

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов специальности
6-05-0716-03 «Информационно-измерительные
приборы и системы»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 681.2
ББК 32.965
К65

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «26» февраля 2026 г.,
протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. В. Ф. Поздняков;
ст. преподаватель Е. В. Позднякова

Рецензент канд. техн. наук С. О. Порошков

Методические рекомендации к курсовому проектированию предназначены
для студентов специальности 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные
приборы и системы» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать	. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Введение.....	4
1 Общие указания.....	5
2 Указания к разработке отдельных этапов работы.....	8
3 Практические рекомендации к выполнению курсового проектирования.....	11
Список литературы.....	40

Введение

Курс «Контрольно-измерительная техника» занимает важное место в общетехнической подготовке инженеров по специальности 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные приборы и системы».

Значительное место в этом курсе отводится курсовой работе как работе, наиболее приближенной к деятельности инженера-разработчика новых приборов и систем контроля.

Методические рекомендации к курсовому проектированию разработаны кафедрой «Физические методы контроля» Белорусско-Российского университета. В них приведены требования к курсовым проектам и даны общие рекомендации по их выполнению. Рассмотрены вопросы анализа исходных данных на проектирование, приведена примерная тематика работ, описаны порядок и общая схема выполнения курсового проектирования, приведены рекомендации по выполнению и защите курсовых работ. Рассмотрена методология выбора и обоснования технических решений (методических, конструктивных) по каждому этапу проектирования.

Данные методологические рекомендации позволяют студентам лучше освоить методику курсового проектирования и подготовиться к выполнению дипломных проектов.

1 Общие указания

1.1 Цель и задачи курсового проектирования

Целью курсового проектирования является привитие навыков самостоятельного применения в исследованиях и расчетах знаний по основам измерительной техники, полученных при изучении теоретического курса.

Разработка курсовой работы ставит основные задачи:

- систематизировать, расширить и закрепить теоретические и практические знания, необходимые инженеру при разработке средств контроля и измерения;
- выработать умение и навыки по комплексному решению технических задач при разработке новых устройств и систем;
- развить навыки самостоятельной работы с научно-технической литературой;
- подготовить студентов к самостоятельному решению задач при выполнении дипломного проекта и последующей работе в народном хозяйстве.

1.2 Тематика курсового проектирования

Тематика курсового проектирования по контрольно-измерительной технике должна быть актуальной, соответствовать современному состоянию и перспективам развития измерительной техники. Темой является обоснование и разработка контрольно-измерительных устройств для заданных параметров объектов контроля. Обосновывается выбор первичного преобразователя информации, методов преобразования и ее отображения. Осуществляется метрологическая оценка проектируемого устройства.

Курсовая работа может быть посвящена как разработке новых устройств, так и модернизации существующих.

Примерная тематика курсового проектирования:

- разработка устройства для измерения линейных перемещений с цифровым выходом;
- выбор, расчет и проектирование первичного преобразователя физической величины (температуры, уровня, объема, скорости линейного и углового перемещения);
- исследование и разработка информационно-измерительного средства технологического контроля (по тематике СНИР).

В разработке курсовой работы необходимо использовать передовые достижения отечественной и зарубежной техники.

1.3 Исходные данные к курсовым работам

Для выполнения курсовой работы необходимы следующие исходные данные:

- характер объекта контроля и измерительного сигнала;
- диапазон контролируемого параметра;

- предельная погрешность измерения контролируемого параметра;
- быстродействие устройства контроля;
- вид представления измерительной информации;
- условия работы измерительного устройства (если необходимо, условия работы задаются отдельно от первичного преобразователя и для блока обработки);
- тип использования устройства (стационарный, переносной, портативный).

Кроме того, необходимо учитывать соответствие между параметрами первичного преобразователя и выходными сигналами, их индивидуальные характеристики для каждого типа преобразователя (оптического, механического, электрического и т. д.), особенности выходных величин, возможные нелинейные зависимости, время измерения, обуславливающие характеристики устройств обработки информации.

1.4 Задание на курсовое проектирование. Структура, объем и содержание курсовой работы

В задании по курсовой работе приводятся исходные данные, перечень вопросов, подлежащих проработке и отражению в пояснительной записке, примерный перечень разрабатываемых чертежей, а также указываются контролируемые сроки выполнения отдельных этапов проектирования.

Курсовая работа должна состоять из расчетно-пояснительной записки и графической части.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать конкретный материал по выбору, обоснованию и расчету принимаемых проектных решений.

Примерное содержание пояснительной записки:

- введение;
- анализ исходных данных;
- анализ существующих методов и средств контроля исходного параметра (объекта контроля или физической величины конкретно в соответствии с заданием);
- выбор и обоснование метода измерения и первичного преобразователя;
- оценка информационных параметров измерительного сигнала с первичного преобразователя;
- разработка алгоритма функционирования проектируемого устройства контроля;
- разработка структурной или функциональной схемы разрабатываемого устройства (системы);
- расчет первичного преобразователя проектируемого устройства;
- конструирование отдельных элементов и узлов средств контроля;
- оценка погрешности и метрологическое обеспечение создаваемых средств контроля;
- выводы по результатам проектирования;
- приложения.

Графическая часть включает комплект чертежей на разрабатываемую аппаратуру. Объем и конкретные чертежи определяются руководителем курсовой работы. На чертежах приводятся структурные и конструктивные схемы разрабатываемых устройств, функциональные схемы отдельных блоков, алгоритмы обработки измерительной информации, сборочные чертежи первичных преобразователей, сборочные чертежи электронного блока обработки измерительной информации.

Конкретное содержание листов графической части и разделов пояснительной записки (а также объем и сроки выполнения) определяется студентом совместно с руководителем работы и фиксируется в задании на курсовую работу.

Примерный объем графической части должен составлять два-три листа формата А2, а пояснительной записки – 25–35 листов формата А4.

1.5 Требования к оформлению пояснительной записки по курсовому проектированию

Построение пояснительной записки, изложение ее текста, а также оформление иллюстраций и приложений должны осуществляться согласно ГОСТ 2.105–95, РД 50-77–88.

Пояснительная записка выполняется на компьютере на листах белой бумаги формата А4. Шрифт – Times New Roman 14 pt.

Изложение материала в записке должно быть кратким и выполнено техническим языком. В тексте не должно быть общих фраз и общих рекомендаций.

Не допускаются сокращения слов (кроме общепринятых), а терминология должна строго соответствовать принятой в учебниках.

Расчетные формулы должны записываться в индексной форме с полной расшифровкой и сквозной или в пределах раздела нумерацией формул. Таблицы должны иметь наименование и нумерацию. Все используемые в работе величины должны быть выражены в системе СИ.

Список литературы должен содержать лишь те источники, которые использованы при выполнении и на которые есть ссылки в тексте записки. Оформление списка литературы должно соответствовать принятым правилам.

В приложения необходимо включать распечатки программ на ЭВМ, таблицы, графики, алгоритмы, по каким-либо причинам не включенные в основную часть записки.

Все графические материалы работы должны соответствовать требованиям ГОСТа и данным рекомендациям. Чертежи выполняются карандашом на ватмане или распечатываются на плоттере после их разработки компьютерными методами при помощи специализированных программ. Однако необходимо учитывать стандартные масштабы чертежей при проектировании средствами специализированных программ.

1.6 Использование ЭВМ

Учащиеся должны уметь применять ЭВМ для решения инженерных и технических задач, владеть элементами САПР и методами обработки информации по специализированным программам.

Основными задачами, которые целесообразно решать при проектировании устройства и системы с использованием ЭВМ, являются следующие:

- задача оптимизации;
- повторяющиеся расчеты;
- при моделировании физических процессов;
- сложные функциональные задачи.

Применительно к контрольно-измерительной технике могут быть:

- расчет первичных преобразователей и оценка их характеристик;
- расчет и минимизация устройства обработки;
- расчет погрешности прибора.

Общая методика решения задач на ЭВМ предполагает использование типовой последовательности операций.

1 Формулировка задачи. Данный этап включает в себя:

- определение исходных данных, необходимых для решения задачи, т. е. информации, вводимой в оперативную память машины;
- конкретизацию исходных данных и формы их представления;
- постановку задачи.

2 Формализация задачи, разработка алгоритма ее решения. При этом максимально используется библиотека стандартных программ.

3 Разработка программы на одном из языков высокого уровня.

4 Отладка программы, при которой обнаруживаются и устраняются ошибки и производится просчет контрольного варианта.

5 Проведение расчетов по отлаженной программе.

6 Оценка и анализ расчетов.

2 Указания к разработке отдельных этапов работы

2.1 Анализ исходных данных объекта контроля

Начальным этапом разработки является анализ исходных данных и изучение контролируемого параметра, которым может быть напряжение или ток, механическое перемещение, измерение интенсивности или других характеристик оптического излучения, магнитные величины, а также интенсивности проникающих излучений и т. п. Данный анализ позволит предварительно выбрать метод измерения и, соответственно, первичный преобразователь.

2.2 Анализ существующих методов и средств контроля исходного параметра

Данный раздел должен включать сравнительный анализ эффективности технических решений в сравнении с известными. Анализ производится на основе тщательного изучения литературных, методических, патентных и других материалов по заранее составленной общей схеме, предполагающей направленность поиска и конечную цель исследования. Материал данного раздела необходимо излагать в виде простого описания, с точки зрения эффективности применения тех или иных методов, и технических решений для выполнения поставленной задачи. При этом основное внимание должно быть уделено достижению точности, стабильности метрологических параметров, минимума оборудования и максимальной надежности.

2.3 Выбор и обоснования метода измерения

Данный раздел является наиболее важным этапом проектирования, т. к. эффективность контроля необходимого параметра определяется правильным выбором метода контроля и измерения.

При этом выбор должен производиться по результатам оценки существующих способов, приведенных в предыдущем разделе.

При выборе того или иного метода необходимо учитывать следующие факторы: информативный параметр объекта контроля, диапазон измерения информативного параметра, необходимая точность измерения, условия работы объекта контроля, доступность зоны измерения, вид исполнения всего устройства в целом.

2.4 Обоснование выбора первичного преобразователя и его расчет

Правильный выбор первичного преобразователя контролируемого параметра является важнейшим для обеспечения метрологических характеристик устройства. Важнейшими характеристиками являются диапазон преобразования параметра и погрешность. Возможно, нелинейные зависимости измерения выходной величины должны допускать их линеаризацию с сохранением точности.

Следует учитывать особенности выходных сигналов при преобразовании оптических, механических, магнитных и других параметров, к которым относятся: частота, амплитуда сигнала, выходное сопротивление источника при преобразовании в электрический сигнал. Необходимо учитывать возможность повысить достоверность информации введением модуляции и других детерминированных воздействий.

В данном разделе необходимо привести расчеты выбранного (разработанного) первичного преобразователя. Сюда входит: расчет функции преобразования, расчет погрешности параметров, динамических характеристик.

2.5 Разработка алгоритма обработки измерительной информации

В зависимости от вида и формы измерительного сигнала, поступающего от первичного преобразователя, характер обработки измерительной информации определяется параметрами входного и выходного сигналов, а также требуемыми метрологическими параметрами всего устройства в целом. В зависимости от конкретного решения информация может преобразовываться в аналоговой и цифровой форме. Конкретный выбор осуществляется при анализе исходных данных. От этого решения будет зависеть алгоритм функционирования и структура устройства.

При разработке алгоритмов необходимо отвлечься от природы преобразуемых величин, эталонов, системы представления чисел и технической реализации отдельных операций. При построении алгоритма следует процесс обработки разбить на отдельные операции, обозначаемые операторами. В зависимости от формы информации следует использовать операторы дискретных или аналоговых операций. Последовательность операторов образует алгоритм, который анализируется с целью сокращения оборудования или времени выполнения обработки информации. Изображения алгоритмов осуществляются согласно ЕСКД, ГОСТ 19.003–80.

2.6 Разработка устройства обработки измерительной информации

Разработка устройств обработки информации начинается с анализа исходного сигнала. Этот сигнал для большинства средств контроля приводится с помощью аналогового преобразователя к стандартным уровням амплитуды. При малых амплитудах сигналов на входе устанавливается согласующий усилитель. Если источник имеет высокое сопротивление, то устанавливается усилитель тока. Усилители тока выполняются чаще в виде стоковых и эмиттерных повторителей. При высоких напряжениях и токах устанавливаются делители или шунты. Дальнейшим усилением (использованием усилителя переменного или постоянного тока) или ослаблением сигнал приводят к стандартному уровню.

В ряде случаев системой контроля используется только допусковый контроль, при котором входной сигнал сравнивается с заданным и выдается информация в двоичной форме для исполнительных механизмов и оператора.

При необходимости количественной оценки сигнала его величина выдается в аналоговой или цифровой форме. Аналоговая величина масштабируется, линеаризуется или подвергается нескольким видам обработки. Эти функции осуществляют аналоговые операционные элементы. К ним относятся масштабирующие усилители, интеграторы, сумматоры, аналоговые элементы памяти и т. д. Цифровая форма выходной величины предлагает аналого-цифровое преобразование сигнала и последующую цифровую обработку.

Отображение измерительной информации осуществляется как в аналоговой (графики, диаграммы, положение стрелок светящихся зон), так и в

дискретной форме (в виде двоичной, десятичной или других чисел специальных кодов, букв, цифр, специальных знаков). Отображение результатов может быть документальным или визуальным для текущей информации. Результаты о параметре иногда вводят в ЭВМ, где информация обрабатывается, и результаты выводятся на внешнее устройство машины. Чаще результаты отображаются на устройстве индикации и вводятся в ЭВМ.

Разработка структурной схемы устройства обработки информации.

Структурная схема должна отображать состав и взаимосвязь основных узлов устройства. В наиболее простом варианте их имеется только три: первичный преобразователь, аналоговый преобразователь, устройство отображения. При наиболее сложных задачах дополнительно вводятся узлы обработки аналоговых сигналов, аналого-цифровой преобразователь, узлы обработки дискретной информации, исполнительные и регистрирующие элементы. В структуру устройств и систем включаются также коммутаторы аналоговых и дискретных сигналов.

2.7 Конструирование отдельных элементов и узлов контрольно-измерительных средств

В данном разделе производится выбор (или при необходимости разработка, модернизация) конструкции отдельных элементов или всего устройства в целом. Сюда входит разработка конструкции первичного преобразователя, компоновочной схемы, панели управления и элементов индикации.

При разработке контрольно-измерительных средств необходимо учитывать требования эргономики, дизайна и техники безопасности.

Разработанные чертежи, схемы прибора должны быть приведены в пояснительной записке или вынесены на основные чертежи.

3 Практические рекомендации к выполнению курсового проектирования

3.1 Погрешности измерительных приборов

Погрешность измерения есть отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_{И}, \quad (3.1)$$

где x – измеренное значение величины;

$x_{И}$ – истинное значение величины.

Поскольку истинное значение неизвестно, практически погрешность измерения оценивают исходя из свойств средств измерений, условий проведения эксперимента и анализа полученных результатов. Полученные

результаты отличаются от истинного значения, поэтому результат измерения имеет ценность только в том случае, если дана оценка погрешности полученного значения измеряемой величины. Причем чаще всего определяют не конкретную погрешность результата, а степень недоверности – границы зоны, в которой с заданной вероятностью находится погрешность.

Поэтому истинное значение x_H заменяют действительным значением x_D , под которым подразумевают значение, найденное экспериментально и очень близкое к истинному:

$$x_D = x_H. \quad (3.2)$$

Погрешности по размерности подразделяются на абсолютные, относительные, приведенные.

Абсолютная погрешность определяется в единицах измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_D. \quad (3.3)$$

Относительная погрешность является более информативным параметром измерительного прибора. Она равна отношению абсолютной погрешности к действительному значению входной или воспроизводимой величины:

$$\delta = \frac{x - x_D}{x_D} 100 \% = \frac{\Delta}{x_N} 100 \%. \quad (3.4)$$

Приведенная погрешность равна выраженному в процентах отношению абсолютной погрешности к нормированному значению измеряемой величины:

$$\gamma = \frac{x - x_D}{x_N} \cdot 100 \% = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100 \%. \quad (3.5)$$

При этом x_N принимают равным:

- для средств измерений, за исключением случая существенно неравномерной шкалы, если нулевая отметка находится на краю шкалы или вне шкалы – конечному значению диапазона измерений;
- если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений – арифметической сумме конечных значений диапазона измерений;
- для средств измерений с установленным номинальным значением – этому номинальному значению;
- если шкала существенно неравномерна – x_N устанавливается равномерным всей длине шкалы или ее части соответствующего диапазона измерений.

Абсолютная погрешность в данном случае выражается, как и длина шкалы, в единицах длины.

По характеру связей между величиной погрешности и уровнем сигнала, погрешности различают на аддитивную и мультипликативную.

По закономерности появления погрешности при многократных испытаниях различают систематические и случайные.

По причинам появления погрешности различают:

- методические – возникающие из-за несовершенства метода измерения, а также из-за приближений, допущенных при проектировании приборов;

- инструментальные – возникающие, во-первых, из-за несовершенства технологического процесса изготовления прибора, во-вторых, вследствие изменения геометрических размеров и физических характеристик деталей и узлов прибора при изменении окружающих условий, и в-третьих, из-за изменения характеристик прибора при изменении режима питания.

По происхождению погрешности подразделяются на основную и дополнительную.

Основная – погрешность прибора при нормальных условиях эксплуатации. Она подразделяется на погрешность приближения и погрешность несоответствия параметров измерительного устройства номинальным значениям и погрешность от действия внутренних дестабилизирующих факторов.

Дополнительная – погрешность, возникающая при отклонении внешних условий от нормальных.

Наиболее обобщенной характеристикой погрешности является понятие «класс точности».

Класс точности средств измерений – обобщенная характеристика, обусловленная пределами основной и дополнительной погрешностей и другими, влияющими на их точность, свойствами средства измерения, значения которых должны быть установлены в стандартах или технических условиях на конкретные средства измерения.

Класс точности определяется погрешностью, а форма его выражения зависит от способа установления пределов допускаемой погрешности.

Класс точности может быть нормирован по абсолютной, относительной или приведенной погрешности. В соответствии с этим вводятся и обозначения классов точности на приборах.

3.2 Расчет шунтов и добавочных резисторов

Обычно электроизмерительные приборы рассчитаны на измерение определенных электрических величин в заданном диапазоне. Для расширения диапазона измерения приборов используют масштабные преобразователи: пассивные, работающие за счет энергии объекта исследования, и активные, работающие за счет дополнительного источника питания.

К пассивным относятся шунты, добавочные сопротивления, делители напряжения, измерительные трансформаторы тока и напряжения.

К активным относятся измерительные усилители.

Если измеряемый ток I превышает по значению ток отклонения I_n подвижной части, то параллельно цепи измерительного механизма подключается шунт, через который пропускается ток $I_{ш} = I - I_n$.

Если рассмотреть шунт как делитель тока с коэффициентом деления $n = I / I_n$, то его сопротивление

$$R_{ш} = \frac{R_n}{(n-1)}. \quad (3.6)$$

Для расширения пределов измерения вольтметров используют добавочные сопротивления. Для изменения пределов измерения напряжения U_V до U последовательно с вольтметром включают добавочный резистор, сопротивление R_d которого при заданном значении I_V определяется выражением

$$R_d = R_V (n-1), \quad (3.7)$$

где n – коэффициент расширения предела измерения вольтметра, $n = U/U_V$.

Для этих же целей можно использовать и резистивный делитель (рисунок 3.1).

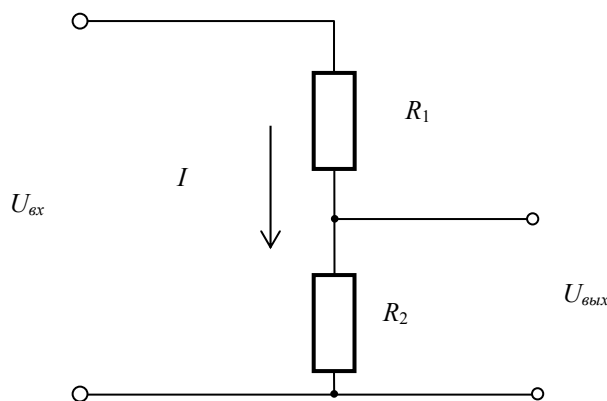


Рисунок 3.1 – Схема резистивного делителя

Обычно при расчете делителя задаются максимальной мощностью делителя или током, протекающим через делитель. Тогда

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = \frac{U_{\text{вх}}}{I} \\ R_2 = \frac{U_{\text{вых}}}{I} \end{cases} \quad (3.8)$$

Решая данную систему, находят величины сопротивлений резисторов.

3.3 Расчет измерительных мостов постоянного и переменного тока

В измерительных цепях постоянного и переменного тока для подключения первичных пассивных преобразователей неэлектрических величин часто используются измерительные мосты.

Мосты могут быть дифференциальные и нулевые (неуравновешенные и уравновешенные). Мосты постоянного тока выполняются в виде двухплечих, одинарных (четыреплечие), двойных (шестиплечие). Индикаторами равновесия в них служат гальванометры постоянного тока, электрометры, автокомпенсационные микровольтамперметры. Такие мосты используются для измерения больших и малых сопротивлений.

Схема моста постоянного тока приведена на рисунке 3.2.

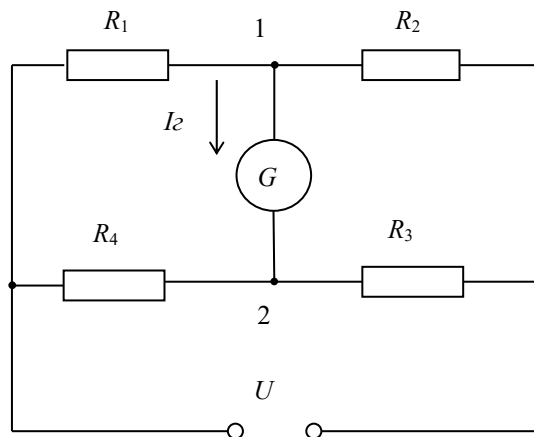


Рисунок 3.2 – Схема моста постоянного тока для измерения сопротивления

Расчет таких мостов производится по любому методу расчета сложных цепей. Ток гальванометра определим по методу эквивалентного генератора:

$$I_{\Gamma} = \frac{U_{\text{xx1,2}}}{R_{\text{э}} + R_{\Gamma}}, \quad (3.9)$$

где $U_{\text{xx1,2}}$ – напряжение между точками 1, 2 при разомкнутой цепи индикатора равновесия, В;

$R_{\text{э}}$ – сопротивление цепи между точками 1, 2 (цепь индикатора разомкнута), источник U заземлен внутренним сопротивлением, Ом;

R_{Γ} – сопротивление цепи индикатора гальванометра, Ом.

Преобразуем и найдем I_{Γ} :

$$I_{\Gamma} = U \frac{R_1 / (R_1 + R_2) - R_4 / (R_3 + R_4)}{R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) + R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4 + R_{\Gamma})} = I_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma} =$$

$$= U \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3 (R_3 + R_4) + R_3 \cdot R_4 (R_1 + R_2) + R_{\Gamma} \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}.$$

Изменяя значение сопротивления одного или нескольких плеч моста, доводят до нуля ток $I_{\Gamma} = 0$.

Равновесие моста наступает при выполнении следующего условия:

$$R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4 = 0.$$

Тогда

$$R_x = R_1 = R_2 \cdot R_4 / R_3.$$

Отношение изменения ΔI_{Γ} , или ΔU_{Γ} , или ΔP_{Γ} в цепи индикатора к относительному изменению ΔR либо к абсолютному изменению R называется чувствительностью моста.

$$S_I = \Delta U_{\Gamma} \frac{\Delta U_{\Gamma}}{\Delta R / R} \text{ или } S_I = \frac{\Delta I_{\Gamma}}{\Delta R};$$

$$S_V = \Delta U_{\Gamma} \frac{\Delta U_{\Gamma}}{\Delta R / R} \text{ или } S_{\Gamma} = \frac{\Delta U_{\Gamma}}{\Delta R}. \quad (3.10)$$

Мосты переменного тока делятся на одинарные, двойные, Т-образные. По характеру плеч мосты бывают индуктивные и безиндуктивные, а по влиянию частоты – частотнозависимые и частотнонезависимые. В качестве индикаторов используются электронные индикаторы с регулируемой чувствительностью (усилитель переменного тока с входным сопротивлением 150...200 кОм, линейный детектор, магнитоэлектрический прибор).

Для равновесных мостов переменного тока (рисунок 3.3) справедливо соотношение $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ или $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$. Если записать в показательной форме

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot Z_3 \cdot e^{j\varphi_3} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} \cdot Z_4 \cdot e^{j\varphi_4}, \quad (3.11)$$

то отсюда следует, что для уравнивания моста необходимо не только равенство модулей сопротивлений плеч моста, а также и равенство сумм соответствующих фаз:

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (3.12)$$

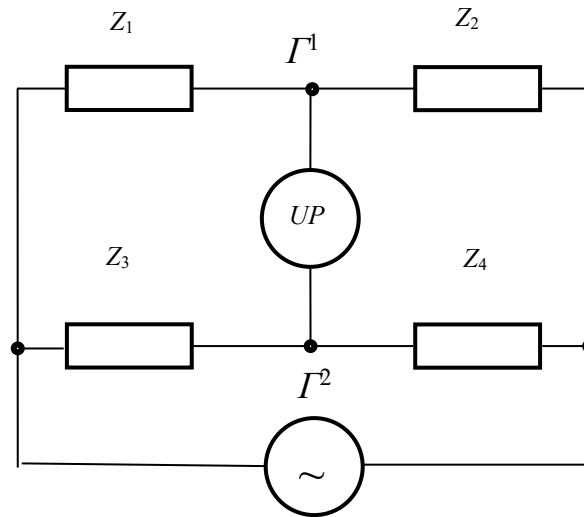


Рисунок 3.3 – Схема моста переменного тока

В соответствии с обозначениями элементов, принятыми на рисунке 3.4, условие равновесия при изменении емкости имеет следующее выражение:

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_3 = R_2 \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \right), \quad (3.13)$$

откуда

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2}; \quad R_x = \frac{R_4}{R_3}. \quad (3.14)$$

Обычно вместо R_x измеряют либо тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x$ в конденсаторе, либо добротность $Q = 1/\operatorname{tg} \delta_x$. Подставив в выражение для $\operatorname{tg} \delta_x$ значения R_x и C_x , получим $\operatorname{tg} \delta_x = \omega R_4 C_4$.

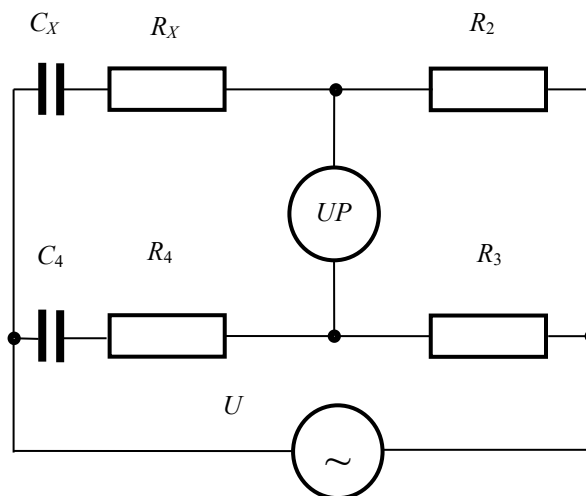


Рисунок 3.4 – Схема моста переменного тока для измерения емкости

3.4 Расчет термопреобразователей

При контроле параметров технологических процессов одним из важных контролируемых параметров является температура, контроль и измерения которой необходимо проводить довольно в широком диапазоне: от минус 100 °С до плюс 2000 °С. Поэтому создание приборов для измерения температуры является часто встречаемой задачей. При решении данной задачи первым этапом является расчет первичного преобразователя.

Для измерения температуры используют четыре типа преобразователей: металлические термометры сопротивления, полупроводниковые терморезисторы, термопары и пирометры.

Металлические термометры сопротивления – это платиновые термопреобразователи, которые используются для измерения температуры в диапазоне от минус 200 °С до плюс 1100 °С, и медные, используемые при температурах от минус 200 °С до плюс 200 °С. Платиновые термометры в диапазоне температур от 0 °С до плюс 650 °С используют как образцовые.

Зависимость сопротивления от температуры в диапазоне от 0 °С до плюс 650 °С имеет вид

$$R_{\Theta} = R_0(1 + A\Theta + B\Theta^2), \quad (3.15)$$

где R_0 – сопротивление при 0 °С, Ом;

$$A = 3,90784 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1};$$

$$B = 5,7841 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2};$$

Θ – температура, К.

В интервале температур от 0 °С до минус 200 °С зависимость сопротивления платины имеет вид

$$R_{\Theta} = R_0[1 + A\Theta + B\Theta^2 + C(\Theta - 100)\Theta^3], \quad (3.16)$$

где $C = -4,482 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3}$.

При расчете медных терморезисторов в диапазоне температур от минус 50 °С до плюс 180 °С пользуются формулой

$$R_{\Theta} = R_0(1 + \Theta\alpha), \quad (3.17)$$

где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$;

R_0 – сопротивление при 0 °С, Ом.

Полупроводниковые терморезисторы отличаются от металлических меньшими габаритами, значительно большим температурным коэффициентом

сопротивления (ТКС) (таблица 3.1). При этом ТКС отрицательный и уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры:

$$R_{\Theta} = R_1 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}, \quad (3.18)$$

где T – измеряемая температура;

B – коэффициент, имеющий размерность температуры;

R_1 – сопротивление резистора при температуре T_1 .

Таблица 3.1 – Характеристики некоторых полупроводниковых терморезисторов

Тип термо-резистора	Номинальное сопротивление $R_{ном}$, кОм	Постоянная B , 10^2 К	Диапазон рабочих температур $T_{раб}$, °С	Коэффициент рассеяния K , Вт/К	Постоянная времени τ , с
ММТ-6	10...100	20,6	От –60 до +125	1,7	35
СТ3-6	6,8...8,2	20,5...24	От –90 до +125	1,6	35
КМТ-10	100...3300	36	От 0 –до +125	–	–
СТ4-2	2,1...3,0	34,7...36,3	От –60 –до 125	36	–
СТ4-15	1,5...1,8	23,5...32,6	От –60 до +180	36	–
СТ4-17	1,5...2,2	32,6...36	От –80 до +100	2	30
КМТ-14	0,51...7500	41...70	От –10 до +300	0,8	60
СТ3-14	1,5...2,2	26...33	От –60 до +125	1,1	4
СТ1-18	1,5...2200	40,5...90	От –60 до +300	0,2	1
СТ3-19	2,2...15	45	От –90 до +125	0,5	3
СТ3-25	3,3...4,5	26...32	От –100 до +125	0,08	0,4

Терморезисторы включаются в схемы неравновесных мостов по трехпроводной схеме (рисунок 3.5).

Напряжение на входе операционного усилителя, которое является напряжением питания моста,

$$U = U_0 (R_1 + R + r_1 + r_3) / R_1. \quad (3.19)$$

Выходное напряжение моста определяется как

$$U_{вых} = U_0 \frac{R_1 + R + r_1 + r_2}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} - U_0 \frac{R_1 + r_3}{R_1}. \quad (3.20)$$

Напряжение питания U_0 ограничивается значением допустимого тока, протекающего через терморезистор:

$$I = U_0 / R_1. \quad (3.21)$$

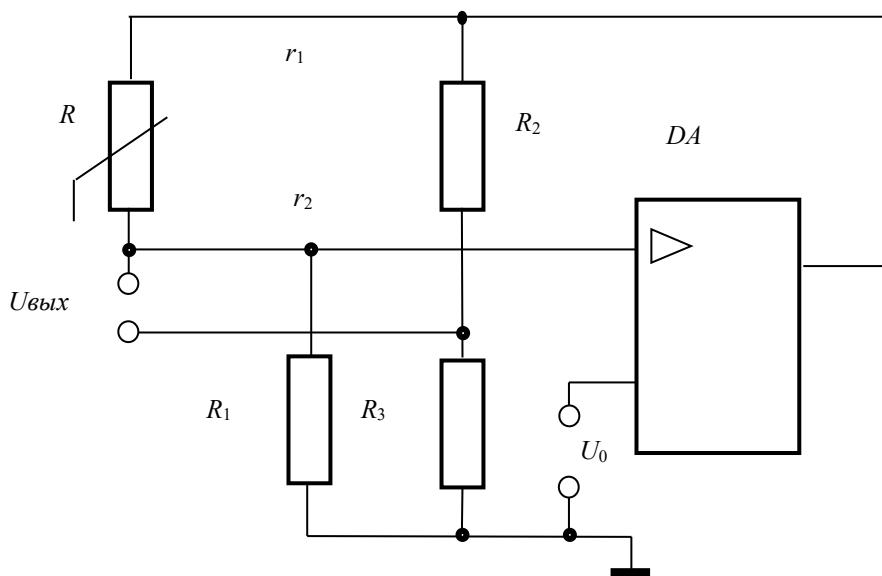


Рисунок 3.5 – Схема преобразования сопротивления в напряжение

Для линеаризации характеристики при работе с полупроводниковыми терморезисторами можно использовать нелинейную зависимость напряжения от одного из сопротивлений в резистивном делителе или неравновесном мосте. Схема такой цепи представлена на рисунке 3.6.

В данной цепи напряжение с делителя R_1 и R подается на неинвертирующий вход усилителя. Сопротивление R_1 выбирается в соответствии с выражением

$$R_2 + R_1 = R_{mn} (B - 2T_{\Pi}) / (B + 2T_{\Pi}), \quad (3.22)$$

где T_{Π} – абсолютная температура, К ;

R_{mn} – сопротивление терморезистора, соответствующего температуре T_n , кОм.

Сопротивление R_2 и R_3 выбирается исходя из требуемой чувствительности преобразователя. Напряжение находят как

$$U_{вых} = U_0 \left[\frac{R_{\Theta}}{R_{\Theta} + R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) - \frac{R_3}{R_2} \right]. \quad (3.23)$$

Термоэлектрические преобразователи работают на принципе термоэлектрического эффекта. Они используются для измерения температур в диапазоне от минус 200 °С до плюс 2200 °С. Диапазон измерения зависит от материала, используемого в спаях термопары.

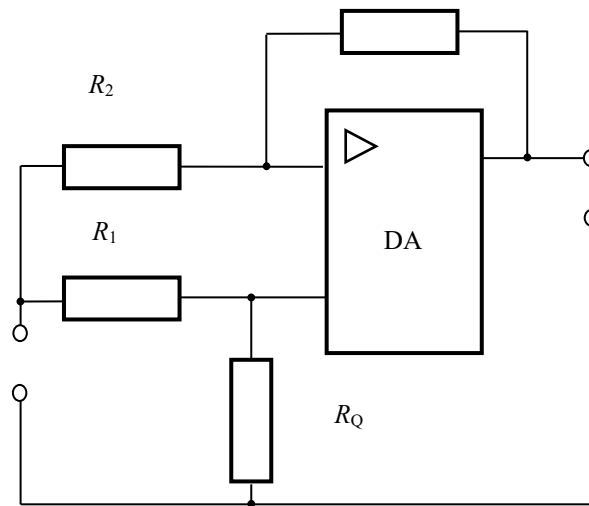


Рисунок 3.6 – Схема неравновесного моста

Термопары включают в схему прямого измерения с уравнительным резистором (рисунок 3.7).

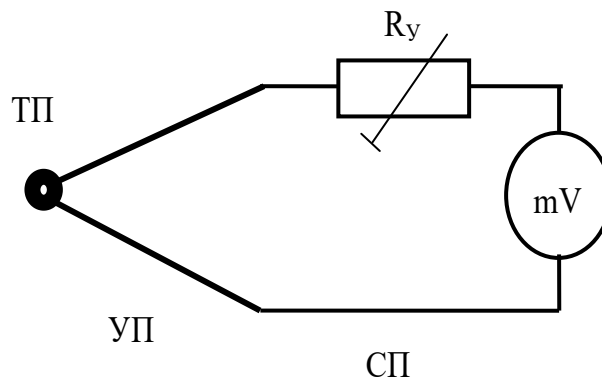


Рисунок 3.7 – Схема включения термопары

Показания милливольтметра

$$U = \frac{E_{ТП}}{R_{BX} + R_{mv}}, \quad (3.24)$$

где $E_{ТП}$ – ЭДС термопары, мВ;

R_{BX} – входное сопротивление, $R_{BX} = R_{ТП} + R_{ПП} + R_Y$ – сопротивления термопары, проводов, уравнительного резистора, Ом;

R_{mv} – сопротивление милливольтметра, Ом.

К бесконтактным методам относятся приборы, называемые пирометрами. В основу работы пирометров излучения положены законы, связывающие температуру тел с интенсивностью их электромагнитного излучения.

Все методы оптической пирометрии основываются на законах излучения абсолютно черного тела. Так, закон Стрэфана – Больцмана связывает энергетическую светимость абсолютно черного тела с его абсолютной температурой выражением

$$R_F^* = \sigma \cdot T^4, \quad (3.25)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$;

T – температура тела, К.

Реальное тело, имеющее коэффициент черноты ε при той же температуре, будет обладать меньшей энергетической светимостью:

$$R_F = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 < R_E^*. \quad (3.26)$$

Поскольку энергетическая яркость для источников, излучающих одинаково во всех направлениях, связана с его энергетической светимостью и испускательной способностью соотношениями

$$L_e = B_E = \frac{R_E}{\pi} ; \quad b_V = \frac{r_V}{\pi} ; \quad b_\lambda = \frac{r_\lambda}{\pi} , \quad (3.27)$$

где L_e, b_V, b_λ – энергетическая яркость и ее спектральные плотности соответственно, то

$$B_E = B_E^* ; \quad \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \sigma \cdot T_p^4 ; \quad L_e = \frac{1}{\pi} \sigma \cdot T^4. \quad (3.28)$$

Тогда температура реального тела по показаниям измерений его радиационной температуры

$$T = T_p^4 \cdot \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}}. \quad (3.29)$$

Для измерения температуры используются также яркостные пирометры, измерение в которых сводится к сравнению яркости градуированного источника излучения, находящегося в пирометре, в узком диапазоне спектра излучения.

Пример расчета яркостного фотоэлектрического пирометра.

Поток, падающий на чувствительную поверхность фотоприёмника (рисунок 3.8), можно представить в виде

$$\Phi = \pi \sin^2 \alpha \ S_{изл} L \ \tau , \quad (3.30)$$

где τ – результирующий коэффициент пропускания оптической системы;

$S_{изл}$ – площадь излучения поверхности, м²;

α – апертурный угол, угл. град;

L – энергетическая яркость, Вт·ср⁻¹м⁻².

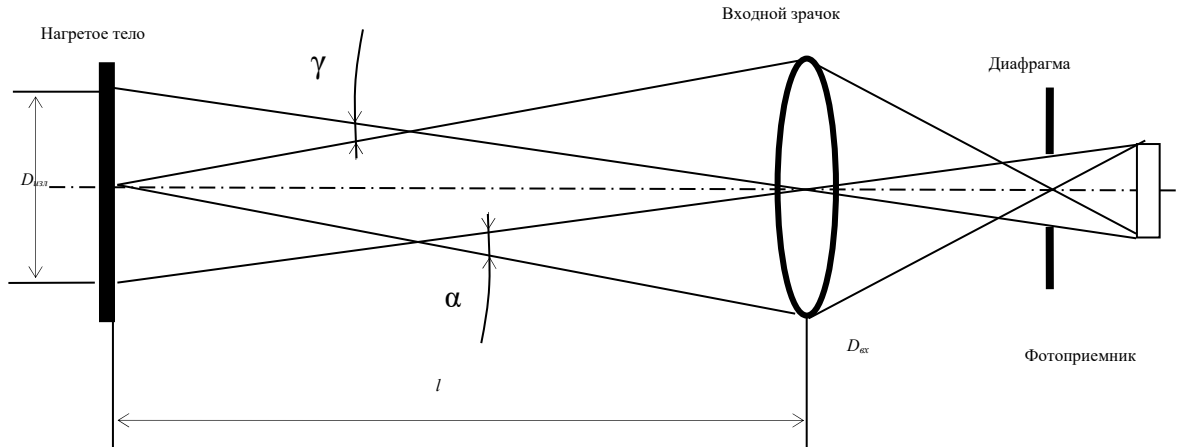


Рисунок 3.8 – Оптическая схема фотоэлектрического пирометра

Если поле ограничено углом 2γ , то при малых углах

$$\begin{aligned}\sin^2 \alpha &= \left(\frac{D_{вх}}{2l} \right)^2 \text{ и } \sin^2 \gamma = \left(\frac{D_{изл}}{2l} \right)^2; \\ \sin^2 \alpha &= \left(\frac{D_{вх}}{D_{изл}} \right)^2 \cdot \sin^2 \gamma = \frac{S_{вх}}{S_{изл}} \sin^2 \gamma; \\ \sin^2 \gamma &= \left(\frac{D_{изл}}{2l} \right)^2 \cdot \sin^2 \alpha = \left(\frac{D_{вх}}{2l} \right)^2.\end{aligned}\quad (3.31)$$

Найдем величину потока:

$$\Phi = \pi \cdot \sin^2 \gamma \cdot S_{вх} \cdot L \cdot \tau = \sin^2 \gamma \cdot S_{вх} \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (3.32)$$

где $S_{изл}$ – площадь, ограниченная полем зрения оптической системы, м².

Ток фотоприемника находят исходя из чувствительности выбранного фотоприёмника. Выбор фотоприемника основан на его спектральных характеристиках. Ток фотодиода вычисляется по следующей зависимости:

$$I_{\Phi} = S \cdot \Phi, \quad (3.33)$$

где S – чувствительность фотодиода, А/Вт;

Φ – величина потока излучения, Вт.

3.5 Расчет оптической системы измерительного преобразователя

Оптические преобразователи находят все более широкое применение благодаря своим некоторым отличительным особенностям, главные из которых бесконтактность, помехоустойчивость, высокое быстродействие, а в ряде случаев невозможность использования других преобразователей.

Основными при расчете оптической системы преобразователя являются геометрический и энергетический расчеты.

Геометрический расчет оптической системы.

Оптическая система прибора может иметь один, два или более компонентов.

Оптическая система с одним компонентом является наиболее простой по своей реализации.

На рисунке 3.9 изображена оптическая схема с одним оптическим элементом, где введены следующие обозначения: a, b – линейные размеры излучающей поверхности; e, h – линейные размеры приемника; l – расстояние между объективом и источником излучения; l' – расстояние между объективом и приемником.

Размеры изображения излучающей поверхности обозначим a' и b' . Уместим изображение излучателя в пределах поверхности приемника, т. е. положим, что $a' < e, a b' < h$.

Линейное увеличение

$$\beta = \frac{\alpha^1}{\alpha} = \frac{l^1}{l}. \quad (3.34)$$

Подставляя $a' < e$, получим расстояние до приемника

$$l^1 \leq \frac{el}{\alpha}. \quad (3.35)$$

Расстояние l может быть задано исходя из назначения и применения прибора. Тогда положение приемника определяется из (3.42).

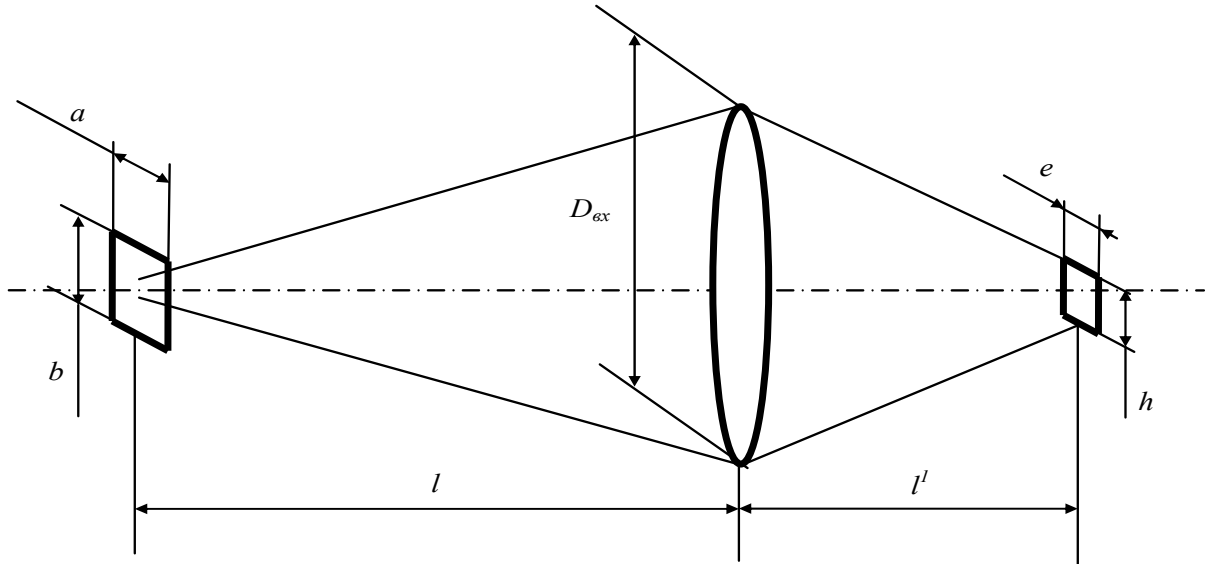


Рисунок 3.9 – Оптическая схема с одним компонентом

Фокусное расстояние объектива

$$f = \frac{l \cdot l^l}{l + l^l}. \quad (3.36)$$

При очень большом расстоянии l до излучателя приемник располагается в фокальной плоскости объектива, как следует из (3.43).

Диаметр входного отверстия находится из формулы

$$D_{вх} = 2l \sqrt{\frac{\Phi_{\min}}{\tau \cdot \pi \cdot L_e \cdot S_{изл}}}, \quad (3.37)$$

где $\Phi_{\min}$ – минимальное значение потока на поверхности фотоприемника, лм;

τ – коэффициент пропускания оптической системы;

L_e – энергетическая яркость, Вт·ср⁻¹м⁻² (энергетическая яркость связана с потоком излучения следующей зависимостью: $\Phi_0 = \pi \cdot L_e \cdot S_{изл}$);

$S_{изл}$ – площадь излучающей поверхности, м².

Или по формуле

$$D_{вх} = \sqrt{\frac{\Phi_{\min}}{\tau \cdot \pi \cdot E_e}} = 2l \sqrt{\frac{\Phi_{\min}}{2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot I_e}}. \quad (3.38)$$

Размеры l и $D_{вх}$ определяют продольные и поперечные размеры оптической системы.

При отдаленном источнике светочувствительная поверхность приемника располагается в фокальной плоскости объектива. Если наибольший угловой размер источника излучения равен 2γ , то линейный размер изображения источника излучения

$$a^1 = 2f^1 \cdot \operatorname{tg}\gamma. \quad (3.39)$$

Чтобы изображение уместилось на светочувствительной поверхности фотоприемника, необходимо иметь $a' < e$.

Откуда фокусное расстояние

$$f^1 = l^1 = \frac{e}{2\operatorname{tg}\gamma} \quad f^1 = l^1 = \frac{e}{2\operatorname{tg}\gamma}. \quad (3.40)$$

Оптическая система с двумя компонентами.

В зависимости от назначения система имеет несколько вариантов. Оптическая схема с двумя компонентами при удаленном источнике приведена на рисунке 3.10.

Габариты такой системы определяются из следующих условий.

Диаметр объектива находится по одной из формул (3.44) или (3.55). Фокусное расстояние объектива f_1' устанавливается конструктивно по известным в оптике значениям допустимого относительного отверстия D_{ex}/f_1' . Будем считать, что $f_1' \approx (2 \dots 5) D_{\text{ex}}$.

Для того чтобы поток, попавший в оптическую систему, не проходил мимо светочувствительной поверхности приемника, диаметр выходного зрачка $D_{\text{вых}} < e$, при этом e – наименьший линейный размер чувствительной поверхности фотоприемника.

Расстояние между конденсором и фотоприемником

$$l_2^1 = \frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{ex}}} (f_1^1 + b) \leq \frac{e}{D_{\text{ex}}} (f^1 + b). \quad (3.41)$$

Расстояние b между фокальной плоскостью объектива и конденсором должно быть больше фокусного расстояния конденсора:

$$b = \left(\frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{ex}}} \right) \cdot f^1. \quad (3.42)$$

Расстояние b также устанавливается конструктором.

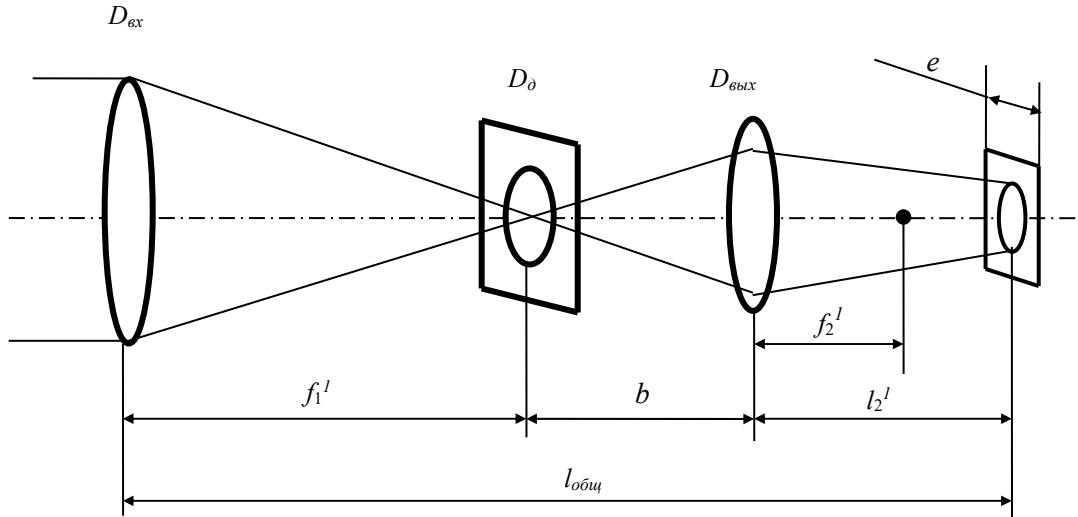


Рисунок 3.10 – Оптическая система с двумя компонентами при отдаленном излучателе

Фокусное расстояние конденсора

$$f_2^1 = \frac{(f_1^1 + b) \cdot l_2^1}{f_1^1 + b + l_2^1}. \quad (3.43)$$

Диаметр полевой диафрагмы

$$D_n = 2f^1 \cdot \operatorname{tg} \lambda, \quad D_n = 2f^1 \cdot \operatorname{tg} \lambda, \quad (3.44)$$

где γ – угол поля зрения.

Общая длина системы

$$l_{\text{общ}} = f_1^1 + b + l_2^1. \quad (3.45)$$

На рисунке 3.11 представлена схема с двумя компонентами, предназначенная для просвечивания объекта измерения параллельным пучком.

Для получения параллельного пучка источник располагается в передней фокальной плоскости объектива. Расстояние между объективом и коллективом d является заданным. Фокусное расстояние объектива f_1 выбирается так, чтобы передний фокальный угол был достаточно велик и использование потока излучателя не оказалось слишком малым.

$$l_{общ} = f_1^I + d + l_2^I. \quad (3.50)$$

Оптическая схема с четырьмя компонентами представлена на рисунке 3.12. Такая схема может быть использована в приборах, имеющих оптический модулятор.

Расчет такой оптической схемы довольно прост, т. к. все элементы схемы находятся в фокальных плоскостях оптических компонентов. Зная геометрические размеры источника излучения $D_{ис}$, диафрагмы (отверстий модулятора) D_ϕ и размеры светочувствительной поверхности фотоприемника $D_{фн}$, из формулы подобия рассчитываются фокусные расстояния линз:

$$\frac{D_{ис}}{D_\phi} = \frac{f_1}{f_2}; \quad \frac{D_\phi}{D_{фн}} = \frac{f_3}{f_4}. \quad (3.51)$$

Размер d выбирается конструктивно, исходя из условий закрепления линз.

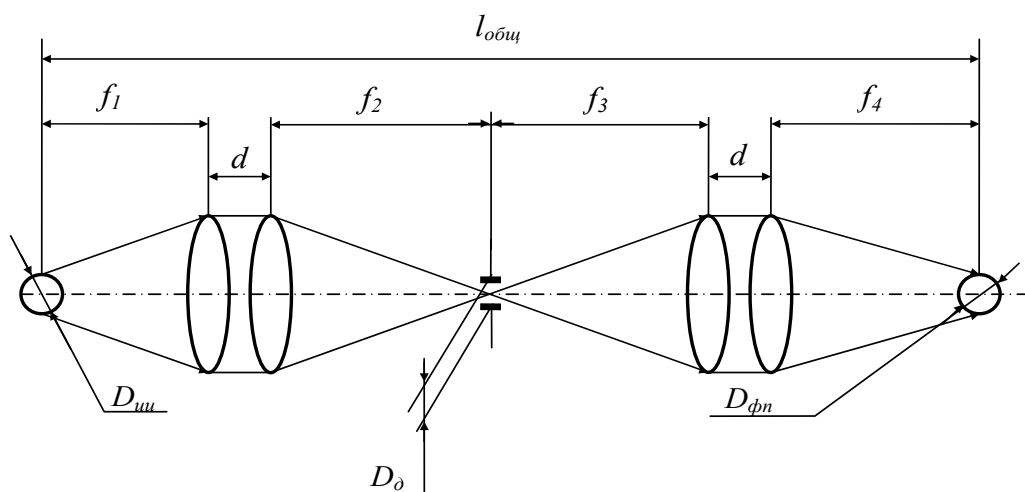


Рисунок 3.12 — Оптическая схема с четырьмя компонентами, используемая для оптических модуляторов

Общая длина оптической системы

$$l_{общ} = f_1 + 2d + f_2 + f_3 + f_4. \quad (3.52)$$

Энергетический расчет.

Цель энергетического расчета — определение величины потока, достигающего фотопреобразователя, исходя из мощности источника излучения, потерь в оптической системе и влияния функции преобразования.

В общем случае величина потока, достигшего светочувствительной поверхности фотоприемника, определяется следующим соотношением:

$$\Phi_{\phi n} = \Phi_u \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5 \cdot f(x), \quad (3.53)$$

где τ_3 – коэффициент полезного действия конденсора, определяется диаграммой направленности источника излучения и геометрическими параметрами конденсора.

Для лампы накаливания

$$\tau_1 = \frac{1}{1} \left(1 + \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (3.54)$$

Для светодиодов расчет ведется исходя из заданной диаграммы направленности излучения (диаграмма направленности светодиода берется из справочника).

На миллиметровке строится диаграмма направленности излучения светодиода, которая берется из справочников по источникам излучения. На расчетном расстоянии, в масштабе, располагается первая линза оптической системы $D_{\text{л}}$. Высчитывается единичная площадь S_1 диаграммы направленности светодиода. Далее высчитывается площадь S_2 , ограниченная углом 2α на диаграмме направленности (рисунок 3.13). Коэффициент вычисляется как отношение площадей S_2 и S_1

$$\tau_1 = \frac{S_1}{S_2}.$$

τ_2 – коэффициент, связанный с потерями из-за несогласования спектральных характеристик источника излучения и приемника излучения,

$$\tau_2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot dS}{\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\lambda} \cdot d\lambda}. \quad (3.55)$$

Практически коэффициент определяется следующим образом (рисунок 3.14):

- на миллиметровке вычерчивается спектральная характеристика источника излучения и приемника излучения;
- путем перемножения находят результирующую кривую;
- находят отношение площади полученной кривой S_2 и площади кривой спектральной характеристики фотоприемника S_1 .

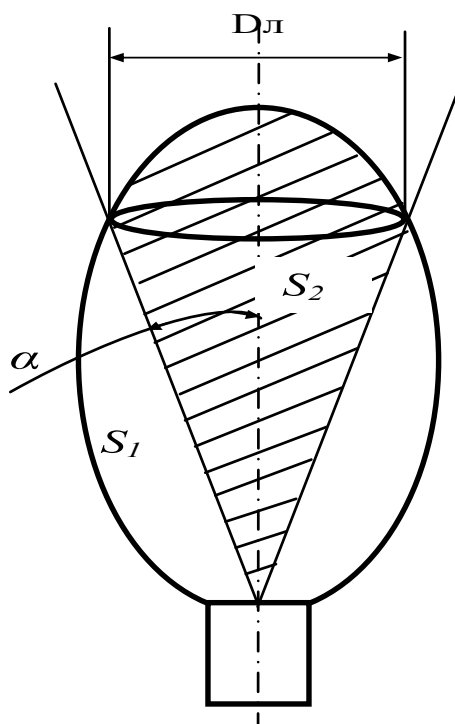


Рисунок 3.13 – Схема расчета τ_1 для светодиода

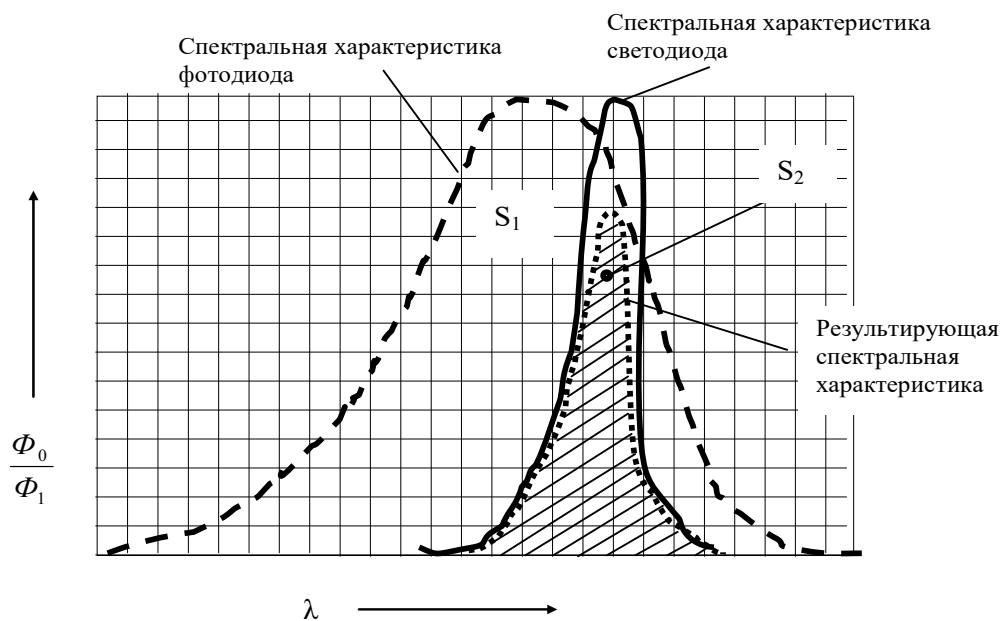


Рисунок 3.14 – Схема расчета τ_2 при согласовании спектральных характеристик светодиода и фотодиода

Найденное отношение площадей и является коэффициентом потерь.

τ_3 – потери на оптические элементах, появляющихся в связи с френелевскими потерями. $\tau_3 = 0,95$ на каждый переход из одной оптической среды в другую. τ_3 – потери в среде, где распространяется излучение, в воздухе

$\tau_4 = 1$. τ_5 – потери, связанные с использованием светочувствительной поверхности фотопреобразователя.

Ток фотоприемника I находится исходя из найденного значения $\Phi_{фп}$ и чувствительности выбранного фотопреобразователя $S_{фп}$:

$$I = \Phi_{фп} \cdot S_{фп}. \quad (3.56)$$

Далее производится расчет согласующего усилителя.

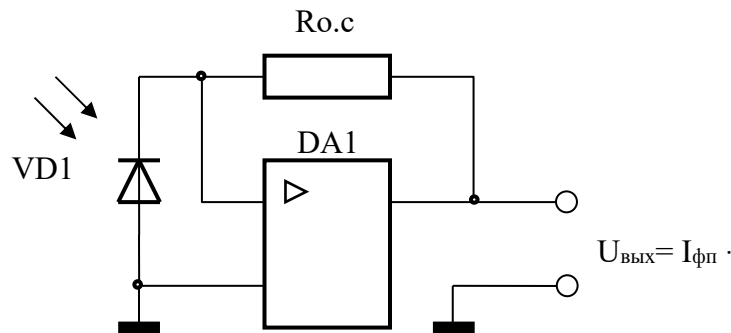


Рисунок 3.15 – Схема входного усилителя с фотодиодом

3.6 Расчет емкостных преобразователей

Рассмотрим в качестве примера расчет емкостного преобразователя для измерения уровня веществ.

Схема такого преобразователя представляет собой цилиндрический конденсатор с коаксиально расположенными электродами. Конструкция емкостного чувствительного элемента с коаксиально расположенными электродами определяется физико-химическими свойствами материала. Для неэлектропроводной (диэлектрической) жидкости применяют уровнемеры, оснащенные чувствительным элементом, схема которого представлена на рисунке 3.16.

Чувствительный элемент состоит из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, частично погруженных в жидкость. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, межэлектродное пространство которого до высоты h заполнено жидкостью, пространство $H-h$ – парогазовой смесью. Для фиксирования взаимного расположения электродов предусмотрен изолятор 3.

В общем виде электрическая емкость цилиндрического конденсатора определяется уравнением

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 H / [\ln(D/d)], \quad (3.57)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;

H – высота электродов, м;

D, d – диаметры наружного и внутреннего электродов соответственно, м.

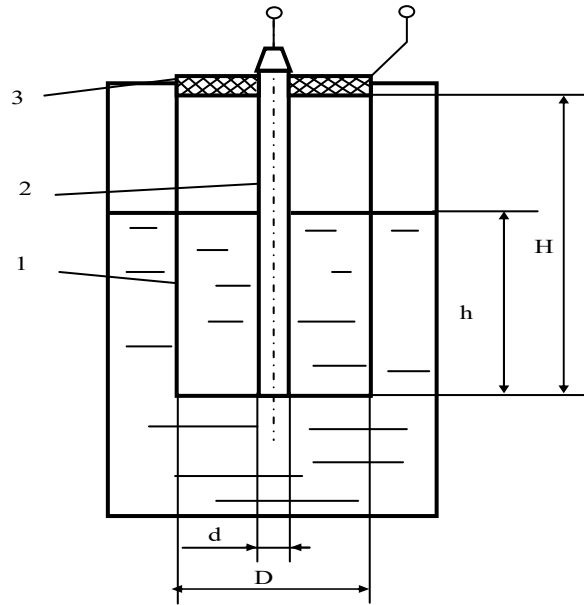


Рисунок 3.16 – Схема емкостного преобразователя для измерения уровня

Для цилиндрического конденсатора, межэлектродное пространство которого заполняется веществами, обладающими различными диэлектрическими проницаемостями, как показано на рисунке 3.16, полная емкость определяется выражением

$$C_n = C_0 + C_1 + C_2, \quad (3.58)$$

где C_0 – емкость проходного изолятора, пФ;

C_1 – емкость межэлектродного пространства, пФ;

C_2 – емкость межэлектродного пространства, заполненного парогазовой смесью, пФ.

С учетом уравнения (3.57) полную емкость чувствительного элемента представим в виде

$$C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{жс}h}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r(H-h)}{n(D/d)}. \quad (3.59)$$

Так как для паров жидкости и газов $\epsilon_r \approx 1$, а C_0 – величина постоянная, уравнение (3.66) можно преобразовать следующим образом:

$$C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/d)} H \left[1 + (\epsilon_{жс} - 1) \frac{h}{H} \right]. \quad (3.60)$$

Данное уравнение представляет собой статическую характеристику емкостного преобразователя для неэлектропроводящих сред. Величина $\varepsilon_{ж}$ является функцией температуры, поэтому для исключения влияния температуры жидкости на результат измерения применяют компенсационный конденсатор, который размещают ниже емкостного чувствительного элемента и полностью погружают в жидкость. В некоторых случаях при постоянстве состава жидкости его заменяют конденсатором постоянной емкости.

Для измерения уровня электропроводящих жидкостей применяют уровнемеры, оснащенные емкостным чувствительным элементом с металлическим электродом, покрытым изолирующим материалом (например, фторопластом). Электрод частично погружен в жидкость (рисунок 3.17).

В качестве второго электрода используется либо стенка резервуара, если она металлическая, либо специальный металлический электрод, если стенка выполнена из диэлектрика. Полная емкость такого преобразователя определяется следующим образом:

$$C_n = C_0 \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad (3.61)$$

где C_0 – емкость проходного конденсатора, пФ;

C_1 – емкость конденсатора, образованного электродом 1 и поверхностью жидкости на границе с изолятором, пФ;

C_2 – емкость конденсатора, образованного поверхностью жидкости на границе с изолятором и стенками резервуара, пФ.

Преобразование электрической емкости в электрический сигнал может осуществляться разными методами: цепями в виде делителей, мостами переменного тока, резонансными и импульсными методами.

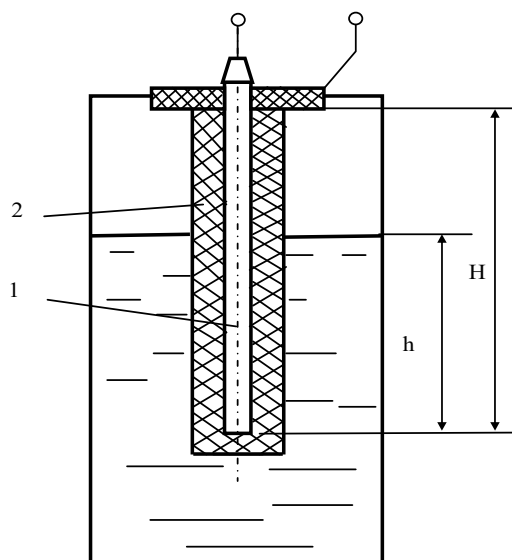


Рисунок 3.17 – Схема емкостного преобразователя для измерения уровня токопроводящих жидкостей

Рассмотрим в качестве примера цепь в виде делителя.

Емкость большинства преобразователей составляет $10...100$ пФ. Поэтому даже при относительно высоких частотах напряжения питания ($10^5...10^7$ Гц) их выходные сопротивления велики и $X_c = 1/\omega C = 10^3...10^7$ Ом. Выходная мощность преобразователя мала и поэтому требует применения усилителей.

Основной трудностью построения измерительных цепей с емкостными преобразователями является защита их от наводок. Для этих целей как сами преобразователи, так и все соединительные кабели тщательно экранируются.

На рисунке 3.18 приведена схема цепи с операционным усилителем, построенная по принципу делителя напряжения.

$$U_{вых} = U_{\Pi} \frac{C_1}{C_2}. \quad (3.62)$$

В данной схеме емкости экранированных проводов $C_{Э1}$, $C_{Э2}$, $C_{Э3}$ практически не влияют на работу измерительного устройства. Это объясняется тем, что емкости $C_{Э1}$ и $C_{Э3}$ включены параллельно источнику сигнала U_{Π} и операционному усилителю. Емкость же $C_{Э2}$ включена параллельно входам операционного усилителя и напряжение на ней близко к нулю.

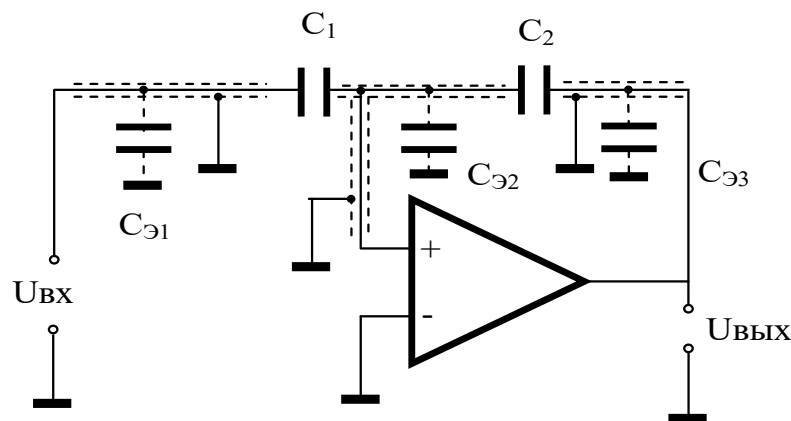


Рисунок 3.18 – Схема включения преобразователя, построенная по принципу делителя напряжения

3.7 Расчет измерительного преобразователя для измерения давления

Существует достаточно большое количество методов измерения давления, основанных на различных физических принципах. Рассмотрим принцип действия деформационных средств измерений. Различают три основные формы чувствительных элементов, распространенных на практике: трубчатые пружины, сильфоны и мембраны.

Трубчатые пружины.

Манометрическая трубка, пружина Бурдона, – упругая криволинейная металлическая полая трубка, один конец которой имеет возможность перемещаться, а другой закреплен жестко. Трубчатые пружины используются в

основном для преобразования измеряемого давления, поданного во внутреннее пространство пружины, в пропорциональное перемещение ее свободного конца. Наиболее распространена одновитковая трубчатая пружина, представляющая собой изогнутую по дуге окружности трубку с обычно овальным поперечным сечением (рисунок 3.19, а).

Под влиянием поданного избыточного давления трубка раскручивается, а под действием разряжения скручивается.

Для тонкостенных трубок изменение центрального угла трубки под действием внутреннего избыточного давления P описывается выражением

$$\delta = \frac{(1 - \mu^2)}{E} \cdot \frac{R^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{a}{\beta + \chi}, \quad (3.63)$$

где γ – центральный угол трубки, угл. град;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости материала трубки, Па;

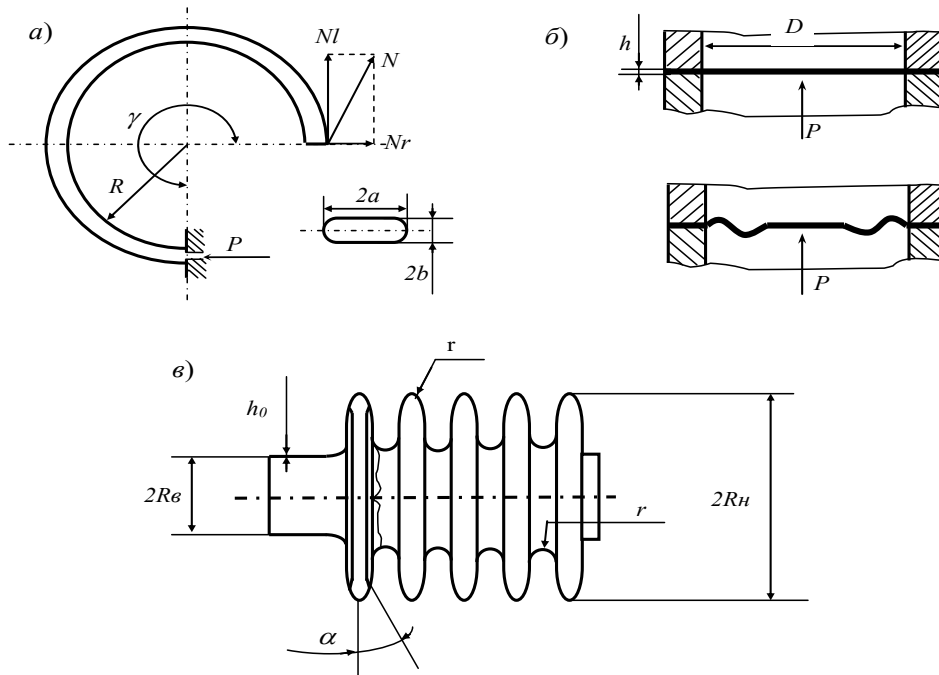
R – радиус кривизны центральной оси трубки (центральная ось – геометрическое место центров тяжести поперечных сечений), м;

h – толщина стенки, м;

a, b – большая и малая полуоси овального сечения, измеренные по среднему контуру, м;

α, β – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы поперечного сечения трубки;

χ – главный параметр трубки, $\chi = Rh/a^2$.



а – трубчатая пружина; б – мембраны; в – сильфон

Рисунок 3.19 – Конструкции чувствительных элементов деформационных средств измерения давления

Основной недостаток данных пружин – малый угол поворота, что требует применения передаточных механизмов.

Мембраны.

Различают упругие и эластичные мембраны (рисунок 3.19, б). Упругая мембрана – гибкая круглая плоская или гофрированная пластина, способная прогибаться под действием давления. Статическая характеристика плоских мембран изменяется нелинейно с увеличением давления, поэтому в качестве рабочего участка используют небольшую часть рабочего хода. Гофрированные мембраны могут применяться при больших прогибах, чем плоские, т. к. имеют значительно меньшую нелинейность характеристики. Мембраны изготавливают из различных марок стали, бронзы, томпака, латуни и т. д.

Величина прогиба δ центра плоской мембраны, закрепленной по контуру, при малых перемещениях под действием давления P

$$\delta = \frac{3(1-\mu^2)16}{16} \cdot \frac{PR^2}{Eh^2}, \quad (3.64)$$

где R – рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления), м;

h – толщина мембраны, м;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости, Па.

Величину прогиба гофрированной мембраны определяют из выражения

$$a = \frac{\delta}{h} + \frac{b\delta^3}{h^2} = \frac{PR^4}{Eh^4}, \quad (3.65)$$

где a, b – коэффициенты, зависящие от формы профиля мембраны и ее толщины.

Сильфоны.

Сильфон – тонкостенная цилиндрическая оболочка с поперечными гофрами, способная получать значительные перемещения под действием давления и силы (рисунок 3.19, в). В пределах линейности статической характеристики сильфона отношение действующей на него силы к вызванной ею деформации остается постоянной и называется жесткостью сильфона. Для увеличения жесткости внутри сильфона часто помещают пружину. Сильфоны изготавливают из бронзы различных марок, полутомпака, углеродистой стали, нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и др. Серийно изготавливают бесшовные и сварные сильфоны диаметром от 8 до 100 мм и толщиной стенки 0,1...0,3 мм.

Осевое перемещение δ для сильфона под действием осевой силы N определяют по формуле

$$\delta = N \frac{1-\mu^2}{E \cdot h_0} \cdot \frac{n}{A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A^2 + B_0^h / R_b^2}, \quad (3.66)$$

где h_0 – толщина стенки на внутреннем диаметре (принимают равной толщине трубы, из которой изготавливают сильфон), м;

n – число рабочих гофров;

α – угол уплотнения, угл. град;

A_0, A_1, A_2, B_0 – коэффициенты, зависящие от отношений R_n/R_v и r/R_v ;

r – радиус закругления гофров по средней линии контура, м.

Выходным параметром практически всех преобразователей давления является перемещение, поэтому, в конечном счете, измерение давления сводится к измерению перемещения. Для преобразования перемещения чувствительного элемента в электрический сигнал широко используются индуктивные, дифференциально-трансформаторные, емкостные, тензорезистивные преобразователи.

Рассмотрим схему индуктивного преобразователя давления (рисунок 3.20).

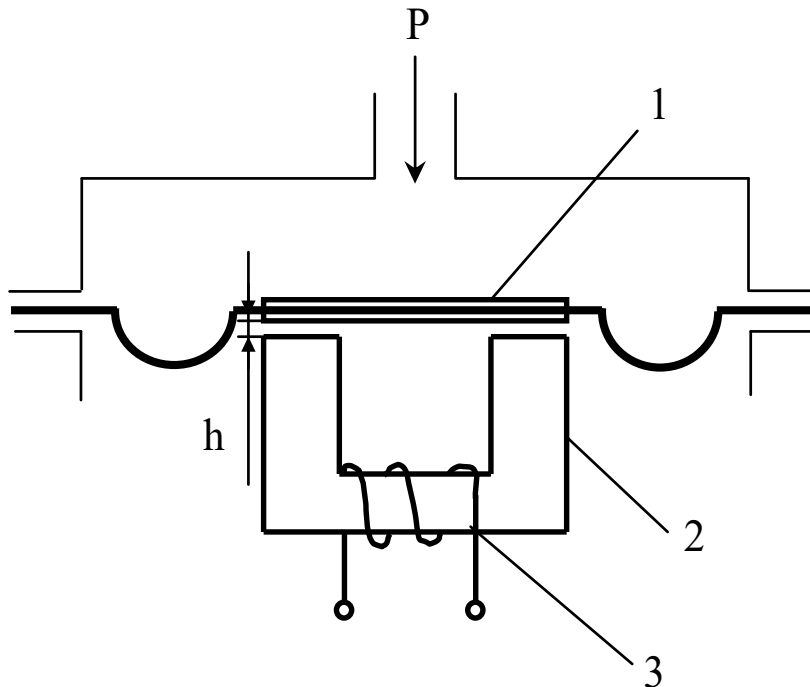


Рисунок 3.20 – Индуктивный преобразователь давления

Мембрана 1, воспринимающая давление, является подвижным якорем электромагнита 2 с обмоткой 3. Под действием измерительного давления мембрана перемещается, что вызывает изменение электрического сопротивления индуктивного преобразователя. Если пренебречь активным сопротивлением катушки, магнитными потоками рассеяния в сердечнике, индуктивность L преобразователя можно определить по формуле

$$L = \frac{W^2}{lc(\omega \cdot S_c) + \delta/(\omega_0 \cdot S)}, \quad (3.67)$$

где W – число витков катушки;

l_c, S_c – длина и площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника, м, м²;

δ – длина воздушного зазора, м;

μ, ω_0 – магнитная проницаемость сердечника и воздуха;

S – площадь поперечного сечения воздушного участка магнитопровода, м².

В процессе измерения величина $L = \frac{W^2}{l_c(\omega \cdot S_c) + \delta/(\omega_0 \cdot S)}$, поэтому выражение (3.74) можно представить как

$$L = \frac{W^2}{l_c/(\mu \cdot S_c) + \delta/(\mu_0 \cdot S)}. \quad (3.68)$$

Принимая во внимание, что величина деформации мембраны пропорциональна измеряемому давлению $\delta = k_1 P$, преобразуем уравнение (3.75) к виду

$$L = W^2 \mu_0 S / (k_1 P). \quad (3.69)$$

Данное уравнение представляет собой статическую характеристику измерительного преобразователя давления индуктивного типа.

Измерение L осуществляется обычно мостами переменного тока или резонансными LC контурами. Толщина мембраны обычно составляет 0,1...0,3 мм, а при давлениях до 20...30 МПа – 1,3 мм.

На рисунке 3.21 приведена схема емкостного преобразователя для измерения давления.

Измеряемое давление воспринимается металлической мембраной 1, являющейся подвижным электродом емкостного преобразователя. Неподвижный электрод 2 изолируется от корпуса с помощью кварцевых изоляторов. Зависимость емкости преобразователя от перемещения мембраны δ имеет вид

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (3.70)$$

где ε_0 – относительная диэлектрическая постоянная;

ε – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей межэлектродный зазор, Ф/м;

S – площадь электродов, м²;

δ – расстояние между электродами, м.

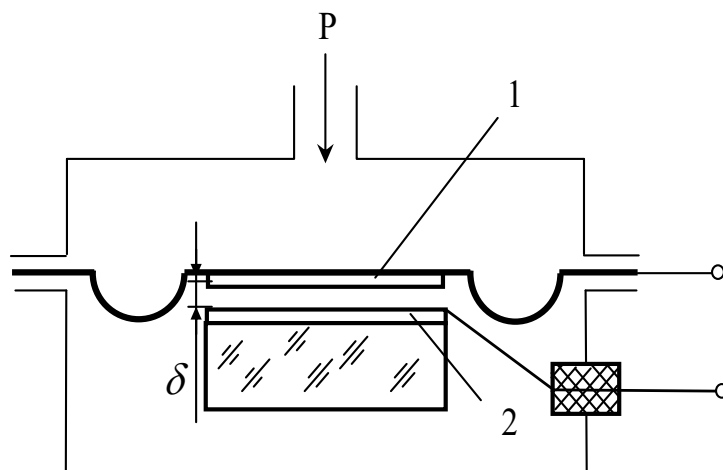


Рисунок 3.21 – Схема емкостного преобразователя для измерения давления

Входные цепи электрического преобразователя приведены в разделе 3.6.

Список литературы

- 1 **Рачков, М. Ю.** Технические измерения и приборы : учебник и практикум / М. Ю. Рачков. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 151 с.
- 2 **Рачков, М. Ю.** Физические основы измерений / М. Ю. Рачков. – М. : Юрайт, 2019. – 146 с.
- 3 **Миронов, Э. Г.** Метрология и технические измерения : учеб. пособие / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – М. : КНОРУС, 2016 – 422 с.
- 4 **Шишмарев, В. Ю.** Технические измерения и приборы: учебник / В. Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2010. – 384 с.
- 5 **Зак, Е. А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е. А. Зак. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
- 6 **Фукс-Рабинович, Л. И.** Оптико-электронные приборы / Л. И. Фукс-Рабинович, М. В. Елифанов. – Л. : Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1979. – 368 с.
- 7 **Левшина, Е. С.** Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 390 с.
- 8 **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- 9 **Березин, С. Я.** Измерительные преобразователи и электроды. Биомедицинские датчики: учебник / С. Я. Березин, В. А. Устюжанин. – М. : Юрайт, 2026. – 267 с.
- 10 Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин: учебник / под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2026. – 158 с.
- 11 **Сафиуллин, Р. К.** Основы автоматики и автоматизации процессов: учебник / Р. К. Сафиуллин. – 2-е изд. испр. и доп. – М. : Юрайт, 2026. – 146 с.