

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

МЕТРОЛОГИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Томск, 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. каф. КСУП

_____ Ю. А. Шурыгин

«Исследование тензометрических измерительных преобразователей
(тензодатчиков)»

Руководство по выполнению лабораторной работы для студентов специальностей 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», других специальностей при изучении дисциплин «Метрология и технические измерения», «Метрология и радиоизмерения», «Метрология и измерительная техника», «Метрология, стандартизация и сертификация» и прочих дисциплин метрологического профиля.

Разработчик:

ассистент каф. КСУП

_____ К. К. Жаров

Содержание

1	Цель работы.....	4
2	Основные положения.....	4
3	Домашнее задание.....	7
4	Контрольные вопросы.....	7
5	Описание лабораторной установки.....	8
6	Лабораторное задание.....	9
7	Методические указания к выполнению работы.....	10
8	Требования к оформлению отчета.....	12
9	Рекомендуемая литература.....	12

1 Цель работы

Исследование основных характеристик наклеиваемых тензометрических датчиков и на их основе измерительной установки для измерения механических усилий и деформаций.

2 Основные положения

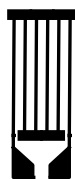
Тензометрические преобразователи используются в приборах (измерительных установках и системах) для измерения деформаций и напряжений в деталях машин и механизмов или других физических величин, преобразуемых предварительно в деформацию. Принцип действия тензопреобразователей основан на явлении тензоэффекта, заключающегося в изменении омического сопротивления проводника за счет изменения его геометрических размеров (длины и площади поперечного сечения) и физических свойств (удельного сопротивления материала проводника) при деформации. Обобщенной характеристикой тензоэффекта, учитывающей эти изменения, является коэффициент относительной тензочувствительности K , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления γ_R к относительному изменению длины проводника тензодатчика γ_l :

$$K = \frac{\gamma_R}{\gamma_l}, \quad (2.1)$$

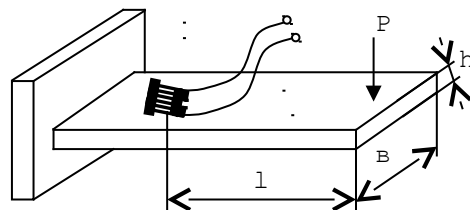
где $\gamma_R = \frac{\Delta R}{R}$, $\gamma_l = \frac{\Delta l}{l}$.

Коэффициент тензочувствительности существенно зависит от материала проводника. Для металлических тензорезисторов он положительный и лежит в пределах 2 – 3; для никеля 10 – 12, для висмута 20 – 22, для полупроводниковых материалов достигает значений от -100 до +100.

При измерении поверхностных деформаций наибольшее применение получили фольговые и пленочные тензорезисторы, наклеиваемые на испытываемую деталь. Фольговые тензорезисторы изготавливаются из металлической ленты толщиной 4 – 12 мкм, из которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся его часть образует показанную на рисунке 2.1,а решетку с выводами.



а)



б)

Рисунок 2.1

Конфигурация, показанная на рисунке 2.1,а, наиболее удобна для измерения линейных деформаций. При этом решетка наклеивается на деталь так, чтобы измерительная база преобразователя (длина решетки) совпадала с направлением интересующих деформаций. Для уменьшения влияния поперечных деформаций, воспринимаемых участками решетки в местах поворота проводника и искажающих характеристику преобразования, сечение проводника на этих участках увеличено. Влияние поперечных деформаций уменьшается также при увеличении базы преобразователя, однако при этом оценка соосных деформаций перестает быть точечной и становится интегральной по длине базы. Наиболее часто используются преобразователи с базами (5 – 20) мм, обладающие номинальным сопротивлением $R_{ном} = 30 - 500 \text{ Ом}$.

Тензометрические преобразователи относятся к группе параметрических преобразователей неэлектрических величин в электрические. Естественной входной величиной наклеиваемых тензорезисторов является деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен, а естественной выходной величиной — изменение сопротивления, пропорциональное этой деформации.

Наклеиваемые тензорезисторы использованы в данной работе для измерения упругих деформаций стальной консольной балки (на рисунке 2.1,б), возникающих под действием сосредоточенной силы P , приложенной к свободному концу балки. При этом тензорезистор, наклеенный на верхнюю поверхность балки, испытывает деформацию растяжения, а нижний тензорезистор - деформацию сжатия. Абсолютная величина Δl и знак линейной деформации тензоматериала определяется соответствующей деформацией участка поверхности балки, на который наклеен тензорезистор. Статическая (тарировочная) характеристика отдельного тензопреобразователя линейна в области упругих деформаций, когда $K = const$:

$$\Delta R = f(\Delta l) = K \cdot \frac{R}{l} \cdot \Delta l, \quad (2.2)$$

$$\gamma_R = f(\Delta l) = K \cdot \gamma_l. \quad (2.3)$$

При измерении сосредоточенной силы P консольная балка может рассматриваться как упругий механический преобразователь неэлектрических величин. Статическая характеристика такого преобразователя определяется выражением:

$$\Delta l = f(P) = \frac{6 \cdot l^2 \cdot P}{E \cdot b \cdot h^2}, \quad (2.4)$$

где Δl — абсолютная линейная деформация поверхности балка в точке измерения, см;

P — сосредоточенная сила - нагрузка балки, кг;

l — длина участка балки между точкой приложения нагрузки и точкой измерения, см;

h — толщина балки, см;

b — ширина балки, см;

E — модуль упругости материала балки, кг/см².

Для балки, используемой в работе $l = 90 \text{ см}$, $b = 4 \text{ см}$, $h = 1 \text{ см}$, $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$.

Относительная линейная деформация γ_l тензопреобразователя в выражениях (2.1) и (2.2) равна относительной линейной деформации балки $\gamma_l = \frac{\Delta l}{l}$, рассчитанной по формуле (2.3), что позволяет тарировать тензопреобразователь по усилию:

$$\gamma_R = f(P) = K \cdot \frac{6 \cdot l \cdot P}{E \cdot b \cdot h^2}. \quad (2.5)$$

Изменение сопротивления тензорезистора, как и любого параметра электрической цепи, может быть выявлено только путем измерения обусловленных им измерений токов или напряжений электрической цепи, в которую включен тензорезистор. Наиболее часто тензопреобразователь включается в одно из плеч неравновесного моста постоянного или переменного тока. Выходное напряжение ΔU , снимаемое с измерительной диагонали моста, при включении в смежное плечо моста эквивалентного постоянного сопротивления, равного номинальному сопротивлению тензорезистора, определяется выражением:

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_{num} \frac{\gamma_R}{1 + \gamma_R}, \quad (2.6)$$

где U_{num} - напряжение питания моста.

Мостовая схема с источником питания является, таким образом, преобразователем вида электрической величины.

Статическая характеристика тензорезистора линейна ($K = const$) при относительной деформации не превышающей (для исследуемых тензорезисторов) величины $\gamma_R = 2,5 \cdot 10^{-3}$. При этом относительное изменение сопротивления не превышает $\gamma_R = (5-8) \cdot 10^{-3}$, а максимальное выходное напряжение моста не более $U_{max} = (1,25-2) \cdot 10^{-3} \cdot U_{num}$.

Во избежание помех при последующей обработке или передаче, а также для индикации столь малых напряжений необходимо дополнительное усиление. С этой целью измерительная диагональ моста подключается к входу измерительного усилителя со стабильным коэффициентом усиления и малым дрейфом нуля, обеспечивающего масштабное унифицирующее преобразование вида

$$U' = K_{yc} \cdot \Delta U, \quad (2.7)$$

где K_{yc} — коэффициент усиления;

ΔU — выходное напряжение (унифицированный электрический сигнал).

Основным источником погрешности тензопреобразователей является температурная зависимость сопротивления тензоматериала. Изменение сопротивления γ_t , обусловленное изменением температуры проводника, сравнимо с его изменением γ_R за счет измеряемой деформации и непосредственно добавляется к результату преобразования. Кроме того, наклеиваемые тензорезисторы вследствие разного температурного коэффициента расширения детали и тензоматериала испытывают дополнительные деформации растяжения или сжатия при отсутствии внешней нагрузки. Для уменьшения температурной погрешности в соседнее плечо моста включается такой же преобразователь, наклеенный на тот же самый материал и помещенный в те же температурные условия, что и рабочий преобразователь. Если при этом оба терморезистора испытывают равные деформации противоположного знака, то наряду с температурной коррекцией вдвое повышается чувствительность мостовой схемы:

$$\Delta U = \frac{1}{2} U_{nom} \gamma_R. \quad (2.8)$$

В измерительной установке на основе тензодатчиков, как следует из выражений (2.1) – (2.7), реализуется цепь последовательных измерительных преобразований от воздействия измеряемой физической величины P до формирования унифицированного первичного электрического сигнала U .

$$P \rightarrow \Delta l \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta U \rightarrow U' \quad (2.9)$$

3 Домашнее задание

3.1) Ознакомиться с принципом действия, устройством и характеристиками тензометрических преобразователей (тензодатчиков).

3.2) Ознакомиться с теорией мостовой схемы, применяемой в лабораторной работе, и вывести формулу баланса моста, необходимую для расчета сопротивления тензодатчика.

3.3) Произвести расчет статической характеристики консольной балки при $\gamma_l = f_2(P)$ изменении нагрузки от 0 до 5 кг с использованием формулы (2.3).

4 Контрольные вопросы

4.1) В чем заключается явление тензоэффекта?

4.2) Какие виды тензодатчиков Вы знаете? Какими коэффициентами тензочувствительности они характеризуются?

4.3) Что такое коэффициент тензочувствительности? Как его измерить (подробное пошаговое описание)?

4.4) Для измерения каких физических величин могут быть использованы тензопреобразователи?

4.5) Какую форму имеет тензодатчик? Почему именно такую?

4.6) Нарисуйте мостовую схему. Обоснуйте необходимость применения мостовой схемы для измерений, производимых с помощью тензодатчиков. Приведите вывод уравнения баланса моста.

4.7) Какое включение тензодатчиков называют дифференциальным? При каких условиях дифференциальное включение увеличит чувствительность измерительной установки?

4.8) Поясните природу температурной погрешности тензодатчиков и опишите, каким образом она может быть уменьшена.

4.9) Изобразите цепь последовательных преобразований, которым подвергается измеряемая физическая величина в измерительной установке, и определите тип каждого преобразователя в соответствии с классификацией измерительных преобразователей.

4.10) Зачем тарировка измерительной установки по усилию производилась для нагрузки и разгрузки балки? Как называется такой метод измерений, и для чего он используется?

5 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения механических усилий и деформаций содержит:

- 1) консольную балку, закрепленную на рабочем месте;
- 2) два тензорезистора с номинальными сопротивлениями $R_{ном} = 200 \text{ Ом}$, наклеенные на противоположные грани балки и испытывающие равные деформации разного знака;
- 3) набор гирь для создания деформирующих усилий;
- 4) лабораторный макет;
- 5) магазин сопротивлений.

Структурная схема лабораторного макета показана на рисунке 5.1:

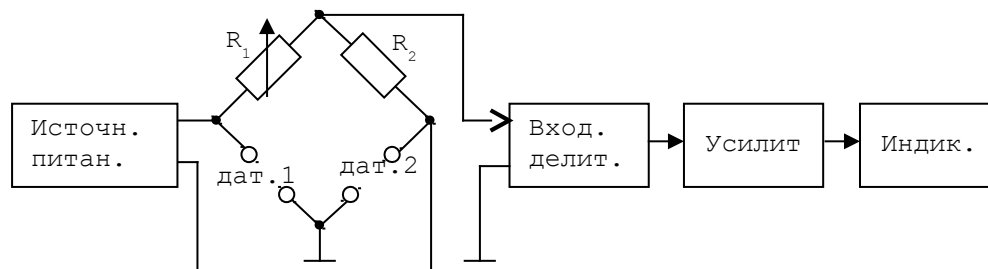


Рисунок 5.1

Основным элементом лабораторного макета является измерительный нерав-

новесный мост. Источником питания моста является стабилизированный выпрямитель с постоянным выходным напряжением $U_{num} = 5 \text{ В}$. Тензорезисторы включаются в нижние смежные плечи моста с помощью клемм ДАТЧИК I и ДАТЧИК II.

При этом общая клемма заземлена и к ней подключаются шина датчиков и корпус балки.

При исследовании одного тензодатчика в плечо моста (ДАТЧИК I) включается тензорезистор. В другое плечо (ДАТЧИК II) подсоединяется постоянный резистор с эквивалентным сопротивлением, равным номинальному сопротивлению тензорезистора $R_{эkv} = R_{ном} = 200 \text{ Ом}$. В верхние плечи моста включены постоянный резистор с номинальным сопротивлением $R_2 = 1000 \text{ Ом}$ и переменный резистор R_1 для балансировки моста, в качестве которого используется магазин сопротивлений. При исследовании дифференциального включения тензодатчиков тензорезисторы включаются в нижние плечи моста. Клеммы ДАТЧИК I, ДАТЧИК II, МАГАЗИН расположены на передней панели лабораторного макета. Напряжение с измерительной диагонали моста поступает на вход ступенчатого декадного делителя напряжения и далее на вход усилителя постоянного напряжения с плавной регулировкой усиления. Переключатель ДЕЛИТЕЛЬ и ручка УСИЛЕНИЕ выведены на переднюю панель макета и предназначены для грубой и плавной регулировки чувствительности прибора. На передней панели прибора установлены также стрелочный индикатор, подключенный к выходу усилителя, и тумблер СЕТЬ для включения прибора.

6 Лабораторное задание

6.1) Собрать мост для исследования одного тензометрического датчика. При сборке измерительной схемы руководствоваться указаниями, изложенными в разделе 5.

6.2) Определить точное значение сопротивления первого тензодатчика.

6.3) Определить коэффициент тензочувствительности первого тензодатчика при нагрузке $P = 2 \text{ кг}$ и $P = 4 \text{ кг}$.

6.4) Произвести тарировку измерительной установки по усилию и деформации, т.е. снять зависимость $\alpha = f_1(P)$ и $\alpha = f_2(P)$. Результаты представить в виде графиков.

6.5) Определить чувствительность измерительной установки к усилию S_p и деформации S_l для двух значений нагрузки $P = 0 \text{ кг}$ и $P = 4 \text{ кг}$.

6.6) Повторить п.п. 6.1 – 6.5 для второго тензодатчика.

6.7) Собрать схему дифференциального тензопреобразователя (включены оба тензорезистора). Снять тарировочные характеристики и определить чувствительность измерительной установки в соответствии с п.п. 6.4 – 6.5 для диффе-

ренциального включения тензодатчиков.

7 Методические указания к выполнению работы

Для исследования тензометрических датчиков необходимо собрать измерительную схему (см. рис. 5.1).

ВНИМАНИЕ! *Перед сборкой схемы и включением макета в сеть необходимо убедиться, что переключатель ДЕЛИТЕЛЬ находится в положении “ВЫКЛ” (вход усилителя закорочен), а балка разгружена. В дальнейшем любые изменения в схеме соединений производить только при закороченном входе усилителя во избежание выхода макета из строя.*

Для исследования первого тензодатчика необходимо:

7.1) подключить тензодатчик к клеммам ДАТЧИК I;

7.2) подключить эквивалентное сопротивление $R_{\text{экв}} = 200 \text{ Ом}$ к клеммам ДАТЧИК II;

7.3) подключить магазин сопротивлений (резистор R_1) к клеммам МАГАЗИН, установив ориентировочно его сопротивление равным $R_1 = 1000 \text{ Ом}$ (рекомендуется для удобства регулировки установить десять сотен, а не одну тысячу);

7.4) включить тумблер СЕТЬ;

7.5) сбалансировать мост изменением сопротивления магазина до получения нулевых показаний индикатора при максимальной чувствительности усилителя. Балансировка моста производится с помощью магазина сопротивлений при последовательном увеличении чувствительности усилителя сначала ступенями с помощью переключателя ДЕЛИТЕЛЬ, а затем плавно с помощью ручки УСИЛЕНИЕ. Мост должен быть уравновешен при такой максимальной чувствительности, когда изменение сопротивления магазина на 1 Ом от равновесного состояния приводит к отклонению стрелки индикатора на 150 – 200 делений шкалы;

7.6) точное значение сопротивления тензодатчика R_0 из условия баланса моста (см. рисунок 5.1) определится как:

$$R_{\text{дат}} = R_{\text{экв}} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (7.1)$$

где $R_{\text{дат}}$ — сопротивление тензодатчика, подключенного к клеммам ДАТЧИК I;

R_1 — сопротивление магазина при балансе моста;

$R_2 = 1000 \text{ Ом}$,

$R_{\text{экв}} = 200 \text{ Ом}$;

7.7) определение коэффициента тензочувствительности тензодатчика при нагрузках $P = 2 \text{ кг}$ и $P = 4 \text{ кг}$:

7.7.1) установив нагрузку $P = 2 \text{ кг}$, сбалансировать мост и по формуле (7.1) рассчитать новое сопротивление тензодатчика R_{dam} ;

7.7.2) коэффициент тензочувствительности K рассчитывается по формулам (2.1) – (2.3), где относительное приращение сопротивления тензорезистора определяется выражением

$$\gamma_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R'_{\text{dam}} - R_{\text{dam}}}{R_{\text{dam}}}, \quad (7.2)$$

где R'_{dam} и R_{dam} — сопротивления нагруженного и ненагруженного тензорезисторов, определяемые из условия баланса моста (7.1);

7.7.3) установив нагрузку $P = 4 \text{ кг}$, вновь сбалансировать мост и по предыдущей методике рассчитать коэффициент тензочувствительности тензодатчика;

7.8) для тарировки измерительной установки по усилию и деформации снять зависимости показаний индикатора от величины нагрузки P на балку и деформации Δl балки $\alpha = f_1(P)$ и $\alpha = f_2(P)$. Тарировку по усилию производить, нагружая балку гирями через $0,5 \text{ кг}$ от 0 кг до 4 кг . Для устранения влияния механического гистерезиса тарировку произвести для процессов нагрузки и разгрузки балки. Статические (тарировочные) характеристики $\alpha = f_1(P)$ и $\alpha = f_2(P)$ построить, полагая значение α для каждого значения нагрузки равным среднему значению показаний индикатора при нагрузке и разгрузке;

7.9) определение чувствительности измерительной установки по усилию S_p и деформации S_l ненагруженного тензодатчика производится следующим образом:

7.9.1) сбалансировать мост при $P=0\text{кг}$;

7.9.2) увеличить нагрузку балки на $(0,5-1)\text{кг}$;

7.9.3) снять показание индикатора $\Delta\alpha$;

7.9.4) определить чувствительность по формулам:

$$S_p = \frac{\Delta\alpha}{\Delta P} \left(\frac{\text{дел}}{\text{кг}} \right), \quad (7.3)$$

$$S_l = \frac{\Delta\alpha}{\Delta l} \left(\frac{\text{дел}}{\text{см}} \right), \quad (7.4)$$

где $\Delta\alpha$ - приращение показания индикатора при изменении нагрузки на величину ΔP или деформации на величину Δl ;

7.10) определение чувствительности измерительной установки по усилию S_p и деформации S_l для нагрузки $P=4\text{кг}$ производится по аналогичной методике:

7.10.1) сбалансировать мост при $P=4\text{кг}$; после чего повторить п.п. 7.9.2, 7.9.3, 7.9.4;

7.11) для исследования дифференциального включения тензодатчиков к клем-

мам ДАТЧИК 1 подключается один, а к клеммам ДАТЧИК 2 – второй тензодатчик. Общий контакт присоединить к корпусной клемме макета. Тарировочные характеристики и чувствительность измерительной установки производить согласно п.п. 7.8 и 7.9 методических указаний. В связи с резким увеличением чувствительности при дифференциальном включении двух датчиков возможно зашкаливание измерительного прибора при усилиях, превышающих 4 кг. Для устранения зашкаливания рекомендуется после балансировки моста в п. 7.5 перебалансировать мост на -100 делений (в сторону, противоположную отклонению стрелки при нагрузке).

8 Требования к оформлению отчета

8.1) Отчет должен содержать результаты выполнения всех пунктов лабораторного задания и выводы по проделанной работе.

8.2) При оформлении отчета следует придерживаться образовательного стандарта ОС ТУСУР 2013.

9 Рекомендуемая литература

1) Евтихий Н.Н. и др. Параметрические измерительные преобразователи. – М. Высшая школа. 1997.

2) Н. Н. Евтихий, Измерение электрических и неэлектрических величин, учебное пособие для вузов, Москва: Энергоатомиздат, 1990, 352с.

3) Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления - [Электронный ресурс] — Режим доступа — <https://regulations.tusur.ru/documents/70>, дата обращения 06.06.2018