

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Институт автоматизации и информационных технологий

А.Г. Дивин, Н.А. Коньшева, М.Н. Баршутина, Г.В. Шишкина

ИЗУЧЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Утверждено Методическим советом ТГТУ в качестве
методических указаний для студентов, обучающихся по направлениям
27.03.02 «Управление качеством», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»,
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 13.03.01 «Теплоэнергетика и
теплотехника», 19.03.01 «Биотехнология»

Тамбов

2014

Рецензент
Доктор технических наук
П.С. Беляев

Утверждено Методическим советом ТГТУ
(протокол № 8 от 22.10.2014)

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ИХ ПОВЕРКА

Цель работы: Ознакомление с классификацией средств измерения давления, изучение устройства и принципа действия пружинных приборов для измерения давления, преобразователя давления Метран-100, преобразователя давления овен ПД-100, а также методикой их поверки.

Методические указания**Классификация приборов для измерения давления**

Давлением называется равномерно распределенная сила, действующая перпендикулярно на единицу площади. Оно может быть атмосферным (давление околосредней атмосферы), избыточным (превышающим атмосферное) и абсолютным (сумма атмосферного и избыточного). Абсолютное давление ниже атмосферного называется разреженным, а глубокое разрежение – вакуумным.

Единицей давления в международной системе единиц (СИ) является Паскаль (Па). Один Паскаль есть давление, создаваемое силой один Ньютон на площади один квадратный метр. Поскольку эта единица очень мала, применяют также единицы кратные ей: килопаскаль (кПа)= 10^3 Па; мегапаскаль (МПа)= 10^6 Па и др. Ввиду сложности задачи перехода от применявшихся ранее единиц давления к единице Паскаль, временно допущены к применению единицы: килограмм-сила на квадратный сантиметр ($\text{кгс}/\text{см}^2$) = 980665 Па; килограмм-сила на квадратный метр ($\text{кгс}/\text{м}^2$) или миллиметр водяного столба (мм вод. ст) = 9,80665 Па; миллиметр ртутного столба (мм рт. ст) = 133,332 Па.

Приборы контроля давления классифицируются в зависимости от метода измерения, используемого в них, а также по характеру измеряемой величины.

По методу измерения, определяющему принцип действия, эти приборы подразделяются на следующие группы:

– **жидкостные**, в которых измерение давления происходит путем уравнивания его столбом жидкости, высота которого определяет величину давления (см. рис. 1 а, б);

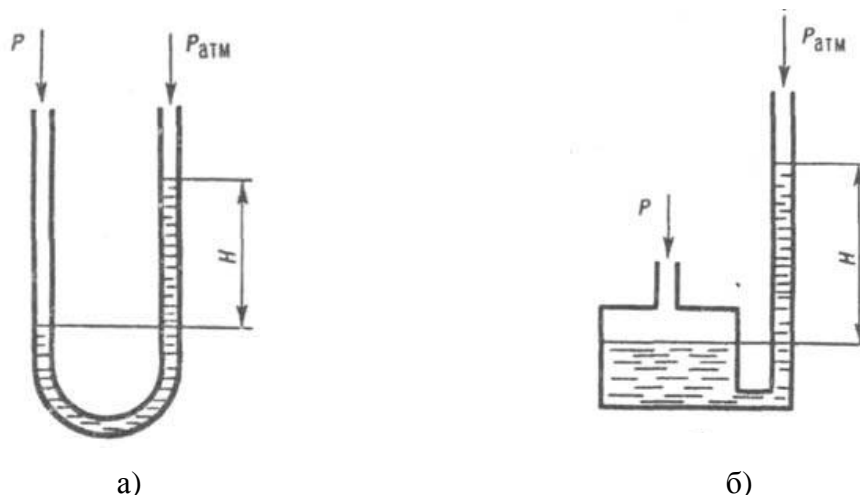


Рис. 1. Жидкостный манометр

– **пружинные** (деформационные), в которых значение давления измеряется путем определения меры деформации упругих элементов (см. рис. 2);

– **грузопоршневые**, основанные на уравнивании сил создаваемых с одной стороны измеряемым давлением, а с другой стороны калиброванными грузами действующих на поршень помещенный в цилиндр;

– **электрические**, в которых измерение давления осуществляется путем преобразования его значения в электрическую величину, и путем замера электрических свойств материала, зависящих от величины давления.

По виду измеряемого давления приборы подразделяют на следующие группы:

- **манометры**, предназначенные для измерения избыточного давления;
- **вакуумметры**, служащие для измерения разрежения (вакуума);
- **мановакуумметры**, измеряющие избыточное давление и вакуум;
- **напоромеры**, используемые для измерения малых избыточных давлений;
- **тягомеры**, применяемые для измерения малых разрежений;
- **тягонапоромеры**, предназначенные для измерения малых давлений и разрежений;
- **дифференциальные манометры** (дифманометры), с помощью которых измеряют разность давлений;
- **барометры**, используемые для измерения барометрического давления.

Наиболее часто используются пружинные или деформационные манометры. Основные виды чувствительных элементов этих приборов представлены на рис. 2.

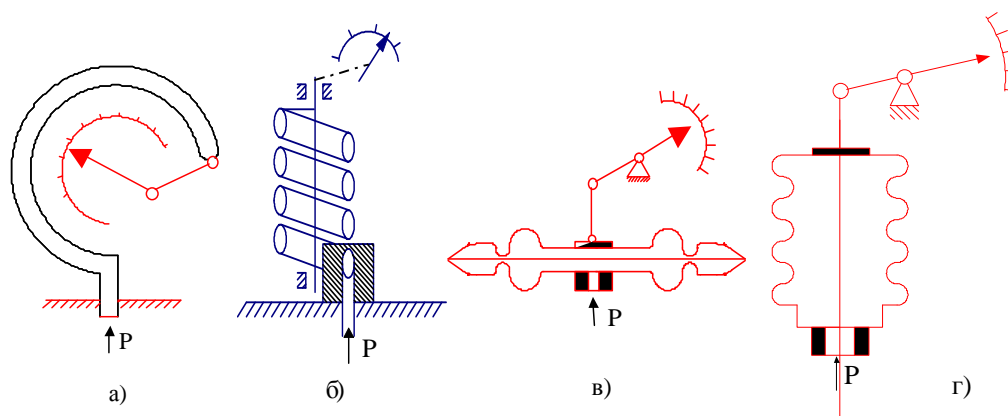


Рис. 2. Виды чувствительных элементов деформационных манометров:
 а) - с одновитковой трубчатой пружиной (трубкой Бурдона);
 б) - с многовитковой трубчатой пружиной; в) - с упругими мембранами;
 г) - сильфонные

Приборы с трубчатыми пружинами. Принцип действия этих приборов основан на свойстве изогнутой трубки (трубчатой пружины) некруглого сечения изменять свою кривизну при изменении давления внутри трубки.

В зависимости от формы пружины, различают пружины одновитковые (рис. 2а) и многовитковые (рис. 2б). Достоинством многовитковых трубчатых пружин является большее чем у одновитковых перемещение свободного конца при одинаковом изменении входного давления. Недостатком – существенные габариты приборов с такими пружинами.

Манометры с одновитковой трубчатой пружиной – один из наиболее распространенных видов пружинных приборов. Чувствительным элементом таких приборов является согнутая по дуге круга, запаянная с одного конца, трубка 1 (рис. 3) эллиптического или овального сечения. Открытым концом трубка через держатель 2 и ниппель 3 присоединяется к источнику измеряемого давления. Свободный (запаянный) конец трубки 4 через передаточный механизм соединен с осью стрелки перемещающейся по шкале прибора.

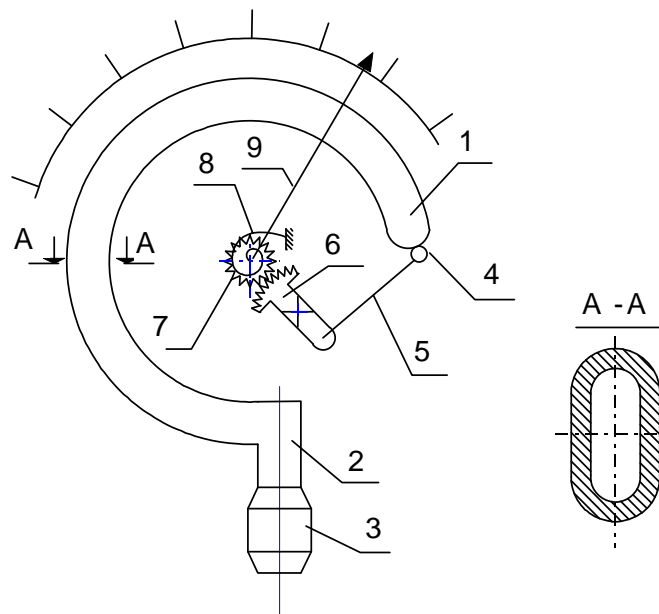


Рис. 3. Пружинный манометр

Трубки манометров, рассчитанных на давление до 50 кг/см^2 изготавливаются из меди, а трубки манометров, рассчитанных на большее давление из стали.

Свойство изогнутой трубки некруглого сечения изменять величину изгиба при изменении давления в ее полости является следствием изменения формы сечения. Под действием давления внутри трубки эллиптическое или плоскоовальное сечение, деформируясь, приближается к круглому сечению (малая ось эллипса или овала увеличивается, а большая уменьшается).

Перемещение свободного конца трубки при ее деформации в определенных пределах пропорционально измеряемому давлению. При давлениях, выходящих из указанного предела, в трубке возникают остаточные деформации, которые делают ее непригодной для измерения. Поэтому максимальное рабочее давление манометра должно быть ниже предела пропорциональности с некоторым запасом прочности.

Перемещение свободного конца трубки под действием давления весьма невелико, поэтому для увеличения точности и наглядности показаний прибора вводят передаточный механизм, увеличивающий масштаб перемещения конца трубки. Он состоит (рис. 3) из зубчатого сектора *б*, шестерни *7*, сцепляющейся с сектором, и спиральной пружины (волоска) *8*. На оси шестерни *7* закреплена указывающая стрелка манометра *9*. Пружина *8* прикреплена одним концом к оси шестерни, а другим – к неподвижной точке платы механизма. Назначение пружины – исключить люфт стрелки, выбирая зазоры в зубчатом сцеплении и шарнирных соединениях механизма.

Пружинные показывающие манометры выпускаются с верхним пределом измерения от $0,1 \text{ МПа}$ (1 кгс/см^2) до 103 МПа (104 кгс/см^2) в соответствии со стандартным рядом. Пружинные вакуумметры имеют диапазон измерения – $0,1 \dots 0 \text{ МПа}$, а мановакуумметры при нижнем пределе измерения – $0,1 \text{ МПа}$ имеют верхний предел измерения по избыточному давлению от $0,1$ до $2,4 \text{ МПа}$. Эталонные пружинные манометры имеют класс точности $0,15$; $0,25$ и $0,4$; рабочие $1,5$; $2,5$; 4 , рабочие повышенной точности $0,6$ и 1 .

Для сигнализации предельных отклонений давления в цепях защиты и позиционного регулирования широко применяются **электроконтактные манометры**. Схема манометра типа ЭКМ представлена на рис. 4. В показывающий манометр дополнительно введены две стрелки *2*, *3*, к которым упругими токоподводами поджаты электрические контакты *4*.

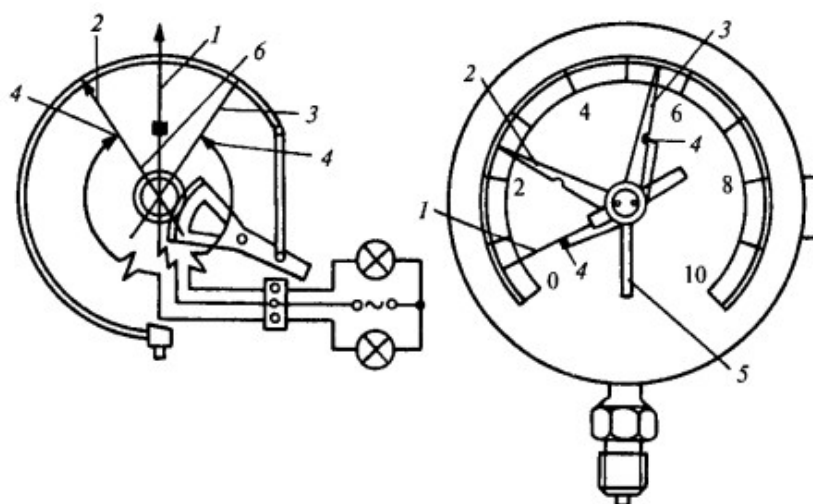


Рис. 4. Электроконтактный манометр: 1 – показывающая стрелка; 2, 3 – дополнительные стрелки; 4 – электрические контакты; 5 – поводок; 6 – электрический контакт

Стрелки 2, 3 с помощью торцевого ключа и поводка 5 устанавливаются против значений сигнализируемого давления. Показывающая стрелка 1 также снабжена электрическим контактом 6. Если давление находится в пределах рабочего диапазона, то электрические цепи сигнализации разомкнуты. При достижении показывающей стрелкой любой из контактов замыкается электрическая цепь, вызывая срабатывание сигнализации. Электрические контакты остаются замкнутыми при нахождении показывающей стрелки за пределами рабочего диапазона давления, поскольку стрелки 2, 3 ограничивают смещение контактов внутрь рабочего диапазона, а вне его контакты увлекаются показывающей стрелкой 1. Класс манометров и вакуумметров 1, 5; пределы измерения соответствуют стандартному ряду.

Мембранные манометры. Чувствительным элементом мембранных манометров может быть жесткая (упругая) или вялая мембрана.

Упругие мембраны представляют собой медные или латунные диски с гофрами. Гофры увеличивают жесткость мембраны и ее способность к деформации. Из таких мембран изготавливают мембранные коробки (см. рис. 2в), а из коробок – блоки.

Вялые мембраны изготавливают из резины на тканевой основе в виде одногофровых дисков. Используются они для измерения небольших избыточных давлений и разрежений.

Мембранные манометры могут быть с местными показаниями, с электрической или пневматической передачей показаний на вторичные приборы.

Для примера рассмотрим дифманометр мембранный типа ДМ, который представляет собой бесшкальный датчик (рис. 5) с дифференциально-трансформаторной системой передачи значения измеряемой величины на вторичный прибор типа КСД.

Чувствительным элементом дифманометра является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок 1 и 3, заполненных кремнийорганической жидкостью, находящихся в двух отдельных камерах, разделенных перегородкой 2.

К центру верхней мембраны прикреплен железный сердечник 4 дифференциально-трансформаторного преобразователя 5.

В нижнюю камеру подается большее (плюсовое) измеряемое давление, в верхнюю – меньшее (минусовое) давление. Сила измеряемого перепада давления уравнивается за счет других сил, возникающих при деформации мембранных коробок 1 и 3.

При увеличении перепада давления мембранная коробка 3 сжимается, жидкость из нее перетекает в коробку 1, которая расширяется и перемещает сердечник 4 дифференциально-трансформаторного преобразователя. При уменьшении перепада давления сжимается мембранная коробка 1 и жидкость из нее вытесняется в коробку 3. Сердечник 4

при этом перемещается вниз. Таким образом, положение сердечника, т. е. выходное напряжение дифференциально-трансформаторной схемы однозначно зависит от значения перепада давления.

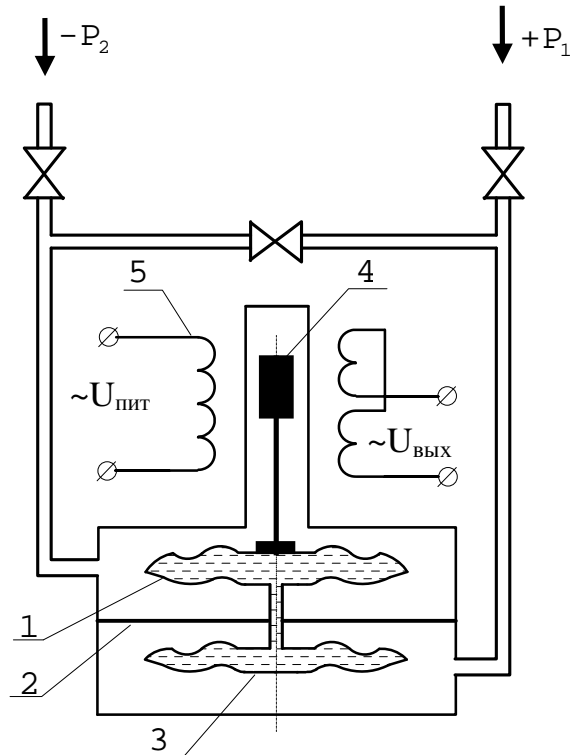


Рис. 5. Устройство мембранного дифманометра типа ДМ

Чувствительным элементом **сильфонных манометров и дифманометров** являются сильфоны – гармониковые мембраны (металлические гофрированные трубки). Измеряемое давление вызывает упругую деформацию сильфона. Мерой давления может быть либо перемещение свободного торца сильфона, либо сила, возникающая при деформации.

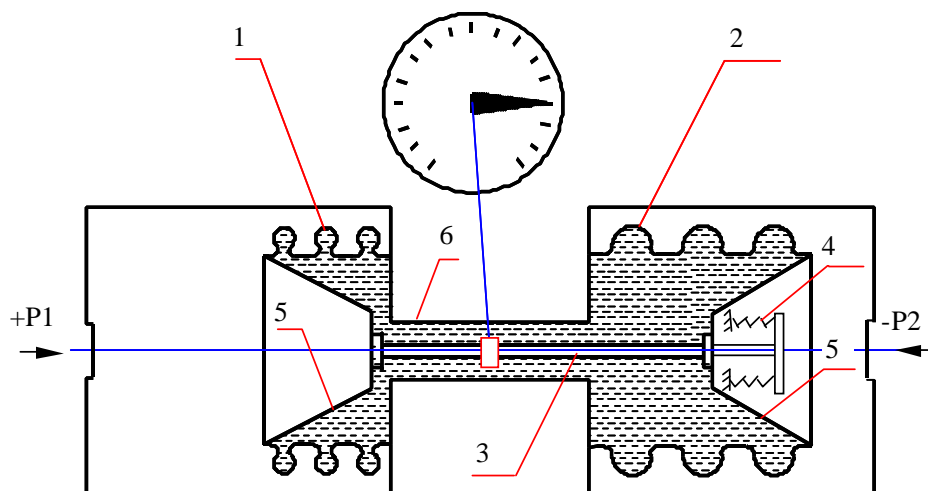


Рис. 6. Принципиальная схема сильфонного дифманометра

Принципиальная схема сильфонного дифманометра типа ДС приведена на рис. 6. Чувствительным элементом такого прибора являются один или два сильфона. Сильфоны 1 и 2 одним концом закреплены на неподвижном основании, а другим соединены через подвижный шток 3. Внутренние полости сильфонов заполнены жидкостью

(водоглицериновой смесью, кремнийорганической жидкостью) и соединены друг с другом. При изменении перепада давления один из сильфонов сжимается, перегоняя жидкость в другой сильфон и перемещая шток сильфонного блока. Перемещение штока преобразуется в перемещение пера, стрелки, лекала интегратора или сигнал дистанционной передачи, пропорциональный измеряемому перепаду давления.

Номинальный перепад давления определяет блок винтовых цилиндрических пружин 4.

При перепадах давления выше номинального стаканы 5 перекрывают канал 6, прекращая переток жидкости и предупреждая таким образом сильфоны от разрушения.

Для работы в системах контроля, регулирования и управления технологическими процессами путем непрерывного преобразования давления среды в стандартный токовый выходной сигнал с передачей его на вторичные приборы или исполнительные механизмы используются датчики-преобразователи серии Метран-100, ОВЕН П-100.

Интеллектуальные датчики давления серии Метран-100 предназначены для измерения и непрерывного преобразования в унифицированный аналоговый токовый сигнал и/или цифровой сигнал в стандарте протокола HART, или цифровой сигнал на базе интерфейса RS485 следующих входных величин:

- избыточного давления (Метран-100-ДИ);
- абсолютного давления (Метран-100-ДА);
- разрежения (Метран-100-ДВ);
- давления-разрежения (Метран-100-ДИВ);
- разности давлений (Метран-100-ДЦ);
- гидростатического давления (Метран-100-ДГ).

Принцип действия датчиков основан на использовании тензоэффекта, суть которого состоит в изменении сопротивления тензорезисторов при их деформации. Чувствительный элемент воспринимает изменения давления и преобразует их в деформацию тензорезисторов, что приводит к изменению его сопротивления.

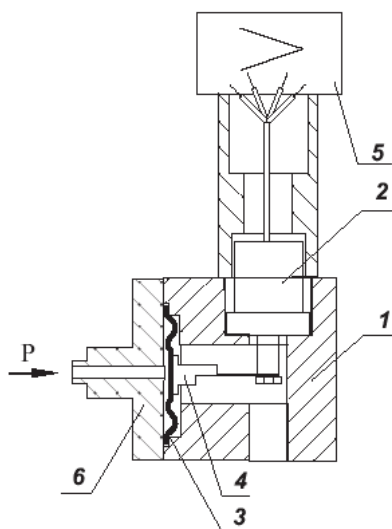


Рис. 7. МЕТРАН-100-ДИ-1131

Конструкция датчика модели 1131 представлена на рис. 7. Сенсорный блок датчика состоит из корпуса 1, рычажного тензопреобразователя 2, измерительной мембраны 3, жесткого центра со штоком 4, электронного преобразователя 5, штуцера 6.

В датчике модели 1131 измеряемое избыточное давление P воздействует на мембрану 3 и преобразуется в усилие на жестком центре, которое через шток 4 передается на рычаг тензопреобразователя 2. Перемещение конца рычага вызывает деформацию измерительной

мембраны тензопреобразователя. На измерительной мембране размещены тензорезисторы. Тензорезисторы соединены в мостовую схему. Деформация измерительной мембраны вызывает изменение сопротивления тензорезисторов и разбаланс мостовой схемы. Электрический сигнал, образующийся при разбалансе мостовой схемы, подается в электронный преобразователь 5. Электронный преобразователь преобразует электрический сигнал от тензопреобразователя в стандартный токовый выходной сигнал.

ОВЕН П-100 (см. рис. 8) – линейка микропроцессорных датчиков давления, предназначенных для непрерывного преобразования давления измеряемой среды (избыточного, избыточного вакуумметрического, гидростатического или дифференциального) в унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА.



Рис. 8. Преобразователь давления ОВЕН100-ДИ

Датчики рекомендуются для применения в системах автоматического регулирования и управления технологическими процессами в различных областях промышленности, жилищно-коммунального хозяйства, на тепловых пунктах, компрессорных и насосных станциях, водонапорных башнях и др.

Рекомендуемая рабочая среда для датчиков – жидкости, пар, газы, парогазовые и газовые смеси при давлении, не превышающем верхний предел измерения датчика и не агрессивные к материалу измерительной мембраны.

Ограничения, накладываемые на среды:

- материалы преобразователя, контактирующие со средой, должны сохранять коррозионностойкость;
- рабочая среда не должна кристаллизоваться или затвердевать в приемнике давления;
- диапазон температуры измеряемой среды – от минус 40 до +100 °С.

Принцип преобразования давления в датчиках – тензометрический, то есть чувствительные элементы реагируют на изменения тензорезисторов, расположенных на мембране, деформирующейся под действием давления.

Техническое обслуживание преобразователя давления ОВЕН100

В процессе эксплуатации следует регулярно проверять герметичность соединения преобразователя с линией подвода давления, надежность электрического соединения, а также сопротивление линии связи с нагрузкой.

Основные технические характеристики преобразователей:

- верхний предел измерения от 0,0001 до 25 МПа;
- выходной сигнал постоянного тока от 4 до 20 мА;
- диапазон сопротивления внешней нагрузки от 0 до 1200 Ом;
- диапазон постоянного напряжения питания от 12 до 36 В;
- пределы основной приведенной погрешности от диапазона измерения $\pm 0,25$ %; $\pm 0,5$ %; $\pm 1,0$ %;
- потребляемая мощность не более 1,0 Вт;

- средняя наработка на отказ не менее 8 ч;
- габаритные размеры в упаковке (Ш × В × Г) не более 160 × 80 × 80 мм;
- масса преобразователя не более 0,2 кг.

Условия эксплуатации преобразователя:

- закрытые взрывобезопасные помещения без агрессивных паров и газов;
- температура окружающего воздуха – от минус 40 до +80 °С;
- относительная влажность воздуха (при температуре воздуха +35 °С) не более 80 %;
- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа.

Подключение преобразователя давления ОВЕН100

Преобразователь подключается в соответствии с приведенной на рис. 9 схемой и учетом требований к сопротивлению нагрузки.

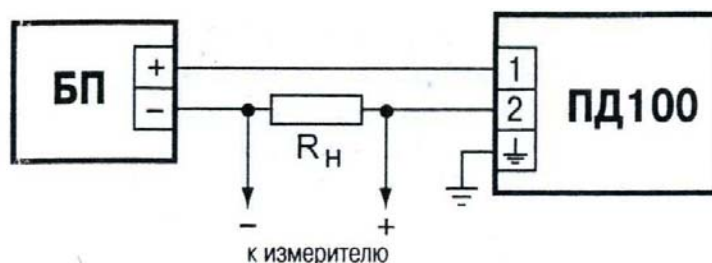


Рис. 9. Схема подключения преобразователя

Сопротивление нагрузки выбирается в пределах от 0 до 1200 Ом и определяется напряжением питания преобразователя.

Проверка средств измерений

Для получения достоверной информации о величине какого-либо параметра необходимо точно знать погрешность измерительного устройства. Определение основной погрешности прибора в различных точках шкалы через определенные промежутки времени производят путем его поверки, т. е. сравнивают показания поверяемого прибора с показаниями более точного, эталонного прибора. Как правило, поверка приборов осуществляется сначала при возрастающем значении измеряемой величины (прямой ход), а затем при убывающем значении (обратный ход).

Манометры поверяют следующими тремя способами: поверка нулевой точки, рабочей точки и полная поверка. При этом две первые поверки производятся непосредственно на рабочем месте с помощью трехходового крана (рис.10).

Рабочая точка поверяется путем присоединения контрольного манометра к рабочему манометру и сравнение их показаний.

Полная поверка манометров осуществляется в лаборатории на поверочном прессе или поршневом манометре, после снятия манометра с рабочего места.

Принцип действия грузопоршневой установки для поверки манометров основан на уравнивании сил, создаваемых с одной стороны измеряемым давлением, а с другой – грузами, действующими на поршень, помещенный в цилиндр.

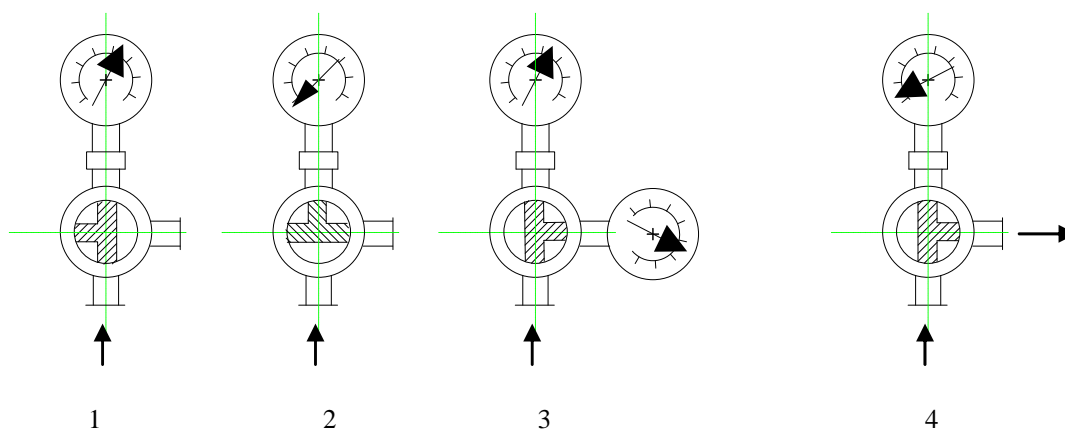


Рис.10. Схемы поверки нулевой и рабочей точек манометра с помощью трехходового крана

Положения трехходового крана: 1 – рабочее; 2 – поверка нулевой точки; 3 – поверка рабочей точки; 4 – продувка импульсной линии

Поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

В России поверочная деятельность в отношении попадающих под Государственный метрологический надзор средств измерения регламентирована Законом Правительства Российской Федерации от 26 июня 2008 года N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» и многими другими подзаконными актами. Этими документами поверка определяется как *«совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям»* и далее *«Правительством Российской Федерации устанавливается перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии»*.

Поверка средств измерений осуществляется физическим лицом, аттестованным в качестве поверителя в порядке устанавливаемом Ростехрегулированием.

Виды поверок:

- Первичная поверка – поверка, выполняемая до ввода в эксплуатацию средства измерений или после ремонта, а также при ввозе средства измерений из-за границы, при продаже.
- Периодическая поверка – поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межповерочные интервалы времени.
- Внеочередная поверка – поверка средства измерений, проводимая до наступления срока его очередной периодической поверки.
- Инспекционная поверка – поверка, проводимая органом государственной метрологической службы при проведении государственного надзора за состоянием и применением средств измерений.
- Экспертная поверка – проводится при возникновении разногласий по вопросам, относящимся к метрологическим характеристикам, исправности средств измерений и пригодности их к применению.

Классом точности средства измерения называют его обобщенную характеристику, определяемую пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также

другими свойствами средств измерения, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды приборов.

Нормальными считаются такие условия, при которых изменением метрологических характеристик под воздействием влияющих величин принято пренебрегать. Так, для многих типов средств измерений нормальными условиями являются: температура (293 ± 2) К; атмосферное давление (100 ± 4) кПа; относительная влажность (65 ± 15) %; электрическое напряжение в сети питания (220 ± 22) В. Погрешности средств измерений в таких условиях называются **основные**.

Рабочие условия, как правило, отличаются от нормальных более широкими диапазонами изменения влияющих величин. При отклонении условий работы средств измерения от нормальных возникают **дополнительные** погрешности.

Проверка средств измерений (приборов) включает в себя *следующие операции*:

I. Определение исправности прибора и наличия комплектующих.

Для этого проводят внешний осмотр прибора, проверяют наличие паспорта, технической документации, комплектующих изделий, проверяют наличие маркировки и табличек (шильдиков) с указанием марки прибора, года изготовления, завода-изготовителя, заводского номера прибора и т.д. Проверяют отсутствие внешних повреждений, отсутствие подтеков масла и т.п. При наличии хотя бы одного из перечисленных недостатков прибор считается не прошедшим проверку.

II. После предварительного осмотра прибор подвергают собственно проверке. Целью операции проверки является проверка соответствия прибора его классу точности.

Проверка может выполняться **2 способами**:

1. На поверяемую отметку шкалы устанавливают стрелку поверяемого прибора, а отсчет показаний производят по шкале рабочего эталона.

2. На поверяемую отметку шкалы устанавливают стрелку рабочего эталона, а отсчет показаний производят по шкалам поверяемых приборов. Этим способом можно поверить сразу несколько приборов. Таким образом, этот способ более производительный, но менее точный.

Прибор *прошел проверку*, если:

- его основная приведенная погрешность не превышает класс точности;
- приведенная вариация показаний не превышает $\frac{1}{2}$ класса точности для приборов, к.т. которых больше, чем 0,25;
- приведенная вариация показаний не превышает 0,2% для приборов, к.т. которых 0,25 и меньше.

Погрешности средств измерений

По способу выражения различают абсолютные, относительные и приведенные погрешности.

Абсолютная погрешность Δx выражается в единицах измеряемой величины x и равна разности между измеренным и истинным значениями (т.к. истинное значение практически всегда бывает неизвестно, то вместо него может использоваться действительное значение)

$$\Delta x = x - x_{И} \approx x - x_{Д}.$$

Абсолютная погрешность не может в полной мере служить показателем точности измерений, так как одно и то же ее значение, например, $\Delta x = 0,5$ мм при $x = 100$ мм соответствует достаточно высокой точности измерений, а при $x = 1$ мм – низкой. Поэтому и вводится понятие относительной погрешности.

Относительная погрешность δx представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному (действительному, измеренному) значению и часто выражается в процентах

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x_{И}} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta x}{x_{Д}} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% .$$

Эти формулы справедливы при условии, что $\Delta x \ll x, x_{Д}, x_{И}$.

Эта наглядная характеристика точности результата измерения не годится для нормирования погрешности средства измерения, так как, при изменении значений $x_{И}$, принимает различные значения вплоть до бесконечности при $x_{И} = 0$. В связи с этим для указания и нормирования погрешностей средств измерений используется еще одна разновидность погрешности – приведенная.

Приведенная погрешность γx представляет собой отношение абсолютной погрешности средства измерения к так называемому нормирующему значению x_N (постоянному во всем диапазоне измерений или его части), обычно выражается в процентах

$$\gamma x = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100\% .$$

Нормирующее значение x_N определяется различным образом в зависимости от шкалы прибора.

Для приборов, шкала которых содержит нулевую отметку, в качестве нормирующего значения принимают размах шкалы прибора.

$$x_N = |x_{\max} - x_{\min}| .$$

Например, если прибор имеет шкалу от 0 до 1000 единиц, то $x_N = |1000 - 0| = 1000$ ед.; если прибор имеет шкалу от -30 до 70 единиц, то $x_N = |70 - (-30)| = 100$ ед.

Для приборов, шкала которых не имеет нулевой отметки, в качестве нормирующего значения принимают максимальное по абсолютной величине значение шкалы.

$$x_N = |x|_{\max} .$$

Например, если прибор имеет шкалу от 900 до 1000 единиц, то $x_N = 1000$ ед.; если прибор имеет шкалу от -300 до -200 единиц, то $x_N = 300$ ед.

Понятие о вариации показаний приборов

Абсолютная вариация показаний прибора ε – разность между показаниями прибора при многократных повторных измерениях одной и той же физической величины.

На практике вариацию показаний прибора определяют как разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к ней сначала со стороны меньших, а затем со стороны больших значений измеряемой величины

$$\varepsilon = |x_{\text{прямого хода}} - x_{\text{обратного хода}}| .$$

Значения $x_{\text{прямого хода}}$ получают при увеличении измеряемого параметра, значения $x_{\text{обратного хода}}$ – при уменьшении измеряемого параметра.

Абсолютная вариация показаний прибора обусловлена наличием эффектов гистерезиса, является частью абсолютной погрешности прибора.

Относительная вариация показаний прибора $\delta \varepsilon$ – отношение абсолютной вариации к истинному (действительному, измеренному) значению измеряемой величины, обычно выражается в процентах

$$\delta \varepsilon = \frac{\varepsilon}{x_{И}} \cdot 100\% \approx \frac{\varepsilon}{x_{Д}} \cdot 100\% \approx \frac{\varepsilon}{x} \cdot 100\% .$$

Приведенная вариация показания прибора $\gamma\varepsilon$ – отношение абсолютной вариации к нормирующему значению, обычно выражается в процентах

$$\gamma\varepsilon = \frac{\varepsilon}{x_N} \cdot 100\% .$$

Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы следует изучить:

1. Классификации средств измерения давления.
2. Устройство и принцип действия средств измерения давления.
3. Изучить метрологические характеристики средств измерений, ознакомиться с понятиями: поверка, класс точности прибора, абсолютная погрешность, приведенная погрешность, вариация прибора, основная погрешность, дополнительная погрешность.
4. Подготовить отчет о проделанной работе: схема лабораторной установки, протоколы поверки.

В ходе лабораторной работы необходимо выполнить поверку преобразователя давления ОВЕН ПД-100 (в комплекте с измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ 138) и пружинного манометра МТП-100.

Установка для поверки средств измерения давления состоит из колонки 8 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 5 винтового пресса (см. рис. 11). Масло в колонку поступает из воронки 3 при открытом вентиле 10.

При закрытом вентиле 10 с помощью винта 6 и поршня 5 в системе создается давление, которое через вентили 4 поступает на поверяемый и образцовые манометры. Вентиль 9 служит для слива масла.

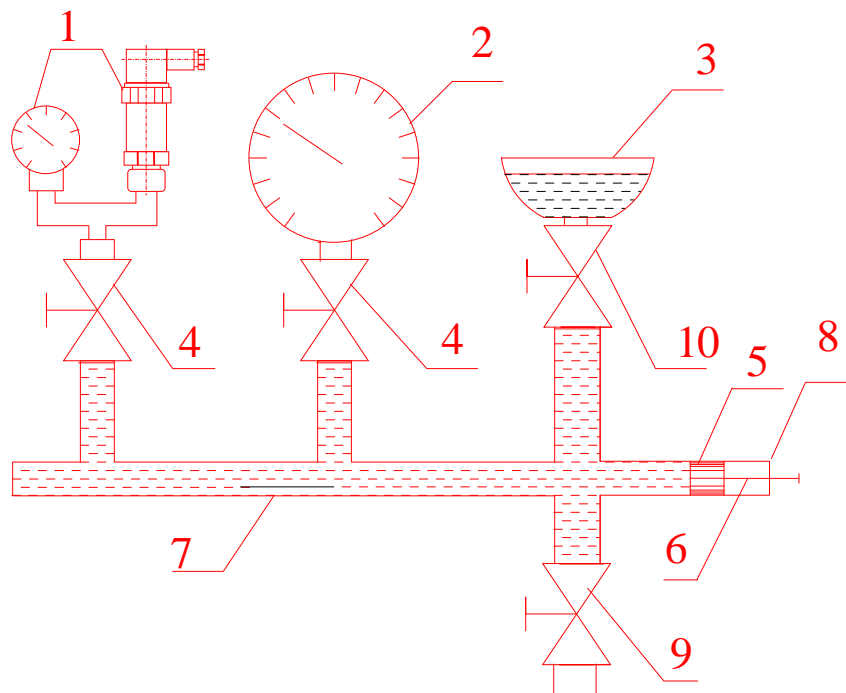


Рис. 11. Схема экспериментальной установки:

1 – поверяемый прибор; 2 – эталон; 3 – воронка; 4, 9, 10 – вентили; 5 – поршень; 6 – винт; 7 – канал; 8 – колонка

В экспериментальную установку для воспроизведения давления в качестве вторичного показывающего прибора к датчику-преобразователю давления ОВЕН ПД-100 (с классом точности 1,0) подключается измеритель-регулятор давления и температуры ОВЕН ТРМ 138 (с классом точности 0,5).

Поверка системы измерения давления ОВЕН ПД100-ДИ и ТРМ 138 производится в следующем порядке:

1. установить давление на шкале эталонного средства измерения;
2. отсчет показаний произвести по измерителю-регулятору давления и температуры ОВЕН ТРМ 138;
3. измерения провести при прямом ходе от 0 дел. до 50 дел. эталонного средства.

Протокол поверки

Система измерения давления ОВЕН ПД100-ДИ и ТРМ 138
 № _____, класса точности _____, с пределами измерения
 от $x^* =$ _____ до $x_* =$ _____ прошла поверку и признана
 _____.

№ п/п	Поверяемая отметка шкалы (по эталону)	Показания ТРМ 138, МПа	Погрешность	
			Абс., МПа	Привед., %
1				
2				
3				
4				
...				
n				

Результаты поверки:

1. Величина абсолютной погрешности: _____.
2. Величина приведенной погрешности: _____.
3. Рассчитанное значение класса точности: _____.
4. Обоснованное применение алгоритма поверки: _____.

Дата поверки

Подпись поверяющего

Поверка пружинного манометра МТП-100 с помощью эталона производится в следующем порядке. Перекрыть вентиль 10 (см. рис. 11) и вращением винта создать давление в системе, соответствующее каждой из поверяемых точек. В каждой поверяемой точке отсчет производится 2 раза: непосредственно после создания давления (прямой ход), и при разгрузке (обратный ход). После проведения поверки производится обработка данных и делается обоснованное заключение о годности прибора к эксплуатации в соответствии с алгоритмом поверки средств измерения.

Протокол поверки

Пружинный манометр МТП-100 № _____, класса точности _____, с пределами измерения от $x^* =$ _____ до $x_* =$ _____ и ценой деления шкалы _____ прошел поверку и признан _____.

№ п/п	Поверяемая отметка шкалы прибора МТП-100, кгс/см ²	Показания эталона		Погрешность		Вариация	
		Прямой ход	Обратн. ход	Абс.	Привед., %	Абс.	Привед., %
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Результаты поверки:

1. Величина абсолютной погрешности: _____.
2. Величина приведенной погрешности: _____.
3. Рассчитанное значение класса точности: _____.
5. Рассчитанное значение вариации прибора: _____.
6. Обоснованное применение алгоритма поверки: _____.

Дата поверки

Подпись поверяющего

Контрольные вопросы

1. Дайте определение физической величины «давление».
2. В каких единицах измеряется давление?
3. Классификация средств измерения давления в зависимости от измеряемого давления.
4. Какие существуют способы измерения давления?
5. Перечислите и опишите виды чувствительных элементов деформационных манометров.
6. Поясните устройство и принцип действия пружинного манометра.
7. Каково назначение волоска в передаточном механизме манометра с трубчатой пружиной?
8. Поясните устройство мембранного дифманометра типа ДМ.
9. Поясните устройство сильфонного дифманометра.
10. Перечислите и опишите электрические средства измерения давления.
11. Объясните устройство и принцип действия преобразователя избыточного давления типа Метран-100.
12. Преобразователь давления ОВЕН100-ДИ. Принцип действия. Основные технические характеристики. Условия эксплуатации.
13. Поверка средств измерений. Виды поверок.
14. Классификация погрешностей в зависимости от выражения погрешности.
15. Поясните причины возникновения вариации показаний прибора при измерении.
16. Какие существуют способы поверки манометров?
17. В чем заключается поверка пружинных манометров на рабочем месте?
18. Почему постукивание по корпусу прибора повышает точность поверки?
19. Какие причины вызывают появление дополнительной погрешности?
20. Поясните порядок выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ, УСТРОЙСТВА И ИСПЫТАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Цель работы: Изучить принцип действия, устройство и область применения датчиков механических усилий и деформаций: угольных, тензорезисторных, пьезоэлектрических и магнитоупругих. Изучить устройство лабораторной установки. Экспериментально определить статическую характеристику тензовесов, используемых в лабораторной установке.

Методические указания

1. Принцип действия и устройство угольных датчиков механических усилий.

Угольные датчики основаны на принципе изменения собственного электрического сопротивления под действием приложенных сил.

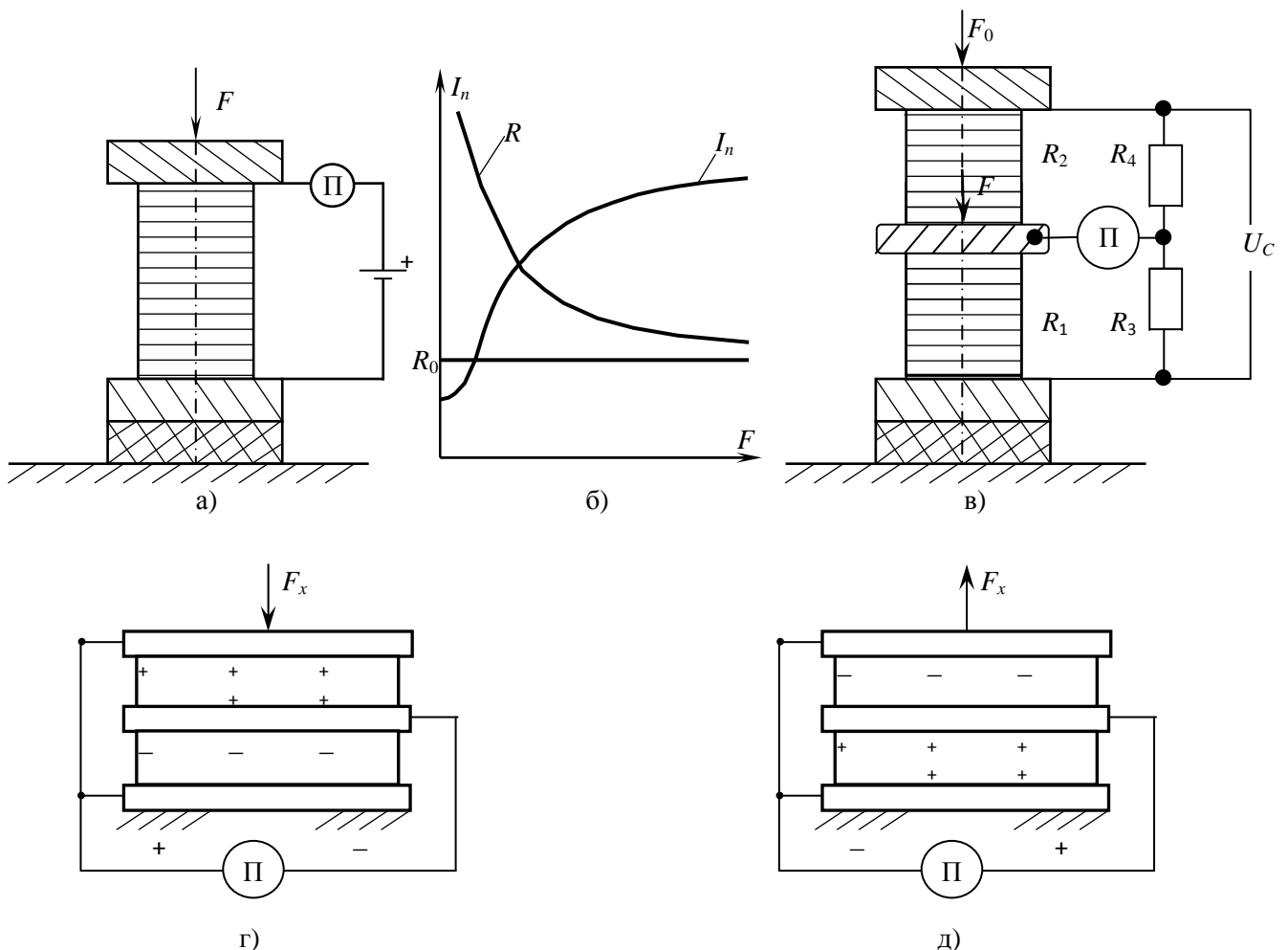


Рис. 1. Угольные и пьезоэлектрические датчики:

- а – простейший угольный датчик; б – статическая характеристика угольного датчика;
в – дифференциальный угольный датчик; г, д – пьезоэлектрические датчики.

Простейший датчик этого типа (рис. 1а) представляет собой угольный столб, набранный из графитовых дисков, которые расположены между контактными шайбами. Электрическое сопротивление угольного столба складывается из относительно небольшого собственного сопротивления дисков и основного сопротивления перехода между дисками,

которое в значительной степени зависит от того, насколько плотно прилегают диски друг к другу, то есть от усилия сжатия, действующего на диски.

На рисунке 1б показаны кривые изменения сопротивления R (Ом) и выходного тока I_n (А) датчика в зависимости от усилия сжатия F . Сопротивление угольного датчика

$$R = R_0 + \frac{a}{F},$$

а ток во вторичном приборе

$$I_n = \frac{U_c}{R_n + R_0 + \frac{a}{F}},$$

где R_0 – постоянная величина, равная сопротивлению столба при $F \rightarrow \infty$, Ом, a – постоянный коэффициент, Ом·Н.

Чувствительность угольного датчика (Ом/Н):

$$K_d = \frac{dR}{dF} = -\frac{a}{F^2}.$$

Для повышения чувствительности таких датчиков применяют мостовые схемы включения угольных столбов (рис. 1в). Входное усилие F вызывает в одном плече моста уменьшение сопротивления R_1 в результате сжатия, а во втором – увеличение R_2 . Такие датчики называют дифференциальными. Чтобы рабочая точка находилась на характеристике, близкой к линейной части, на угольный столб постоянно действует некоторое усилие сжатия F_0 .

Достоинство угольных датчиков – высокая чувствительность. Основные недостатки угольных датчиков: нестабильность сопротивления, наличие гистерезиса и нелинейность характеристики. Наибольшая нелинейность статической характеристики простейшего угольного датчика соответствует области малых усилий. У дифференциального датчика характеристика близка к нелинейной.

2. Принцип действия и устройство пьезоэлектрических датчиков динамических усилий, вибраций, толчков

Ряд керамических диэлектриков обладает так называемым пьезоэффектом, на основе которого изготавливают пьезоэлектрические первичные преобразователи и датчики. Они состоят из набора пластин из материала, обладающего пьезоэффектом (например, из кварца), и применяются для измерения динамических сил, моментов, вибраций, толчков и т.п.

В момент приложения механической силы F_x на поверхности появляются электрические заряды (рис. 1г, д). Суммарный заряд пропорционален значению действующей силы, а его знак показывает направление этой силы (сжатие (рис. 1г) или растяжение (рис. 1д)). Напряженность зарядов электрического поля измеряют специальными электронными устройствами.

Таким образом, напряжение U на обкладках датчика пропорционально значению действующей силы F_x :

$$U = \frac{a_0 \cdot F_x}{C},$$

где a_0 – коэффициент пропорциональности, называемый пьезомодулем; C – суммарная емкость датчика и соединительных проводов.

Чувствительность (В/Н) рассматриваемого датчика

$$K_{\sigma} = \frac{dU}{dF_x} = \frac{a_0}{C}.$$

Для повышения чувствительности датчика пластины соединяют последовательно, увеличивая таким образом суммарное напряжение.

Недостатки пьезоэлектрических датчиков (необходимость в применении усилителей, хрупкость пьезоматериала, возможность измерения только динамических сил) ограничивают сферу их применения.

3. Принцип действия и устройство магнитоупругих датчиков механических усилий и деформаций

Магнитоупругие первичные преобразователи применяют для измерения механических усилий, малых деформаций и обнаружения начала пластических деформаций. Действие их основано на зависимости магнитных характеристик ферромагнитных (магнитострикционных) материалов от механического напряжения в материале. Изменение магнитных характеристик материала магнитопровода вызывает изменение индуктивности или взаимной индуктивности обмоток датчика, жестко укрепленного на исследуемой детали (рис. 2). Под действием механических сил, не превосходящих предела упругости, у ферромагнитных материалов происходит изменение крутизны петли измерения (рис. 2).

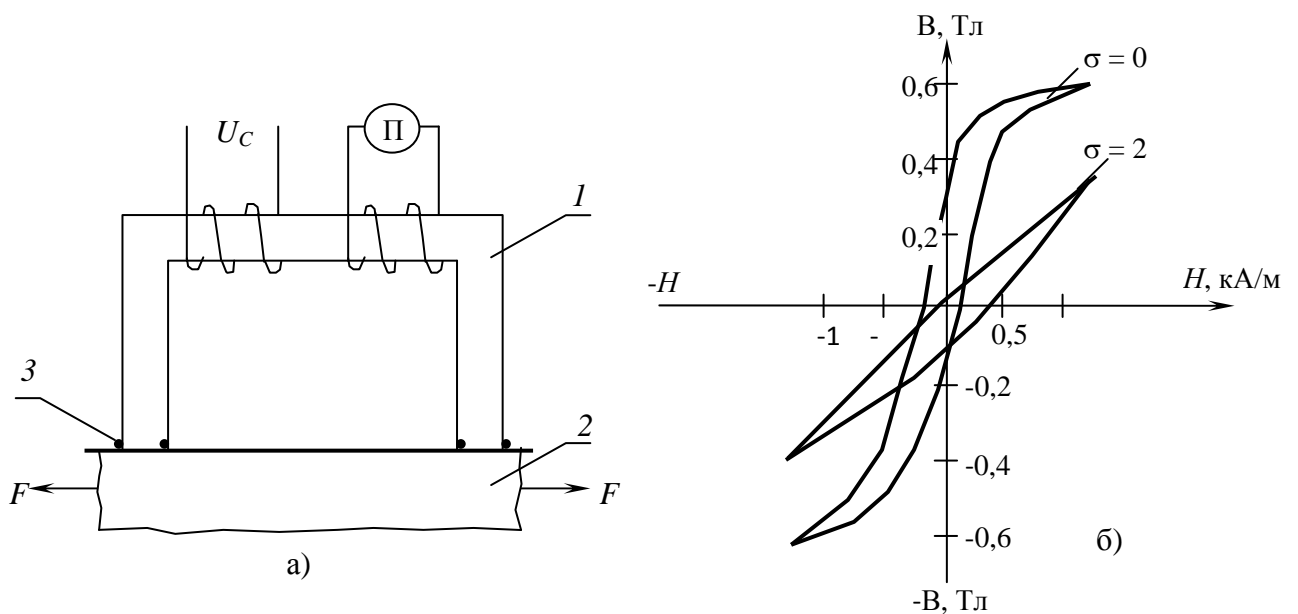


Рис. 2. Магнитоупругий датчик:

а) – размещение датчика на детали;

б) – статическая характеристика магнитоупругого материала;

1 – магнитопровод; 2 – исследуемая деталь; 3 – слой клея или припоя;

F – механическая сила; σ – растягивающее напряжение;

H – напряженность магнитного поля;

Существенные недостатки магнитоупругих первичных преобразователей (необходимость индивидуальной калибровки и необратимые изменения магнитных свойств материала) ограничивают область применения.

4. Принцип действия и устройство тензорезисторов

Тензорезисторный преобразователь (тензорезистор) наиболее часто применяется для измерения малых деформаций. Он представляет собой проводник (или полупроводник), изменяющий свое сопротивление при деформации сжатия – растяжения. При деформации проводника изменяются его длина l и площадь поперечного сечения S . Деформация кристаллической решетки материала тензорезистора приводит также к изменению его удельного сопротивления ρ . Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Этим свойством обладают в большей или меньшей степени все проводники.

Важнейшей характеристикой тензорезистора является коэффициент тензочувствительности, который вычисляется по формуле

$$S_T = \frac{\delta_R}{\delta_l} = 1 + 2\mu + m,$$

где $\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$ – относительное изменение сопротивления тензорезистора при деформации;

$\delta_l = \frac{\Delta l}{l}$ – относительная деформация тензорезистора;

μ – коэффициент Пуассона;

m – относительное изменение удельного сопротивления, вызванное действием относительной деформации, равной единице.

Основным требованием к материалу тензопреобразователей является возможно большее значение коэффициента относительной чувствительности S_T . Это объясняется тем, что относительное изменение сопротивления δ_R у большинства тензорезисторов мало, не превышает $(5...7) \cdot 10^{-3}$. Нагрев преобразователя может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением, поэтому другое требование – возможно меньшее значение температурного коэффициента сопротивления материала. Это определяет температурную погрешность преобразователя. Третье требование – высокое удельное сопротивление материала, из которого изготавливается преобразователь, что необходимо для уменьшения его габаритных размеров. Для изготовления тензорезисторов часто применяют следующие материалы: константан, нихром, манганин, никель, хромель, висмут, титаноалюминиевый сплав и полупроводниковые материалы (соединения германия, кремния и т.д.). Наилучшим отечественным материалом для изготовления проводниковых тензорезисторов, используемых при температурах ниже 180°C , является константан.

Тензочувствительность константана лежит в пределах $2,0 - 2,1$, а нелинейность функции преобразования не превышает 1 %.

В настоящее время наиболее широко применяют проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые тензорезисторы.

Проволочный тензорезистор имеет устройство, показанное на рис. 3. Его решетка выполнена из зигзагообразно уложенной проволоки l диаметром $20 - 50$ мкм размещенной

на бумажной или пленочной основе 2. Для предохранения от разрыва при деформации, проволока имеет петли 4.

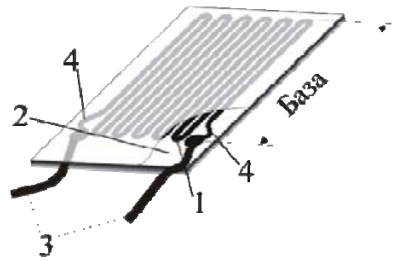


Рис. 3. Устройство проволочного тензорезистора.

Подключение в измерительную схему осуществляется при помощи медных проводников 3 большего сечения, присоединенных к концам проволоки сваркой или пайкой. Для защиты от агрессивного воздействия окружающей среды константановая проволока покрывается или лаком или заклеивается бумагой.

Такой преобразователь приклеивается к испытуемой детали так, что он воспринимает деформацию поверхностного слоя испытуемой детали, вследствие чего изменяется сопротивление проволоки. Таким образом, естественной входной величиной является деформация поверхностного слоя испытуемой детали, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации. Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом.

По метрологическим и эксплуатационным характеристикам проволочные преобразователи уступают фольговому.

Фольговые тензорезисторы представляют собой тонкую лаковую пленку, на которую нанесена фольговая тензочувствительная решетка из константана толщиной 4 – 12 мкм. Решетка сверху покрыта лаком. Фольговые тензорезисторы нечувствительны к поперечной деформации вследствие малого сопротивления перемычек, соединяющих тензочувствительные элементы. При изготовлении таких преобразователей путем травления можно получить любой рисунок решетки, что является достоинством фольговых преобразователей. На рис. 4, а, б представлены разновидности фольговых тензорезисторов. Большим преимуществом фольговых преобразователей является возможность увеличивать сечение их концов, что позволяет осуществить надежное припаивание (приваривание) выводов, а также возможность изготовить фольговые преобразователи большего сечения, чем проволочные, что позволяет пропускать через преобразователи большие токи, и, следовательно, делать приборы с тензопреобразователями более чувствительными.

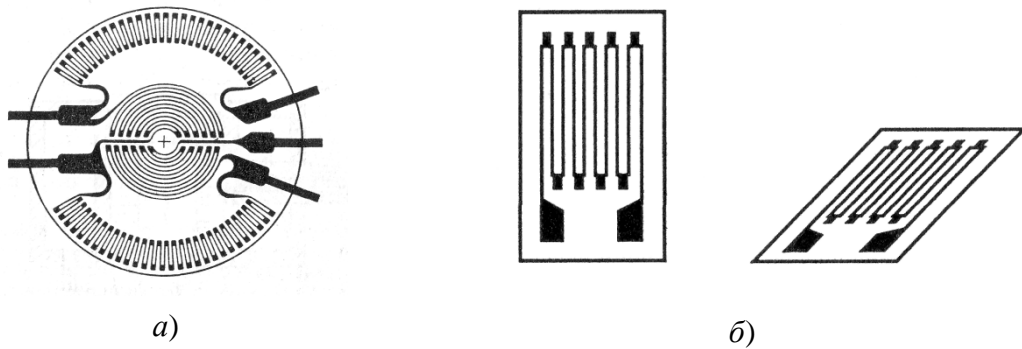


Рис. 4. Фольговые тензорезисторы

При отношении ширины к толщине полоски, равном 10, допустимый ток в преобразователе из фольги в 1,4 раза больше, чем в преобразователе из проволоки того же сечения. Это объясняется тем, что фольговые тензорезисторы имеют большую поверхность для теплообмена с окружающей средой.

Фольговые, как и проволочные тензорезисторы обычно имеют длину 5 – 20 мм, ширину 3 – 10 мм. Их номинальное сопротивление равно 50, 100, 200, 400 и 800 Ом. Параметры тензорезисторов общего назначения регламентирует ГОСТ 21616-76.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой пластинку монокристалла кремния или германия длиной 5 – 10 мм, шириной 0,2 – 0,8 мм, выращенную на тонкой мембране из диэлектрика (например, сапфира). К торцам пластинки приварены выводные проводники.

Свойства полупроводниковых и металлических преобразователей сильно различаются. Чувствительность полупроводниковых преобразователей может быть как положительной, так и отрицательной и лежит в пределах $S_T = 55 - 130$. Как сопротивление, так и чувствительность сильно зависят от температуры. Недостатком является также большой разброс параметров и характеристик.

Тензорезисторы применяются главным образом для преобразования деформации деталей под нагрузкой в изменение сопротивления. Для этого они приклеиваются к поверхностям этих деталей (см. рис. 5) и испытывают одинаковые с ними деформации.

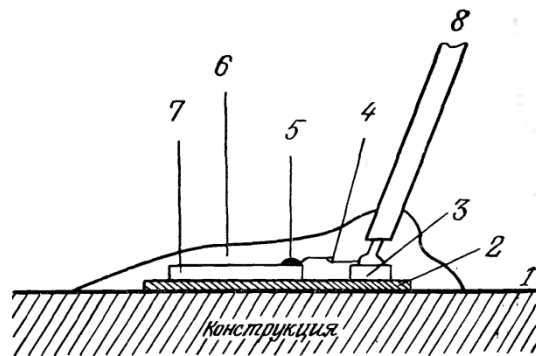


Рис. 5. Измерение деформации конструкции при помощи тензорезистора
 1 – поверхность объекта контроля; 2 – клей; 3 – контакт; 4 – провод; 5 – спайка;
 6 –защитный слой; 7 – тензорезисторный преобразователь; 8 – кабель.

Клей, с помощью которого приклеивают тензодатчик на образец, должен обладать прочностью, линейной упругостью и стабильностью в течение длительного периода времени.

Комбинация датчика – его несущая основа и клей требуют самого серьезного внимания. Необходимо применять апробируемые клеи и соблюдать процедуры нанесения и сушки.

В качестве клея наиболее широко используется метил-2-цианоакрилат, эпоксидная смола, полиимид, БФ-2 и др.

Температурная погрешность проводниковых тензорезисторов в основном имеет аддитивный характер. Для ее компенсации часто используются дифференциальные схемы. Для этого тензорезисторы наклеиваются с разных сторон детали вдоль направления деформации, так, чтобы один из них растягивался, а другой – сжимался (см. рис. 6). В этом случае температурные условия и температурные изменения сопротивлений тензорезисторов одинаковы. При включении таких тензорезисторов в смежные плечи моста, температурная погрешность уменьшается. Переменный резистор $R5$ мостовой измерительной схемы, показанной на рис.6, служит для балансировки измерительного моста при отсутствии деформации объекта контроля. Плечи моста $R1$ и $R2$ образованы манганиновыми сопротивлениями, а плечи $R4$ и $R3$ представляют собой тензорезисторы, наклеенные на поверхности объекта таким образом, чтобы при деформации их сопротивление изменялось противоположным образом, что вызывает увеличение напряжения разбаланса мостовой схемы, измеряемым вторичным прибором $ВП$. Выходное напряжение тензорезисторного моста не превышает 10 – 20 мВ. Для дальнейшего преобразования такое напряжение без усиления использовать трудно. Поэтому в тензорезисторных приборах обычно используются усилители.

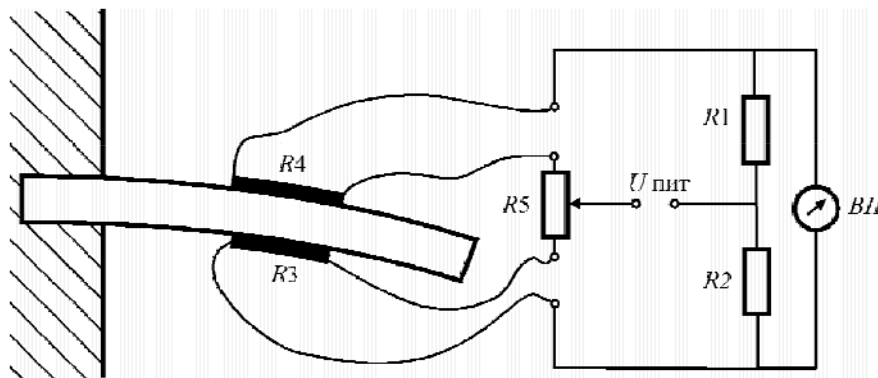


Рис. 6. Измерение деформации при помощи тензорезисторов

Измерение крутящих моментов

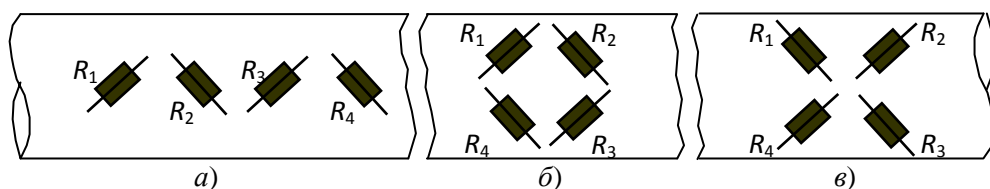


Рис. 7. – Схемы наклейки тензорезисторов для измерения крутящего момента

Крутящие моменты валов сельскохозяйственных машин и агрегатов также измеряют при помощи тензорезисторов (ОСТ 70.2.3.-73). При этом тензорезисторы наклеивают на вал по линии действия напряжения кручения.

Наибольшие напряжения кручения при передаче момента валом отмечаются в его сечении, расположенном под углом 45° к образующей. В направлениях параллельных и перпендикулярных образующей вала, действует только деформация сдвига (рис. 7).

При измерении крутящихся моментов почти не используются схемы с одним и двумя тензорезисторами, а применяются мостовые цепи с четырьмя резисторами. Такие схемы (рис. 7 б, в) позволяют получить на выходе моста мощный сигнал, исключить влияние изгиба вала и деформаций сдвига. Кроме того, мостовые цепи обеспечивают почти полную термокомпенсацию тензорезисторов.

Описание лабораторной установки

Тензометрическая весоизмерительная лабораторная установка (рис. 8 а) включает в себя чашу 1, на которую помещаются грузы, металлическую пластину 2 с наклеенными на нее тензорезисторами $R_1 - R_4$, основание 3, электронный блок преобразователя весового ТЛ-30 – 4, универсальный измерительный прибор – мультиметр 5.

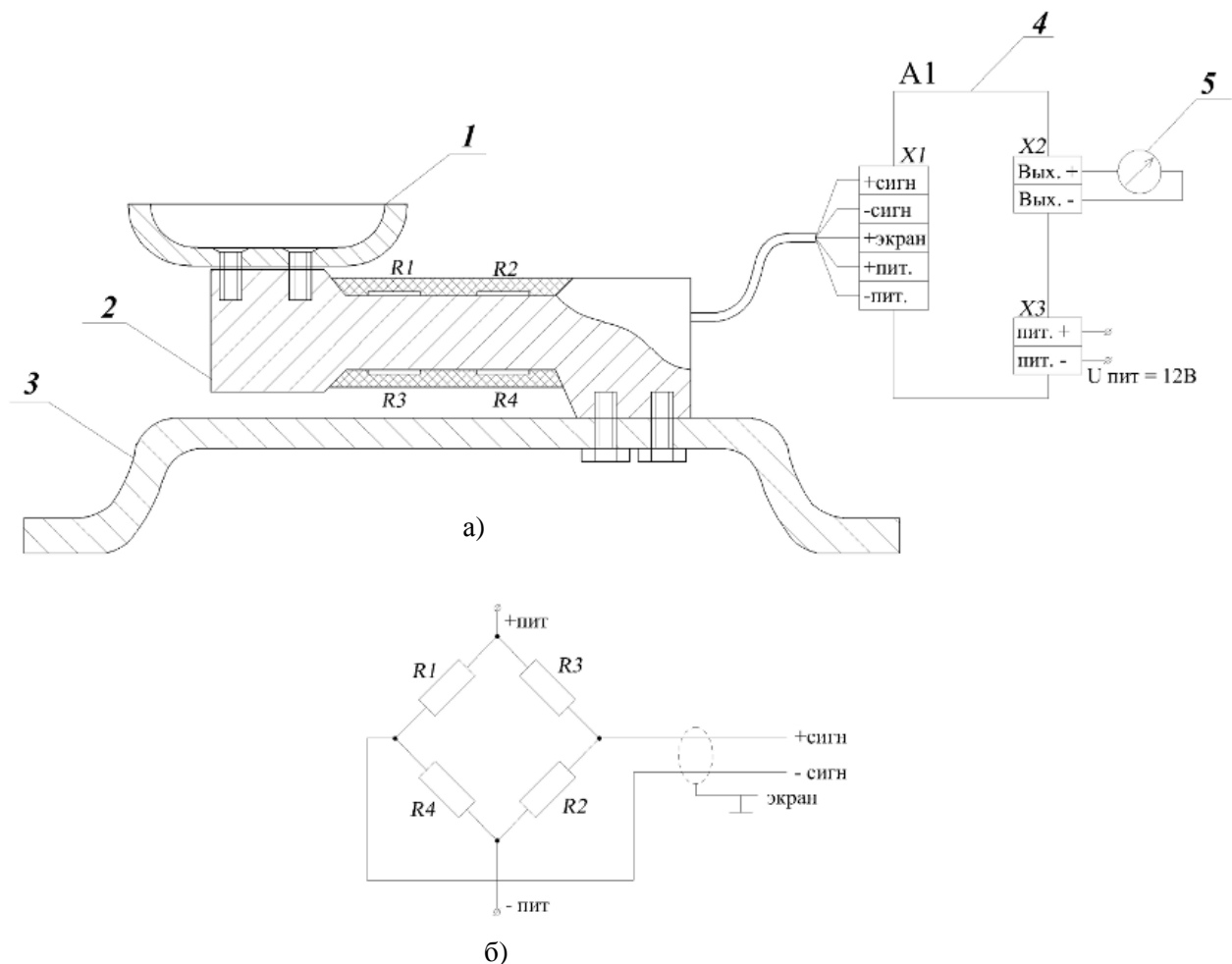


Рис. 8. Схема лабораторной установки

Тензорезисторы включены в мостовую измерительную схему (рис. 8 б).

Выходной сигнал подается на универсальный измерительный прибор – осциллограф-мультиметр UNI-T UT81B (рис. 9). Мультиметр (от англ. *multimeter*),— комбинированный электроизмерительный прибор, объединяющий в себе несколько функций. В минимальном наборе включает функции вольтметра, амперметра и омметра.

UNI-T UT81B – прибор со средними размерами и небольшим весом, что позволяет легко удерживать его в руке. Включение питания прибора и смена режимов мультиметра осуществляется круглым переключателем. Отдельные кнопки отведены управлению осциллографом, а универсальные предназначены для управления измерительным прибором в двух режимах.



Рис. 9. Мультиметр UNI-T UT81B

Щупы данной модели осциллографа-мультиметра используются для двух режимов работы измерительного прибора. К щупам осциллографа-мультиметра UNI-T UT81B можно подключить зажимы "крокодилы", которыми удобно будет цепляться за контакты электрических схем. Они оснащены резиновыми изоляционными кожухами, что позволяет подключать щупы к клеммам, находящимся под напряжением.

С помощью переключателя выставляется тип измеряемого параметра:

- напряжение;
- сопротивление, прозвонка цепи, тестирование диода;
- частота;
- ток;
- емкость.

Порядок выполнения работы

1. Подключить к измерительной установке источник питания, вторичный прибор.
2. Убрав все грузы с платформы тензовесов, снять показания при отсутствии нагрузки.
3. Снять статическую характеристику исследуемой измерительной схемы при увеличении (прямой ход) и уменьшении (обратный ход) нагрузки. Результаты внести в таблицу 1.

4. По полученным экспериментальным данным построить график зависимости напряжения на выходе мостовой измерительной схемы от нагрузки (построить статическую характеристику).

Таблица 1

Количество грузов	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Масса груза											
Суммарная масса грузов											
Показания прибора (прямой ход)											
Показания прибора (обратный ход)											

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Сведения об устройстве и принципе действия угольных, магнитоупругих датчиков и тензорезисторов.
2. Схема лабораторной установки.
3. Экспериментальные данные (таблица и график).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия угольных датчиков усилий.
2. Расскажите об устройстве угольных датчиков усилий.
3. Какие схемы применяют для включения угольных датчиков?
4. Расскажите о достоинствах и недостатках угольных датчиков.
5. Поясните принцип действия и устройство пьезоэлектрических первичных преобразователей.
6. Как можно повысить чувствительность пьезоэлектрических датчиков?
7. Расскажите о достоинствах и недостатках пьезоэлектрических датчиков.
8. Поясните принцип действия и устройство магнитоупругих датчиков усилий и деформаций.
9. Что ограничивает область применения магнитоупругих датчиков?
10. Расскажите о назначении и областях применения угольных датчиков (пьезоэлектрических, магнитоупругих датчиков).
11. На каком явлении основано действие тензорезисторов?
12. Из каких материалов изготавливают тензорезисторы?
13. В чем состоит основное преимущество полупроводниковых тензорезисторов?
14. Каковы схемы включения тензорезисторов?
15. Как градуируют схемы с тензорезисторами?
16. Запишите условие равновесия мостовой измерительной схемы, приведенной на рис. 9.
17. Расскажите об устройстве лабораторного стенда и порядок выполнения работы.

Рекомендуемая литература

1. Бородин И.Ф. Технические средства автоматики. – М.: Колос, 1982. с. 60-63, 67-68, 73-74.
2. Кравцов А.В., Рыбинский Ю.В. Электрические измерения. – М.: Колос, 1979, с. 199-202, 205-210, 333-337.