

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.Королева

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА СИЛЫ

**Методические указания к лабораторной работе**

САМАРА 2001

Составитель *В.М. Гречишников*

УДК 621.317.

**Исследование характеристик тензорезисторного датчика силы:** Метод. указания/Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. *В.М. Гречишников*. Самара, 2001. 12 с.

Даны необходимые сведения по выполнению работы, указан порядок проведения эксперимента, обработки результатов, а также сформулированы контрольные вопросы для отчета по лабораторной работе.

Рекомендуются для студентов, обучающихся по специальности 131000 по дисциплине "Электрические измерения". Подготовлены на кафедре "Электротехника".

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *К а л а к у т с к и й Л. И.*

## Лабораторная работа

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА СИЛЫ

*Цель работы:* изучение принципа действия тензорезисторного датчика силы и экспериментальное исследование характеристик датчика.

#### Общие сведения

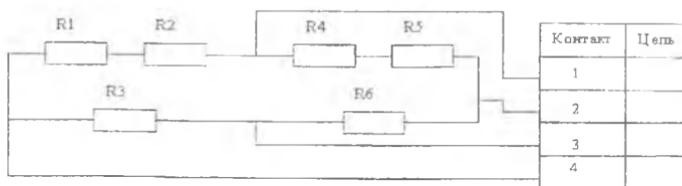
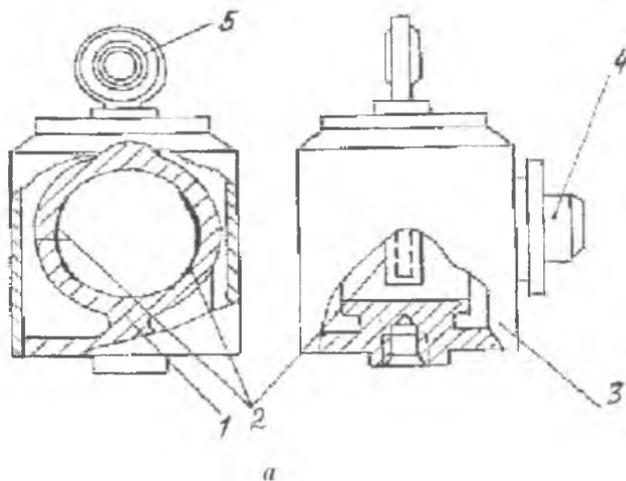
Тензорезисторные датчики силы могут быть выполнены по структурной схеме упругий элемент – тензорезистор – измерительная цепь с последовательным преобразованием сила ( $F$ ) → деформация ( $\epsilon_1$ ) → относительное изменение сопротивления ( $\epsilon_r$ ). Требования минимальности массы и габаритных размеров для датчиков силы часто являются менее жесткими, чем для датчиков давления, и поэтому в них значительно чаще применяют мостовую измерительную цепь с четырьмя активными тензорезисторами [1]. В датчиках силы несколько иные и условия работы тензорезисторов по сравнению с условиями работы в датчиках давления.

В датчиках силы деформация не является входной величиной, ее значение может быть значительно меньше, чем в датчиках давления, и поэтому такие погрешности тензорезистора как ползучесть, гистерезис, нелинейность, становятся минимальными, что позволяет повысить точность датчиков. Температурные диапазоны работы датчиков силы значительно уже, чем датчиков деформаций, и в датчиках силы, как правило, больше условий для осуществления защиты тензорезисторов от воздействия окружающей среды. Датчик силы на рис.1, а состоит из упругого элемента 1, тензорезисторов 2, кожуха 3 и электрического разъема 4. Упругий элемент представляет собой кольцо с двумя жесткими участками, на одном из которых имеется резьба, а на другом – синопередающий элемент в виде серьги с подшипником 5. На поверхность упругого элемента наклеены тензорезисторы R1, R3, R5, R6, компенсационный резистор R2 и балансировочный резистор R4, соединенные в мостовую измерительную цепь (рис. 1, б). На контакты 2 и 4 электрического разъема подается напряжение питания  $U_{п}$ , а с контактов 1 и 3 снимается выходное напряжение датчика  $U_{вых}$ . От воздействия механических повреждений тензорезисторы защищены кожухом. Кожух приварен к упругому элементу и обеспечивает герметическое исполнение датчика. Выводы мостовой измерительной цепи соединены с контактами электрического разъема.

Принцип работы датчика основан на том, что при действии силы на датчик упругий элемент деформируется. Деформация воспринимается тензорезисторами, в результате чего изменяется их электрическое сопротивление. Измеряемая сила  $F$  и величина выходного напряжения  $U_{вых}$  мостовой измерительной цепи связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} = \frac{k m S U_n \left( \frac{\sin \varphi_0}{\psi} - \cos \varphi_0 \right)}{(k+1)^2 E b h^2} F = A F ,$$

где  $k=R1/R3$  – коэффициент симметрии мостовой измерительной цепи,  $k=1$ ;  $R1, R3$  – сопротивления тензорезисторов, наклеенных соответственно на внутренней и наружной поверхностях упругого элемента;  $m$  – коэффициент, зависящий от цикла рабочих тензорезисторов и степени их работы,  $m=4$ ;  $S$  – коэффициент тензочувствительности,  $S=2,2$ ;  $E$  – модуль упругости,  $E=2 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>;  $U_n$  – напряжение питания,  $U_n=9 \pm 1,8$  В;  $b$  – ширина кольца упругого элемента, мм;  $\varphi_0$  – угол, внутри которого находится тензорезистор;  $\psi$  – угол упругой части кольца;  $A$  – чувствительность датчика, В/кгс.



*б*

Рис. 1.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для исследования тензорезисторного датчика силы состоит (рис. 2) из металлической прямоугольной рамки 1, на противоположных сторонах которой жестко закреплены направляющий цилиндр 2 для установки точно выверенных по весу плоских кольцевых грузов 3 грузопоршневого манометра и тензорезисторный датчик силы 4.

В серьгу 5 датчика силы вставлена ось 6, закрепленная на вертикально расположенной вилке 7, верхний конец которой неподвижен. Такая конструкция установки позволяет избежать погрешности измерения из-за несовпадения оси датчика силы и направления действия измеряемой силы. Изменение величины измеряемой силы осуществляется путем установки различного количества грузов.

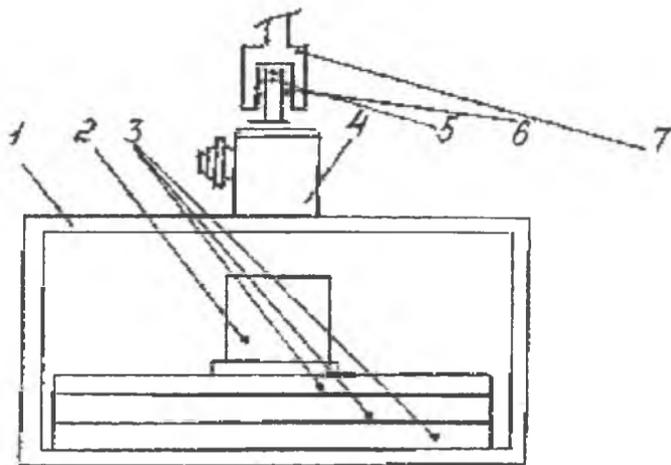


Рис. 2.

Электрическая схема лабораторной установки изображена на рис. 1.

## Программа работы

### 1. Изучение лабораторной установки.

1.1. Ознакомиться с конструкцией лабораторной установки и схемой подключения приборов, используемых в работе.

1.2. Ознакомиться с программой обработки экспериментальных данных, приведенной в приложении.

## 2. Балансировка датчика.

2.1. Переключатели S1 и S2 поставить в положение «Выкл.».

2.2. Установить на источнике питания требуемое напряжение питания измерительной цепи (задается преподавателем) и включить источник питания.

2.3. Измерить милливольтметром и записать напряжение начального разбаланса датчика.

2.4. Поставить переключатель S1 в положение «Баланс» и регулировкой потенциометра R2 сбалансировать мостовую измерительную цепь датчика, добившись показания милливольтметра равного нулю.

3. Калибровка датчика (определение цены калибровочного сопротивления).

3.1. Поставить переключатель S1 в положение «Калибр».

3.2. Изменяя величину силы, прикладываемой к датчику, путем наложения соответствующего количества грузов, устанавливаемых на рамку, добиться показания милливольтметра равного нулю. Полученное при этом значение силы будет являться ценой калибровочного сопротивления, установленного на магазине сопротивлений.

3.3. поставить переключатель S2 в положение «Выкл.».

4. Определение градуировочной характеристики датчика силы.

4.1. Сбалансировать датчик в соответствии с п. 2.4.

4.2. Установить требуемое количество грузов на рамку и снять зависимость  $U_{\text{вых}}=f(F)$ , определяя величину задаваемой силы по весу установленных грузов. Номинальное значение силы задается преподавателем.

4.3. Повторить 5 раз измерения по п. 4.2, снимая показания для прямого (увеличение силы) и обратного (уменьшение силы) хода.

4.4. При завершении снятия характеристики обратного хода записать величину «ухода» нуля в милливольтгах. Данные по пп. 4.2-4.4 занести в табл. П 1 приложения.

4.5. Используя приведенные в [2] алгоритмы и программы обработки экспериментальных данных, определить с помощью ЭВМ параметры номинальной градуировочной характеристики, погрешности линейности, гистерезиса и случайную погрешность в лабораторных условиях. Данные по пп. 4.5 занести в табл. П 2 приложения.

Сравнить полученные в лабораторных работах метрологические характеристики датчиков давления и силы; сделать выводы.

## Приложение

### ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Определение номинальной характеристики вида  $y = k \cdot x + b$ .

1.1. Данные экспериментальных исследований занести в табл. П 1, в которой значения  $y_{ij}$  соответствуют прямому ходу градуировочной характеристики, а значения  $y'_{ij}$  - обратному.

Таблица П 1

Значения входной величины	Измеренные значения выходного сигнала по циклам										Вычисленное среднее значение	
	1		2		3		4		5			
	$y_{1j}$	$y'_{1j}$	$y_{2j}$	$y'_{2j}$	$y_{3j}$	$y'_{3j}$	$y_{4j}$	$y'_{4j}$	$y_{5j}$	$y'_{5j}$	$\bar{y}_i$	$\bar{y}'_i$
0												
$x_1$												
$x_2$												
...												
$x_{10} =$												
$x_B$												

1.2. На каждом уровне входной величины для прямого и обратного хода характеристики определить средние значения выходного сигнала:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=0}^n y_{ji}}{n};$$

$$\bar{y}'_i = \frac{\sum_{j=1}^n y'_{ji}}{n};$$

где  $n$  – число циклов градуировки ( $n=5$ ). Полученные значения занести в табл. П 1.

1.3. Определить значения коэффициентов  $k$  и  $b$  аппроксимирующей прямой для прямой ветви характеристики по формулам

$$k = \frac{m + 1 \sum_{i=0}^m (\bar{y}_i x_i - \sum_{i=0}^m \bar{y}_i \sum_{i=0}^m x_i)}{m + 1 \sum_{i=0}^m x_i^2 - (\sum_{i=0}^m x_i)^2};$$

$$b = \frac{\sum_{i=0}^m (\bar{y}_i \sum_{i=0}^m x_i^2 - \sum_{i=0}^m (\bar{y}_i x_i) \sum_{i=0}^m x_i)}{m+1 \sum_{i=0}^m x_i^2 - (\sum_{i=0}^m x_i)^2}$$

где  $m$  – число уровней входной величины ( $m=10$ ). Параметры  $k'$  и  $b'$  прямой, аппроксимирующей обратную ветвь, определяются по таким же формулам, только вместо  $\bar{y}_i$  используются значения  $\bar{y}_i'$ .

1.4. Построить аппроксимирующие прямые для прямой  $y=k*x+b$  и обратной  $y=k'*x+b'$  ветвей характеристик и прямую, определяемую уравнением

$$y_n = \frac{k+k'}{2}x + \frac{1}{2}(b+b') = k_n x + b_n,$$

которая принимается за номинальную характеристику датчика.

2. Определение погрешности линейности.

Погрешность линейности оценивается для прямой и обратной ветвей градуировочной характеристики, исходя из среднего квадрата отклонений значений градуировочной характеристики от соответствующей аппроксимирующей прямой. Для прямой ветви относительное значение квадрата отклонений равно

$$\gamma_n^2 = \frac{1}{m+1} \frac{\sum_{i=0}^m (kx_i + b - \bar{y}_i)^2}{k_n^2 x_n^2}$$

Аналогично для обратной ветви

$$\gamma_{об}^2 = \frac{1}{m+1} \frac{\sum_{i=0}^m (k'x_i + b' - \bar{y}_i')^2}{k_n^2 x_n^2}$$

Погрешность линейности находится как

$$\gamma_n = \sqrt{\frac{1}{2}(\gamma_n^2 + \gamma_{об}^2)}.$$

3. Определение погрешности гистерезиса.

Среднее по всем точкам градуировки значение относительной дисперсии выходного сигнала, вызванной гистерезисом реальной градуировочной характеристики, определяется по формуле

$$\gamma_{\Gamma}^2 = \frac{\sum_{i=0}^m ((k - k')x_i + (b - b'))^2}{12(m+1)k_n^2 x_b^2}$$

а погрешность гистерезиса как

$$\gamma_{\Gamma} = \frac{1}{k_n x_b} \frac{\sum_{i=0}^m ((k - k')x_i + (b - b'))^2}{12(m+1)}$$

4. Определение случайной погрешности, возникающей при рассеивании реализации реальной функции преобразования относительно реальной градуировочной характеристики в лабораторных условиях.

4.1. Определить параметры аппроксимирующих прямых для прямых ветвей каждого  $j$  – го цикла градуировки:

$$k_j = \frac{(m+1) \sum_{i=0}^m (y_{ji} x_i) - \sum_{i=0}^m y_{ji} \sum_{i=0}^m x_i}{(m+1) \sum_{i=0}^m x_i^2 - (\sum_{i=0}^m x_i)^2}$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=0}^m y_{ji} \sum_{i=0}^m x_i^2 - \sum_{i=0}^m (y_{ji} x_i) \sum_{i=0}^m x_i}{m+1 \sum_{i=0}^m x_i^2 - (\sum_{i=0}^m x_i)^2}$$

где  $y_{ji}$  – значение выходного сигнала в  $j$  – м цикле градуировки в  $i$ -й точке градуировочной характеристики.

4.2. Найти дисперсии значений  $k_j$  и  $b_j$  по всем шкалам градуировки:

$$D(b) = \sum_{j=1}^n \frac{(b_j - M_b)^2}{n-1}; \quad D(k) = \sum_{j=1}^n \frac{(k_j - M_k)^2}{n-1},$$

где  $M_b$ ,  $M_k$  – средние значения начального уровня и коэффициента преобразования,  $M_b = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j$ ,  $M_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j$ .

4.3. Определить приведенную аддитивную погрешность

$$\gamma'_0 = \frac{\sqrt{D(b)}}{k_H x_B}$$

4.4. Определить относительную мультипликативную погрешность

$$\gamma'_K = \frac{\sqrt{D(k)}}{M_k}$$

4.5. Определить приведенную погрешность.

$$\gamma_{\text{пр}} = \gamma'_k + \gamma'_0$$

4.6. Полученные значения по пп. 4.1-4.5 занести в табл. П 2.

Таблица П 2

Циклы	$B_1$	$K_1$	$M_b$	$M_k$
1				
2				
3				
...				
n				

4.7. Сравнить полученные значения аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности. Сделать выводы.

### Обработка данных на персональном компьютере

Включите компьютер, дождитесь окончания тестирования и появления на экране монитора стандартной панели операционной среды "Norton Commander".

Найдите в корневом каталоге директорий LABA и войдите в этот директорий. Подведите указатель курсора к программе SILA.EXE и запустите эту программу, нажав клавишу ENTER.

Перед вами появится "обложка" программы. Внимательно ознакомьтесь с рекомендациями к работе, которая появится на экране. Затем по нажатию клавиши "ПРОБЕЛ" вы начнете расчет. Вам необходимо заполнить появившуюся на экране таблицу. Следует помнить, что значения перемещения вводятся в миллиметрах и по возрастанию, а сопротивления, измеренные в ходе выполнения опыта для прямого и обратного хода, вводятся в омах.

Дробная часть вводимых значений отделяется от целой части десятичной точкой. Ввод каждого значения сопротивления или перемещения

всегда завершается нажатием клавиши ENTER. После ввода последнего значения, нажав клавишу ENTER, вы получите среднее значение сопротивления прямого и обратного хода, которое высвечивается в двух правых колонках. Нажав клавишу "ПРОБЕЛ", вы получите внешний вид характеристики преобразования датчика перемещения, полученный по экспериментальным данным и аппроксимируемой прямой вида

$$y = Kx + B,$$

значение  $K$  и  $B$  выводятся на экран. По нажатию клавиши "ПРОБЕЛ" появится таблица со значениями погрешности аппроксимации датчика. Повторное нажатие на клавишу "ПРОБЕЛ" вызывает окончание работы программы и после этого вновь появляется стандартная панель среды "Norton Commander". Результат расчета и определения погрешности выводится в файл DATCHI.RES, который можно вывести на печать.

**Примечание:** Ввиду сложности технической реализации в файле результатов не приводятся графики характеристик преобразования. Характеристики строятся вручную по полученным  $K$  и  $B$ .

### Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения тензорезисторных датчиков силы (ТРС).
2. Конструкции и свойства тензорезисторов.
3. Схемы включения тензорезисторных датчиков силы.
4. Методы уменьшения аддитивных и мультипликативных погрешностей ТРС.
5. Конструкции ТРС, используемого в лабораторной работе.
6. В чем причина различия характеристик преобразования прямого и обратного хода?
7. Методы определения погрешности нелинейности ТРС.
8. Методы измерения случайной погрешности ТРС.
9. Определение погрешности гистерезиса.
10. Метод расчета приведенной аддитивной, относительной мультипликативной и полной погрешности ТРС.

### Библиографический список

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.:Машиностроение, 1979. – 480 с.
2. Строганов М.П., Арбузов В.П., Сазонов В.В. Алгоритмы и программы обработки экспериментальных данных: Метод. указания к лаб. работам. – Пенза : Пенз. политех. ин-т, 1987. –22с.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА СИЛЫ**

Методические указания к лабораторной работе

Составитель *Гречишников Владимир Михайлович*

Редактор Т.К. Кретинина  
Компьютерная верстка О.А. Ананьев

Лицензия ЛР № 020301 от 30.12.96 г.

Подписано в печать 27.11.2001. Формат 60×84 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,5. Усл. кр.-отт. 0,6. Уч.-изд. л. 0,75.

Тираж 100 экз. Заказ *119*. Арт. С-3(Д4)/2001.

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического  
университета. 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.