

## Лабораторная работа

### ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И СИЛ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

**Цель работы:** Изучение принципа действия и исследование аппаратуры для измерения сил и деформаций.

**Оборудование и приборы:** тензостанция ТММ-3, тензометрическая балочка с нагружающим устройством, тензодатчик проволочный из константана.

#### 1.1. Общие сведения

**Тензометрические датчики** применяют для измерения упругих деформаций (измерения растяжения или сжатия тел), а также для измерения крутящих и изгибающих моментов, возникающих на поверхности различных деталей при их механической нагрузке. В основу работы их положен тензоэффект, заключающийся в изменении активного сопротивления проводника под действием механических напряжений и деформаций. Тензодатчики, используемые в автоматическом контроле, дают возможность следить за деформациями и напряжениями при статических и динамических нагрузках [4].

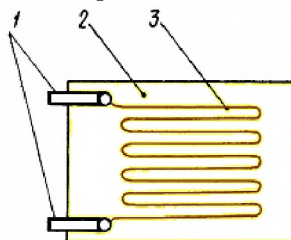


Рис. 1.1. Проволочный тензодатчик:

1 – контактные выводы, 2 – подложка, 3 – чувствительный элемент (проволока)

Основным элементом проволочного тензодатчика является константановая проволока диаметром 0,015—0,05 мм, сложенная в виде петлеобразной решетки (спирали) между двумя склеенными полосками тонкой бумаги или пленки (рис. 1.1). Для измерения деформации чувствительный элемент (проволока) 3 с бумажной подложкой 2 прикрепляют к поверхности исследуемой детали с помощью специальных смол. К концам проволоки прикрепляют выводы 1, изготовленные из медной фольги, при помощи которых тензопреобразователь подключают к измерительной схеме.

При растяжении или сжатии детали приклеенная проволока, которая также будет растягиваться или сжиматься, при этом изменяются геометрические размеры проволоки: длина  $l$ , площадь поперечного сечения  $S$ , удельное сопротивление  $\rho$ , вследствие чего сопротивление проволоки увеличивается. Изменение этого сопротивления будет пропорционально деформации и является выходной величиной датчика.

Сопротивление проволоки вычисляют по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (1.1)$$

Относительное изменение длины проволоки вызывает пропорциональное ему относительное изменение сопротивления проволоки, т.е.:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} \quad (1.2)$$

Эта зависимость является коэффициентом относительной тензочувствительности.

Коэффициент относительной тензочувствительности может быть представлен также в виде:

$$K = 1 + 2\mu, \quad (1.3)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона, характеризующий связь продольной и поперечной деформаций для металлов имеет значения 0,24...0,4.

Следовательно, значение коэффициента тензочувствительности  $K$  для большинства металлов не должно выходить за пределы 1,48...1,8. Однако значения  $K$  для различных материалов, определенные экспериментально, выходят за указанные пределы как в ту, так и в другую сторону. Это свидетельствует о том, что при деформации проводника помимо изменения геометрических размеров изменяются и его свойства, в частности удельное сопротивление  $\rho$ . Для тензодатчиков, выпускаемых промышленностью, используется константановая, нихромовая, никелевая или фехрелевая проволока с тензочувствительностью  $K = 1,7...2,9$ .

В технике измерения неэлектрических величин тензорезисторы используются в двух вариантах. Первый — использование тензоэффекта проводника, находящегося в состоянии объемного сжатия, когда естественной входной величиной преобразователя является давление окружающего его газа или жидкости. На этом принципе строятся манометры для измерения высоких и сверхвысоких давлений, преобразователи которых представляют собой катушку провода (обычно манганинового) или полупроводниковый элемент (чаще всего германиевый или кремниевый), помещенные в область измеряемого давления (жидкости или газа). Выходной величиной преобразователя является изменение его активного сопротивления.

Второй вариант – использование тензоэффекта растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного материала. При этом тензорезисторы применяются в виде «свободных» преобразователей и в виде наклеиваемых.

«Свободные» тензопреобразователи состоят из тензорезистора в виде одной или ряда проволок, закрепленных по концам между подвижной и неподвижной деталями и, как правило, выполняющих одновременно роль упругого элемента. Входной величиной таких преобразователей является весьма малое перемещение подвижной детали.

Длина одной петли проволоки называется базой тензодатчика, величина которой колеблется от 2 до 200 мм и более. При измерениях с помощью тензодатчиков допустимые относительные деформации не должны превышать 0,3 %, так как при большей деформации проволока может оборваться. Тензодатчики обладают сопротивлением от 30 до 500 Ом. Максимальная допустимая температура для датчиков с пленочной основой составляет до 550 °С, а для стеклоуглеродистых 1000 °С.

Кроме наиболее распространенной петлевой конструкции проволочных тензорезисторов существуют и другие. При необходимости уменьшения измерительной базы преобразователя (до 3...1 мм) его изготавливают двухслойным. Достоинство проволочных тензодатчиков—простота конструкции, практически безынерционность, недостаток — малая чувствительность (при работе сопротивление тензодатчика изменяется не более чем на 0,3 %).

Когда надо получить от цепи с тензорезистором большой ток, часто используют «мощные» проволочные тензорезисторы. Они состоят из большого числа (до 30...50) параллельно соединенных проволок, отличаются большими габаритами (длина базы 150 – 200 мм) и развивают мощность, достаточную для осциллографического гальванометра без использования усилителей.

Разновидность «мощных» тензорезисторов — эластичные преобразователи представляют собой резиновый капилляр с внутренним диаметром 0,1–0,5 мм, заполненный ртутью (иногда электролитом) и снабженный проволочными выводами. Наклеенный на объект измерения такой преобразователь, деформируясь вместе с этим объектом, изменяет свое сопротивление. Эластичные тензорезисторы с ртутным наполнителем имеют коэффициент тензочувствительности  $K = 2$  и позволяют измерять достаточно большие деформации материалов (до 30...50 %). Характерными

особенностями являются весьма малое сопротивление и ограниченные температурный и частотный диапазоны.

Фольговые преобразователи представляют собой тонкую ленту из фольги толщиной 4–12 мкм, на которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся его часть образует специальную решетку с выводами.

Для изготовления пленочных тензорезисторов помимо металлических материалов, используется также ряд полупроводниковых материалов, например германий, кремний, у которых чувствительность в 50...60 раз выше, чем у проволочных, поскольку при их деформировании происходит резкое изменение удельного сопротивления. Тензочувствительность в этом случае достигает  $K = \pm 100...200$ .

При изготовлении фольговых и пленочных преобразователей можно предусмотреть любой рисунок решетки, что является существенным их достоинством.

Хотя температурный коэффициент сопротивления тензодатчика очень мал, приходится применять меры для компенсации температурной погрешности. С этой целью применяют мостовые схемы с двумя тензодатчиками в смежных плечах моста, из которых один не подвергается деформации, но находится в тех же температурных условиях. Это достигается перпендикулярным расположением обоих датчиков. Тогда температурные изменения сопротивлений уравниваются и баланс схемы сохраняется (рис. 1.2а).

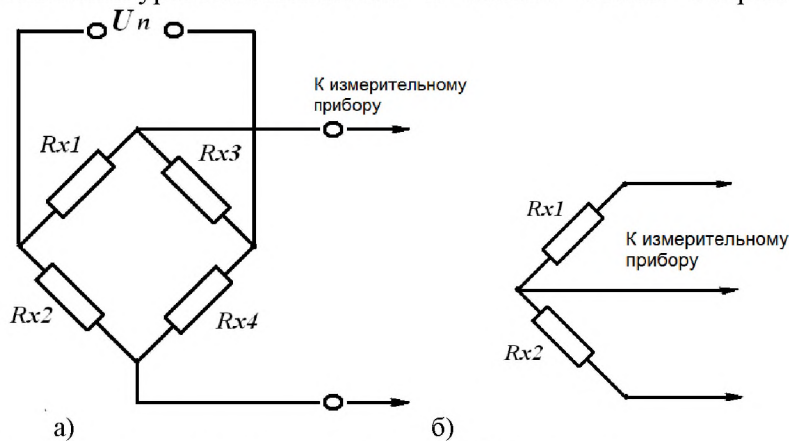


Рис. 1.2. Схемы включения тензодатчиков: а) мост; б) полумост

Иногда используют только два датчика, соединяя их полумостом. Два других недостающих плеча моста образуют постоянные сопротивления внутри измерительного прибора, к которому подключается и источник питания (рис. 1.2б).

Поскольку относительное изменение сопротивления датчиков невелико  $\varepsilon_R = 0,005 \div 0,05$ , то выходной сигнал моста имеет малую величину, поэтому измерительный или регистрационный прибор обычно включается через усилитель. В этих целях при тензометрических измерениях применяются специальные усилители – тензостанции, обеспечивающие измерение и регистрацию по нескольким каналам. Схема включения датчиков и соединения основных элементов тензостанции показана на рис. 1.3.

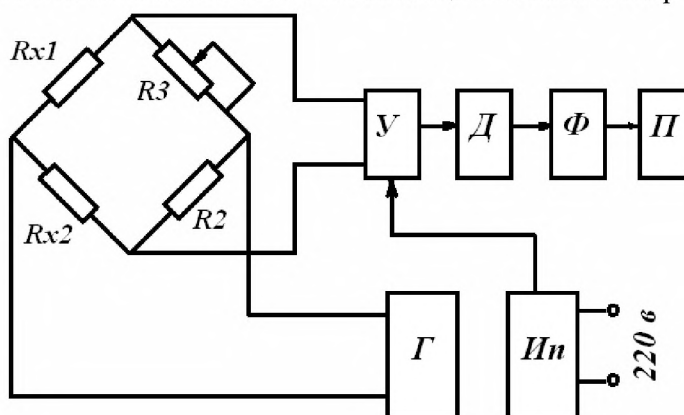


Рис. 1.3. Блок-схема тензостанции:

$I_{\text{П}}$  – источник питания;  $\Gamma$  – генератор несущей частоты;  
 $R_3$  – настроечный потенциометр;  $У$  – усилитель;  $Д$  – детектор;  
 $\Phi$  – фильтр;  $\Pi$  – показывающий прибор или осциллограф

Измерительный мост питается переменным напряжением от генератора  $\Gamma$  несущей частоты (питание моста постоянным током нежелательно из-за ухудшения точности измерений) [1].

Перед началом измерений потенциометром  $R_1$  производят балансировку моста так, чтобы электрическое напряжение на его выходе равнялось нулю. Изменение сопротивления датчиков при их деформации приводит к появлению на выходе моста напряжения, пропорционального измеряемой деформации. Усиленный сигнал подается на детектор  $Д$  и фильтр  $\Phi$ , которые выделяют из несущей частоты усиленный полезный сигнал и передают его на показывающий прибор или осциллограф.

Погрешность измерений с применением проволочных тензодатчиков находится в пределах  $1 \pm 0,5\%$ .

Однако результирующая эффективность тензодатчика определяется не только коэффициентом тензочувствительности, но и конструктивными параметрами преобразователя и допустимой им температурой нагрева. Высокая допустимая для тензодатчика температура важна при измерении деформаций деталей, работающих при высоких температурах.

## 1.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из тензометрической балочки с нагружающим устройством (рис. 1.4) и тензостанции ТММ-3.

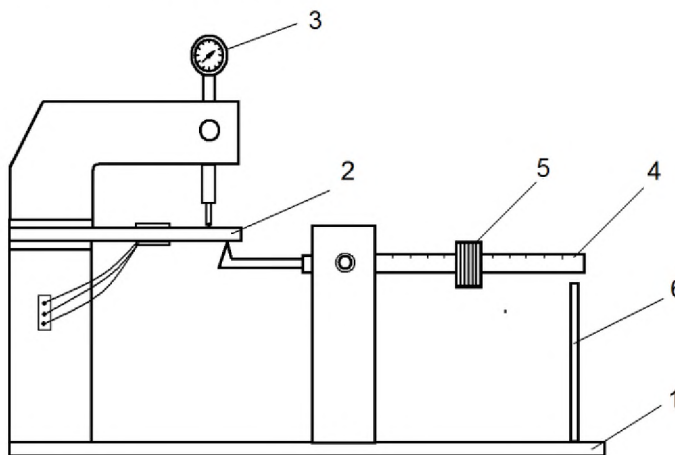


Рис. 1.4. Тензометрическая балочка с нагружающим устройством:

1 – основание; 2 – балочка с тензодатчиком; 3 – индикатор;  
4 – рычаг; 5 – груз; 6 – ограничитель

Тензометрическая балочка 2 из пружинной стали изгибается под действием силы, создаваемой рычагом 4, по которому может передвигаться груз 5. Прогиб балочки измеряется механическим индикатором 3, а деформация поверхностных слоев балочки измеряется наклеенным на нее тензодатчиком.

Датчики подключаются к тензостанции ТММ-3 по схеме полумоста. Тензостанция ТММ-3 состоит из блока питания, генератора несущей частоты, трехканального усилителя, выходы которого можно поочередно подключать к блоку контроля. Расположение органов управления тензостанции ТММ-3 показано на рис. 1.5.

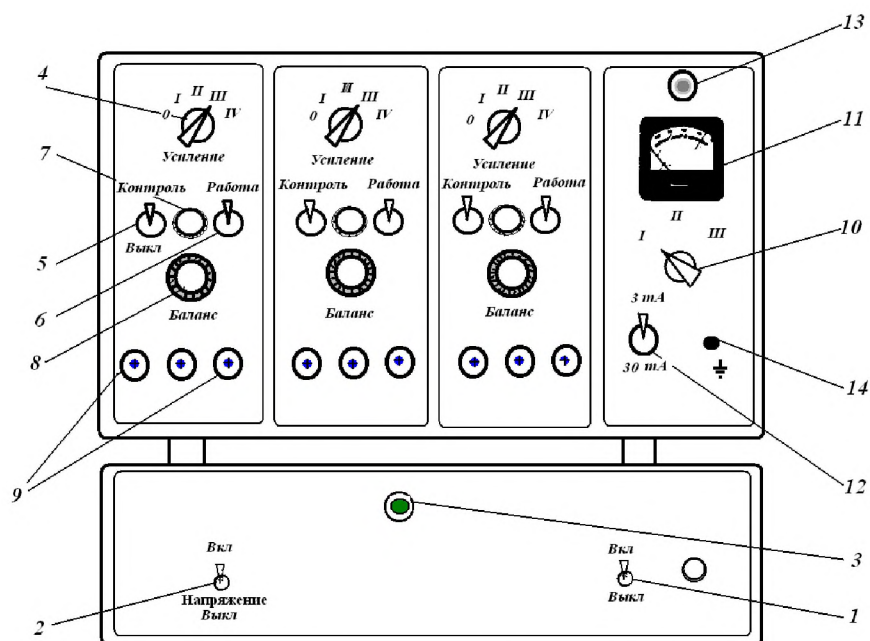


Рис. 1.5. Органы управления тензостанции ТММ-3:  
 1 – включение сети; 2 – включение анодного напряжения;  
 3 – контрольная лампочка; 4 – усиление; 5 – контроль;  
 6 – переключатель рода работ; 7,8 – ручки балансировки;  
 9 – входные клеммы; 10 – переключатель блока контроля;  
 11 – показывающий прибор; 12 – переключатель чувствительности блока контроля; 13 – индикатор  
 настройки; 14 – заземление

### 1.3. Последовательность выполнения работы

При выполнении практического занятия и работе с тензостанцией необходимо придерживаться следующих правил:

1. Изучить теоретический материал по теме лабораторной работы, ознакомиться с описанием лабораторной установки, выяснить цель работы и способы ее достижения, ознакомиться с последовательностью выполнения работы.

2. Включить лабораторную установку с помощью тумблера 1 и дать усилителю прогреться 10–15 минут (тумблер 2 при этом должен быть выключен).

3. Включить тумблер 2 анодного напряжения, установить груз на рычаге тензометрической балочки в нулевое положение и произвести балансировку тензоусилителя.

4. Поставить переключатель каналов 10 в блоке контроля в положение, соответствующее выбранному каналу усиления. Переключатель ступеней усиления 4 перевести в первое положение, а переключатель рода работ 6 перевести в положение "баланс".

5. Вращая ручки балансировки 8, 7 добиться нулевого показания сигнала.

6. Тумблер 5 служит для подачи на вход усилителя контрольного сигнала постоянной величины и позволяет проверять в процессе работы правильность настройки усилителя.

7. При отключении датчиков переключатель усиления должен находиться в нулевом положении.

8. Передвигая груз по рычагу произвести запись величины прогиба балочки  $\Delta$  и показаний электрического измерительного прибора тензостанции  $I$ . Измерение произвести не менее трех раз при каждом значении деформации  $\Delta$ , результаты записать в таблицу.

9. Вычислить среднее значение  $I_{CP}$  при каждом значении деформации  $\Delta$ .

10. Построить тарировочный график, т.е. зависимость показаний измерительного прибора  $I_{CP}$  от величины деформации  $\Delta$ .

## 11. Оформить отчет.

### 1.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Электрические схемы включения тензодатчиков, блок-схему тензостанции, рисунок тензометрической балочки с нагружающим устройством и принципы их работы.
3. Порядок проведения лабораторной работы с перечислением этапов.
4. Таблицу с результатами измерений и вычислений эксперимента.
5. Тарировочный график.
6. Выводы.

### 1.5. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены тензодатчики?
2. Что такое тензоэффект положенный в основу тензодатчиков?
3. По какой схеме соединяются тензодатчики?
4. В следствие чего изменяется сопротивление проволоки ?
5. По какой причине значение коэффициента танзочувствительности, определенный экспериментально выходит за пределы расчетных?
6. Какие металлы используются для изготовления тензодатчиков?
7. Почему тензочувствительность полупроводниковых тензорезисторов в несколько раз выше, чем у проволочных?
8. Почему тензодатчики питают переменным высокочастотным, а не постоянным током?
9. Какие элементы входят в состав тензостанции и их назначение?
10. Как устроена лабораторная установка?
11. Каков порядок включения тензостанции и подготовка ее к измерениям?
12. Какими приборами измеряются в лабораторной установке величина деформации тензометрической балочки и ее прогиб?
13. Что представляет собой тарировочный график канала усиления?
14. Приведите примеры практического применения тензодатчиков?