекты, но в них отсутствует четкая, понятная и единая методика описания. Поэтому была поставлена цель разработки новой методики описание физических эффектов, используемых в средствах измерения.

3. Создана методика описания физических эффектов, используемых для измерения давления. Рассмотрены и описаны тензорезистивный и емкостной эффекты по предложенной методике.

Предложенная методика была опубликована в научном журнале Вестник ЮУрГУ Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» 2019 [11].

Для проверки того, что методика является универсальной для различных физических эффектов, использовали ее для физической величины температуры. Для этого описали пьезорезонансный эффект и эффект Зеебека. В итоге мы убедились, что методика является универсальной.

4. Показано, что изложенная выше методика может быть использована в учебном процесс по направлению подготовки студентов 12.03.01 «Приборостроение».

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

5. Дальнейшее направление работы может быть связано с увеличением данной методики путем расширения количество информации используемых для описания различных физических эффектов

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		66

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции: книга / К.Шваб, Н. Дэвис. – М.: «Эксмо», 2018. – 320 с.
2. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2014. – 60 с.
3. Лукьянец, В. А. Физические эффекты в машиностроении: справочник / В.А. Лукьянец, З. И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова. – М.: Изд-во Машиностроение, 1993. – 212 с.
4. Лапин, А.П. Выявление и систематизация физических эффектов и явлений для создания перспективных преобразователей физических величин / А.П. Лапин, А.С. Волосников, Ю.А. Усачев, О.Ю. Бушуев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17. – С.145-147.
5. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. А. Заболотной. – М.: Изд-во Техносфера, 2005. – 592 с.
6. Головин, П.Д. Физические явления (эффекты), используемые для построения первичных преобразователей (датчиков) / П.Д. Головин, А.В. Блинов // Датчики и системы. – 2003. – № 11. – С. 3–9.
7. Кнорринг, В. Г. Датчики в Ленинградском политехническом / В. Г.Кнорриг, А. А. Митичук // Датчики и Системы. –1999. – №1. – С. 4-7.
8. Бурковский, В. Л. Физические явления эффекты в технических системах: учебное пособие /В. Л. Бурковский, Ю. Н. Глотова, Д. А. Ефромов и др. –Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2007.– 248с.
9. Медякова, Э. И. Физические основы измерений / Э. И. Медякова – Санкт-Петербург: Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2005. – 66с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

10. Ушаков, Д.Н. Большой толковый словарь современного русского языка: 180000 слов и словосочетаний / Д. Н. Ушаков. – М. : Альта-Принт , 2008. - 1239 с
11. Лапин, А.П. Методика изучения физических эффектов, используемых для измерения давления / А.П. Лапин, Н.М. Гайфулин, Л.Н. Сулейманова, Г.Р. Юнусова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». -2019. – Вып. 1. - № 19. – С. 160-168.
12. Болтон, У. Карманный справочник инженера-метролога. / У. Болтон. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 383 с.
13. Тесленко, В.А. Что следует знать о тензорезисторах / В.А.Тесленко // ПиКАД. – 2006. – № 1. – С. 48-52.
14. Сибтензоприбор. Продукция. – <http://www.sibtenzo.com/products/tenzorezistory-folgovye-konstantanovye>.
15. Клименко, Е.С. Формулы по физике: справ. / Е.С. Клименко – М.: Эксмо, 2012. – 129 с.
16. Датчики: справочное пособие / Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Савлуков; под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
17. ГОСТ 21616-91. Издание официальное. Тензорезисторы. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 49 с.
18. Горин, Ю. В. Создание новых технических решений на основе использования физических эффектов и явлений: методические рекомендации / Ю. В. Горин, В. В. Землянский. – Пенза: Пензенский колледж управления и промышленных технологий им. Е. Д. Басулина, 2005. – 60 с.
19. Панфилов В.А., Электрические измерения: учебное пособие / В.А. Панфилов. - М.: Академия, 2006. - 146 с.
20. Рассел, Джесси. Датчик давления / Джесси Рассел. – М.: Изд-во VSD, 2013. – 112 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

21. Датчики давления. Типы, характеристики, особенности, подбор.– <http://kontechsystem.com.ua/articles/datchikidavlenijatipyharakteristikiosobennostipodb or/>

22. Конюхов, В.Н. Исследование емкостного датчика давления: методическое указания / В.Н. Конюхов, К.Е. Воронов. – Самара: Изд-во Самарский Государственный аэрокосмический Университет, 2006. – 23 с.

23. ГОСТ Р 57440-2017. Конденсаторы. Классификация и система условных обозначений. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.

24. Денисов, С. Список физических эффектов и явлений: методический материалы /С. Денисов, В. Ефимов, В. Зубарев, В.Кустов. – Горький: Горьковский народный университет научно-технического творчества, 1979. – 166 с.

25. Шарапова, В.М. Датчики: справочное пособие / В.М. Шарапова, Е.С. Полицука. – Москва: Техносфера, 2012. – 624 с.

26. Датчики измерительных систем / учебник: в 2 тома / Ж. Аш и др., книга 1 – М.: Мир, 1992. – 480 с.

27. Кэпп, У. Пьезоэлектричество и его практическое применение / У Кэпп; пер. с англ. А.В. Шубникова. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1949. – 718 с.

28. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях / Д. Берлинкур; под ред. У. Мэзона, пер. с англ., т. 1, ч. А.– М.,1966.-572 с.

29. Михеев, В.П. Датчики и детекторы: учебное пособие / В.П. Михеев, А.В. Просандеев – М.: МИФИ, 2007. – 172 с.

30. Виглеб, Г. Датчики / Г. Виглеб; пер. с нем. М.А. Чацериова. – М.: Мир, 1989. – 196 с,

31. ГОСТ Р.8.585-2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 81 с.

32. Игумнов, В.Н. Физические основы микроэлектроники: учебное пособие / В. Н. Игумнов. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. – 272 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

33. Гаджиев, Х. М. Термоэлектрические устройства для точного измерения температуры / Х.М. Гаджиев // Известие высших учебных заведений. Приборостроение. – 2000 . – Т. 43, № 5. – С.36-38.

34. Елифанов, Г.И. Физические основы микроэлектроники / Г. И. Елифанов. – М.: Современное радио, 1971. – 376 с.

35. Термоэлектрические датчики. – https://vuzlit.ru/957644/termoelektricheskie_datchiki.

36. Ильярский, О.И. Термоэлектрические элементы / О.И. Ильярский, Н.П. Удалов. – М.: Энергия, 1970. – 68 с.

37. Латышенко, К.П. Технические измерения и приборы: учебник для СПО / К.П. Латышенко. – М.: Юрайт, 2019. – 246 с.

38. Малов, В.В. Пьезорезонансные датчики. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 272 с.

39. Кварцевые резонаторы. – <https://docviewer.yandex.ru/view/173788664>.

40. ГОСТ 23546-84. Государственный стандарт союза ССР. Резонаторы пьезоэлектрические. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 74 с.

41. Селеменов, В.Ф., Калач, А.В. Теоретические основы определения органических соединений с применением пьезорезонансных сенсоров/ В.Ф. Селеменов, А.В. Калач// 2005. - С. 1-5

42. Белов, А.А. Кварцевые резонаторы: описание задачи спецпрактикуму / А.А. Белов, А.В. Степанов – М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2012. - 18 с.

43. Хоменко, И. В. кварцевые резонаторы и генераторы: учебное пособие / И.В. Хоменко, А.В. Косых – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. – 160 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 333 ПЗ ВКР	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

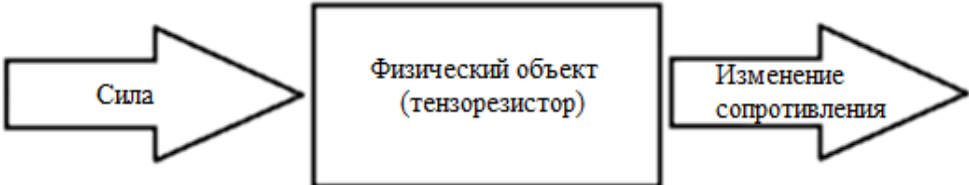

Известные физические эффекты и явления

Физические эффекты	Физическая величина					
	Давление	Вибрация	Температура	Деформация	Влажность	Расход
Емкостной	++	+	+	+	+	-
Пьезоэлектрический	+	++	-	-	-	-
Дифференциально-трансформаторный	+	+	-	-	-	-
Контактная разность потенциалов	-	-	+	-	-	-
Тензорезистивный	++	-	-	+	+	-
Потенциометрический	+	-	-	-	-	-
Токовихревой	+	-	-	+	-	-
Эффект Холла	-	-	-	-	-	-
Пьезорезистивный	++	++	-	+	+	-
Анизотропия и свет	+	++	-	+	+	-
Магниторезистивный	-	-	-	-	-	-
ПАВ	+	+	-	+	-	-
Пьезорезонансный, резонансный	++	-	+	-	+	-
Индукционный	-	+	-	-	-	-
Эффект Кориолиса	-	-	-	-	-	++
Эффект Маттеучи	+	+	-	+	-	-
Z-эффект в п/п р-п-структурах	+	+	+	-	-	-
Эффект Виллари	+	++	-	-	-	-
Туннельный эффект	+	++	-	+	+	+

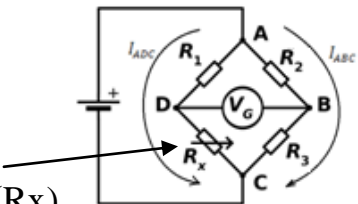
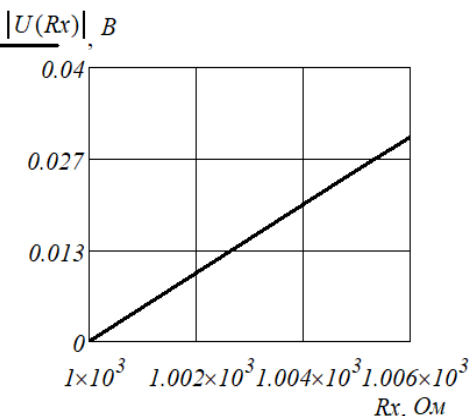
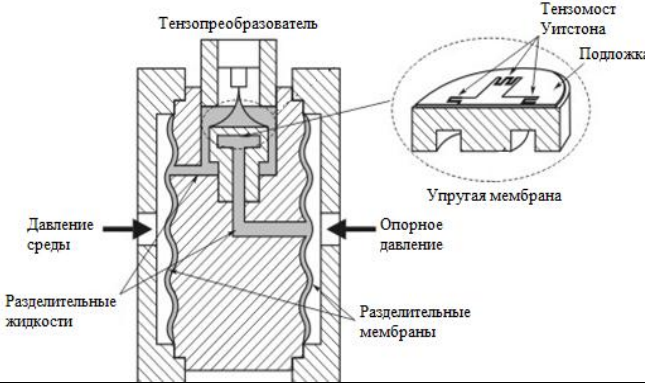
Примечание: «+» – используются, «++» – использование предпочтительное, «-» – использование нецелесообразно.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример описания тензорезистивного эффекта

Физическая величина	Давление				
Наименование физического эффекта	Тензорезистивный эффект				
Краткое содержание	Изменение сопротивления проводника при механической деформации				
Воздействия	Сила				
Результат воздействия	Изменение электрического сопротивления проводника				
Схема ФЭ					
Параметры физического объекта*	Материал	Состав	Тензочувствительность	Удельное сопротивление * 10⁶, Ом*м	Рабочая область значений температуры, °С
	Константан Нихром	60% Cu, 40% Ni 80% Ni, 20% Cr	2 2,1- 2,3	0,44- 0,52 1,0- 1,1	-50...+70 -60...+100
Математическая модель	$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$ где ρ – удельное сопротивление материала [Ом·м], S – площадь проводника [м ²], l – длина проводника [м].				
Физическая модель	 Пленочный тензорезистор				
Условия проявления	Зависит от вида деформации (Аосн) и температуры (Адоп)				

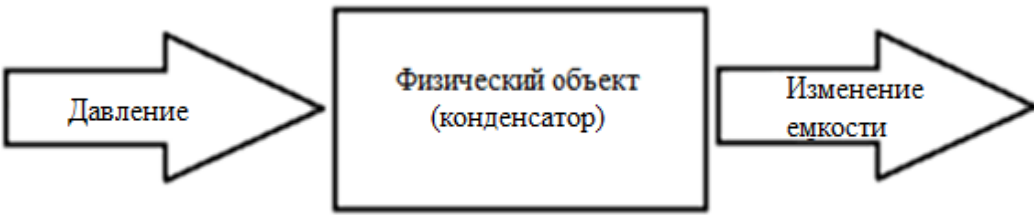
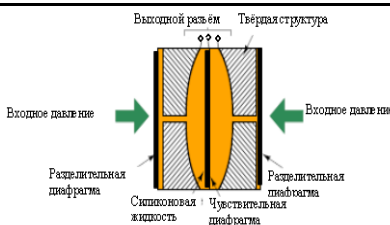
Продолжение:

<p>Схема реализации</p>	 <p>Тензорезистор (R_x)</p> <p>Схема моста Уитстона</p>
<p>Графическая зависимость</p>	 <p>$U(R_x) , В$</p> <p>$R_x, Ом$</p>
<p>Конструкция датчика</p>	<p>Данный тип сенсора нашел применение в аналоговых однопределельных датчиках избыточного и абсолютного давления</p>  <p>Тензопреобразователь</p> <p>Тензомост Уитстона</p> <p>Подложка</p> <p>Упругая мембрана</p> <p>Давление среды</p> <p>Опорное давление</p> <p>Разделительные жидкости</p> <p>Разделительные мембраны</p>
<p>Вид давления</p>	<p>* – абсолютное давление; * – избыточное давление; ** – дифференциальное давление.</p>
<p>Область применения</p>	<p>Используется для измерения силы, давления, механических напряжений, крутящих моментов и пр. На этом эффекте основана работа тензодатчиков.</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

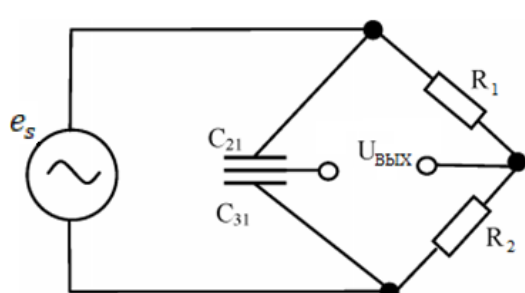
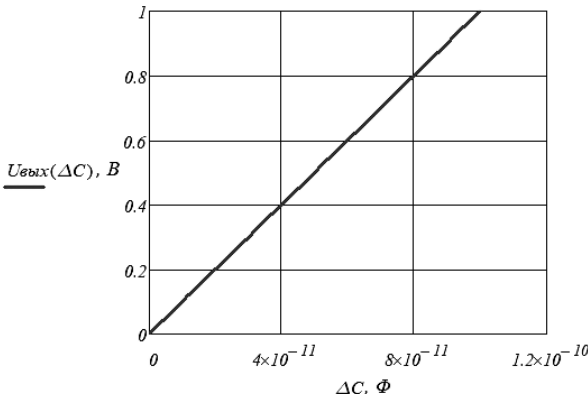
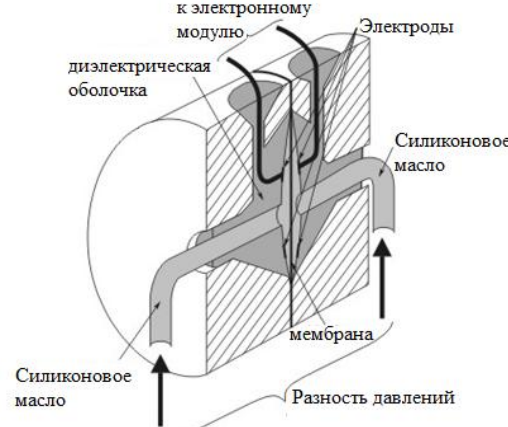
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Пример описания емкостного эффекта

Физическая величина	Давление		
Наименование физического эффекта	Емкостной эффект		
Краткое содержание	Изменения электрической ёмкости между обкладками конденсатора		
Воздействия	Давление		
Результат воздействия	Изменение емкости переменного конденсатора		
Схема ФЭ			
Параметры физического объекта*	Диэлектрик	Диапазон измерения температуры, °С	Диэлектрическая проницаемость
	Силиконовое масло	-50...+200	2,2 ... 2,8
Математическая модель	$C = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}$ <p>где, C – емкость плоского конденсатора, [Ф]; S – площадь пластин конденсатора, [м²]; d – расстояние между обкладками, [м]; ε– относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, []; $\varepsilon_0=8,87 \cdot 10^{-12}$– диэлектрическая постоянная вакуума</p>		
Физическая модель	 <p>Емкостная ячейка</p>		

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

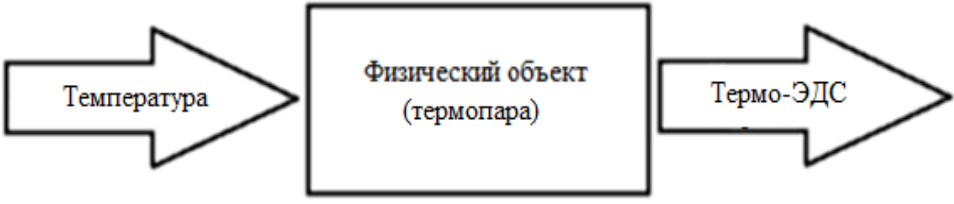

Продолжение:

<p>Условия проявления</p>	<p>Зависит от давления ($A_{осн}$) и от изменения температуры ($A_{доп}$)</p>
<p>Схема реализации</p>	<p style="text-align: center;">Схема моста Саути</p> <p>C_{21}, C_{31} – емкости конденсаторов емкостной ячейки; R_1, R_2 – резисторы известных номиналов; e_s – переменный источник питания</p> 
<p>Графическая зависимость</p>	
<p>Конструкция датчика</p>	
<p>Вид давления</p>	<p>* – абсолютное давление; * – избыточное давление; ** – дифференциальное давление.</p>
<p>Область применения</p>	<p>Используются в качестве уровнемеров, динамометров – приборов для измерения давлений сил; для измерения кручения вала; измерения вибраций, ускорений.</p>

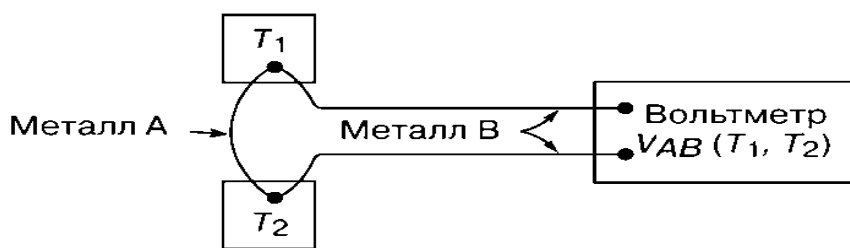
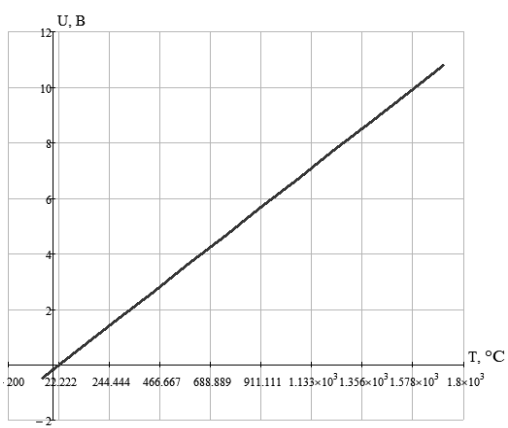
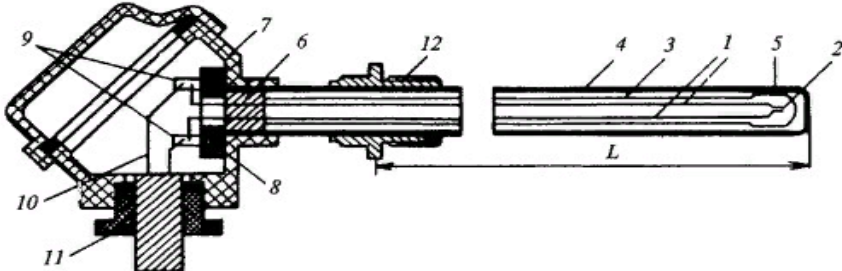
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пример описания эффекта Зеебека

Физическая величина	Температура			
Наименование физического эффекта	Эффект Зеебека			
Краткое содержание	Возникновение термо-ЭДС в цепи при различных температурах разных контактов металлов			
Воздействия	Изменение температура			
Результат воздействия	Преобразование в термоэлектродвижущую силу (термо-ЭДС)			
Схема ФЭ				
Параметры физического объекта*	Тип	Сочетание материал	Максимальная температура применения	Возможный диапазон температур °С
			°С	
	R	Платина – 13% родий/платина	1770	от -50 до 1768
	S	Платина – 10% родий/платина	1770	от -50 до 1768
B	Платина – 30% родий/платина-6%	1825	от 0 до 1820	
Математическая модель	$U = \alpha(T_2 - T_1),$ <p>где U – термо-ЭДС, [В]; α – термоэлектрический коэффициент Зеебека, [мкВ/°С]; $T1$ и $T2$ – температура горячего и холодного спая, [°С].</p>			
Физическая модель	 Термопара типа В			
Условия проявления	Зависит от температуры ($A_{осн}$) и материала проводника ($A_{доп}$)			

Продолжение:

<p>Схема реализации</p>	
<p>Графическая зависимость</p>	
<p>Конструкция датчика</p>	 <p>1 – термоэлектроды; 2 – рабочий пай; 3 – трубка; 4 – защитная арматура; 5 – керамический наконечник; 6 – заливка; 7 – головка; 8 – сборка; 9 – зажимы; 10 – удлиняющие провода; 11 – герметизированный ввод; 12 – элементы крепления термопреобразователя</p>
<p>Вид температуры</p>	<p>* – нормальная температура; * – высокая температура; ** – низкая температура.</p>
<p>Область применения</p>	<p>Используется в качестве генераторов электроэнергии, для измерения температур, а так же в устройствах функциональной теплоэлектроники.</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Пример описания пьезорезонансного эффекта

Физическая величина	Температура		
Наименование физического эффекта	Пьезорезонансный эффект		
Краткое содержание	Изменение частоты пьезорезонатора под влиянием температуры		
Воздействия	Температура		
Результат воздействия	Изменение частоты и увеличение амплитуды колебаний электрических зарядов на обкладках пьезоэлемента		
Схема ФЭ	<pre> graph LR A[Температура] --> B[Физический объект (пьезорезонатор)] B --> C[Изменение частоты] </pre>		
Параметры физического объекта*	Материал	Температурный диапазон, °С	Добротность колебательного LC-контура
	Кварц Пьезокерамика	530 150	10^2 10^3
Математическая модель	Прямой пьезоэффекта: $P = d \cdot \sigma,$ где P – электрическая поляризация, [Кл/м ²]; σ – механическое напряжение, [Н/м ²]. Обратный пьезоэффект: $x = d \cdot E,$ где x – деформация, []; E – напряженность электрического поля, [В/м]; d – пьезоэлектрический модуль (пьезомодуль), [Кл/Н].		
Физическая модель	<p>Кварцевый резонатор</p>		
Условия проявления	Зависит от изменения температуры ($A_{осн}$), механической деформации ($A_{доп}$), массы вещества ($A_{доп}$), присоединенного поверхностью пьезоэлемента, а также сил Кориолисса ($A_{доп}$).		

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.
------	------	----------	-------	------

Продолжение:

<p>Схема реализации</p>	<p>—</p>
<p>Графическая зависимость</p>	<p>—</p>
<p>Конструкция датчика</p>	 <p>ТЧР – Кварцевый термочувствительный резонатор. Отечественные датчики типа ПТКИ-01,-02,-03 предназначен для контроля температуры воздуха, поверхностей и материалов.</p>
<p>Вид давления</p>	<p>*— нормальная температура; **— высокая температура; ***— низкая температура.</p>
<p>Область применения</p>	<p>Используется микропроцессорной технике, а так же в измерительной технике – пьезорезонансных датчиках.</p>