

## Компенсация погрешностей тензометрического силоприемного элемента в условиях воздействия на него тангенциальных нагрузок

Приведено решение задачи компенсации погрешностей тензометрического силоприемного элемента, возникающих в условиях воздействия тангенциальных нагрузок в процессе определения веса объекта при его перемещении по измерительной платформе весоизмерительной системы.  
**силоприемный элемент, измерительная платформа, вектор силы, погрешность**

Определение веса объектов во время их движения является важной частью различных технологических процессов во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. При перемещении объекта через измерительную платформу на тензометрические силоприемные элементы (СПЭ) помимо веса  $G$  объекта взвешивания действует дополнительная сила  $F$ , вызванная колебаниями центра массы объекта вдоль осей координат и носящая динамический характер. Эта сила достигает значения 20...30% и является причиной возникновения погрешности измерения в процессе определения веса движущегося объекта. Поэтому основным узлом, определяющим основную погрешность измерения весоизмерительных устройств, является тензометрический силоприемный элемент. Анализ возникающих в силоприемном элементе погрешностей и поиск путей их минимизации занимает важное место в процессе разработки высокоточных динамических весоизмерительных систем.

**Анализ исследований и публикаций.** Механизм преобразования силы  $F$  в электрический сигнал имеет вид:

$$F \rightarrow G_{ij} \rightarrow \epsilon_{ij} \rightarrow \Delta R_{ij} \rightarrow \Delta K, \quad (1)$$

где  $F = mg$ ;

$G_{ij}$  - поле механических напряжений в теле упругого элемента (УЭ);

$\epsilon$  - поле деформации поверхности УЭ;

$\Delta R_{ij}$  - изменение сопротивлений тензорезисторов моста;

$K$  - коэффициент передачи тензодатчика;

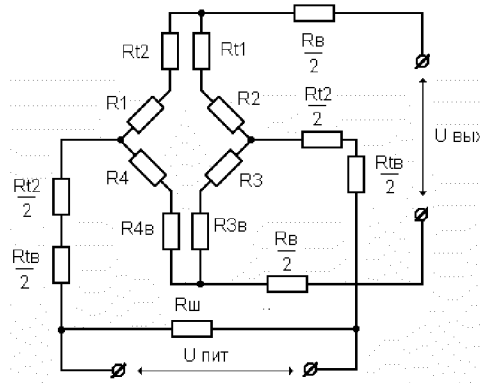
Коэффициент передачи по напряжению  $K$  мостовой схемы СПЭ (рис. 1) определяется выражением:

$$K = \left[ \frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \cdot \frac{\xi R_i \pm R_8 \pm R_{t1}}{R_0} \right) + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\Delta R_i}{R_0} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{4g} + t_2)}{R_0} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta R_i = R_i S_i \epsilon_i$  - приращение сопротивления  $R_i$  плеч моста, вызванное деформацией  $\epsilon_i$  упругого элемента,

$\xi R_i$  - отклонение сопротивления плеч моста от номинального значения  $R_0$ .

Знаки  $\pm$  означают, что резисторы  $R_{t2}$ ,  $R_{t1}$ , включенные в плечо моста, определяются при регулировании датчика [1].



$R_1 - R_4$  тензорезисторы плеч моста;  $R_{t1}$ ,  $R_{t2}$  - резисторы регулировки температурного изменения начального коэффициента передачи НКП и рабочего коэффициента передачи РКП соответственно;  $R_в$ ,  $R_ш$  - резисторы регулировки выходного и входного сопротивления

Рисунок 1 - Электрическая схема СПЭ

Выражение (2) имеет четыре слагаемых, имеющих различный физический смысл:

- начальный коэффициент передачи моста НКП при нормальных условиях  $K_0$ ,
- температурные изменения НКП  $\Delta t[K_0]$ ,
- рабочий коэффициент передачи моста РКП при нормальных условиях  $\Delta K$ ,
- температурные изменения РКП  $\Delta t[\Delta K]$ :

$$K = K_0 + \Delta t \cdot [K_0] + \Delta K + \Delta t \cdot [\Delta K],$$

$$K_0 = \frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} + 1 \cdot \frac{\xi R_i}{R_0} \pm \frac{R_8}{R_0} \pm \frac{R_{0t1}}{R_0} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{4\theta} + t_2)}{R_0} \right],$$

$$\Delta t[K_0] = \frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \beta_i \pm R_{0t1} / R_0 \cdot \beta_{t1} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{4\theta} + t_2)}{R_0} \right],$$

$$\Delta K = \Delta K_M \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{4\theta} + t_2)}{R_0} \right],$$

$$\Delta t[\Delta K] = \Delta K \cdot \left[ \frac{\alpha - R_{0t2}}{(R_{4\theta} - R_{0t2}) \cdot \Delta t} \right],$$

$$\Delta K_M = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} S_i \cdot \epsilon_i. \quad (3)$$

Через  $\Delta K_M$  обозначен РКП мостовой схемы при равных нулю значениях сопротивлений регулировочных резисторов ( $R_{4в} = R_{12} = 0$ );

$\Delta t$  - отклонение фактической температуры ТДС от температуры при нормальных условиях работы;

$\alpha$  - температурный коэффициент модуля Юнга для упругих элементов сжатия и изгиба и модуль сдвига для упругого элемента УЭ сдвига;

$R_{011}, R_{012}$  - сопротивления соответствующих резисторов при нормальных условиях [1].

Техническими условиями и стандартами на ТДС нормируются все слагаемые выражения (3), входные  $R_{вх}$  и выходные  $R_{вых}$  сопротивления. Кроме того, в соответствии с [2] нормируются такие метрологические параметры, как категория точности датчика и систематическая составляющая погрешности.

**Постановка задачи.** Существуют строгие ограничения на величину угла приложения силы к силоприемному элементу в пределах  $1^\circ$  [1,2]. Для компенсации влияния на СПЭ тангенциальной составляющей силы  $F$ , возникающей при перемещении объекта взвешивания по измерительной платформе, необходимо значительно усложнить кинематическую схему измерительной платформы, что совместно с использованием датчиков высокого класса точности приводит к экономической неэффективности широкого использования подобных систем. Поскольку параметры механической части СПЭ непосредственно влияют на параметры измерительного моста, то анализ причин, порождающих погрешности в выходном сигнале датчика, следует производить комплексно, как систему «упругий элемент  $\rightarrow$  измерительный мост», что позволит разработать метод компенсации погрешностей СПЭ, вызванных тангенциальными нагрузками.

**Основная часть.** Анализ разложения векторов сил, действующих на СПЭ (рис. 2) показал, что векторы приложения сил к СПЭ значительно (до  $90^\circ$ ) превышают ограничение, установленное ТУ [1].

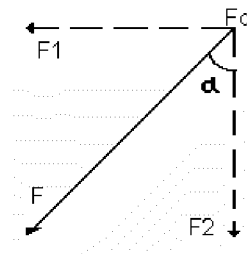


Рисунок 2 - Разложение силы  $F_0$  на векторы  $F_1$  и  $F_2$  при  $\alpha > 1^\circ$

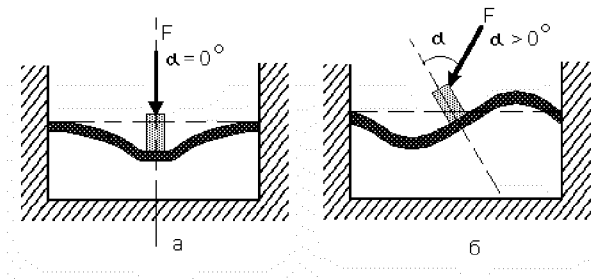
Поскольку точность преобразования силы  $F_0$  в электрический сигнал обусловлена углом приложения силы к СПЭ, в различных конструктивных решениях проблемы [3] используются промежуточные рычаги, передаточные звенья, балансиры и т.д. в целях преобразования направления векторов приложения сил в единый вектор. При этом значительно усложняется конструкция измерительной платформы, возрастает ее стоимость, снижается надежность в эксплуатации. Расчеты показали, что при максимальной деформации СПЭ перемещение измерительной платформы не должно превышать 3 мкм. Очевидно, что механические передаточные звенья измерительной платформы не в состоянии обеспечить преобразование составляющих векторов приложения сил в единый вектор с достаточной точностью.

Следовательно, проблема повышения достоверности результатов определения веса объекта в процессе его перемещения по измерительной платформе не может быть решена механическими средствами. Для решения этой проблемы нами были проведены исследования причин возникновения погрешностей в СПЭ. Основной причиной

возникновения погрешностей является разложение силы  $F_0$  на составляющие векторы  $F_1$  и  $F_2$ , в связи с чем деформация СПЭ осуществляется несимметрично относительно центральной оси (рис. 2). При этом выходной сигнал датчика определяется равнодействующей сил  $F$ , а сила  $F_0$  разлагается на составляющие векторы  $F_1$  и  $F_2$  [4], где:

$$F_1 = F \cos \alpha; F_2 = F \sin \alpha; F_0 = F_1 + F_2; F = (F_1^2 + F_2^2)^{0,5}. \quad (4)$$

Процесс возникновения погрешностей СПЭ, обусловленных нарушением симметрии осей деформации упругих элементов (УЭ) показан на рис. 3.



а) симметричная деформация СПЭ, б) асимметричная деформация СПЭ

Рисунок 3 – Деформация СПЭ при различных углах приложения вектора силы  $F$

Рассмотрим электрическую схему СПЭ и реакцию тензорезисторов моста на воздействие неколлинеарных векторов приложенной силы  $F_0$  (рис. 4):

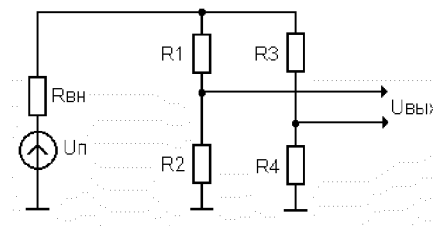


Рисунок 4 – Измерительный мост СПЭ

Коэффициент передачи моста по напряжению определяется выражением (2).

При этом  $U_{вых} = KU_n$ , где  $U_n$  - напряжение питания моста.

Рассмотрим одно плечо измерительного моста СПЭ питаемое стабильным напряжением  $U_n$  (рис.5):

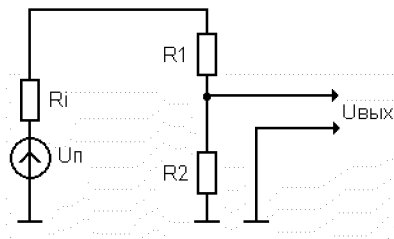


Рисунок 5 - Плечо измерительного моста СПЭ, питаемое стабильным напряжением  $U_n$

При отсутствии деформации в УЭ выходное напряжение СПЭ  $U_{вых}$  определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}. \quad (5)$$

При деформации УЭ под действием силы  $F_0$  выходное напряжение СПЭ  $U_{(\partial)\text{вых}}$  определяется выражением:

$$U_{(\partial)\text{вых}} = \frac{U_n \cdot (R_2 \pm \Delta R_2)}{R_1 \pm \Delta R_1 + R_2 \pm \Delta R_2}. \quad (6)$$

Если по абсолютной величине  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ , то выходной сигнал свободен от погрешностей и стабильность  $U_{(\partial)\text{вых}}$  определяется стабильностью  $U_n$ . Поэтому к стабильности  $U_n$  предъявляются высокие требования, выполнение которых приводит к усложнению электрической схемы устройств, но погрешности ТДС, выраженные неравенством:  $\Delta R_{i1} \neq \Delta R_{i2}$ , остаются постоянными.

Результаты исследований показали, что, если от стабилизации напряжения питания моста  $U_n$  перейти к стабилизации тока  $I_n$ , питающего мост, то произойдет компенсация погрешности, вызванной неравенством величин изменения сопротивлений резисторов плеч моста  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ . Компенсация погрешности происходит вследствие изменения внутреннего сопротивления источника тока  $R_{\text{вн}}$ , пропорционально изменению сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  плеча моста, в связи с чем соответствующим образом изменяется выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Так как выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  изменяется со знаком, обратным знаку напряжения погрешности  $U_{\text{погр}}$ , то происходит ее компенсация. То есть, все нелинейные изменения сопротивления тензорезисторов плеча моста происходят во внутреннем сопротивлении  $R_{\text{вн}}$  источника тока  $I_n$ . Точно таким же образом происходит компенсация погрешностей, обусловленных неравенством изменения сопротивлений тензорезисторов моста, вызванных влиянием окружающей среды (рис. 6):

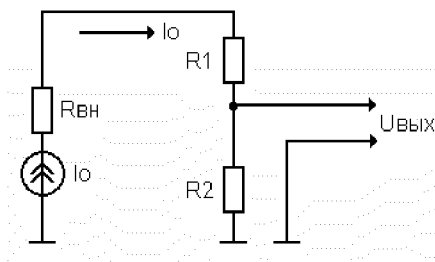


Рисунок 6 - Плечо моста СПЭ, питаемое источником стабильного тока  $I_0$

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = I_0 R_2. \quad (7)$$

Величина тока, питающего мост:

$$I_0 = \frac{U_n}{R_{\text{нл}} + R_{\text{вн}}}, \quad (8)$$

где  $R_{\text{нл}} = R_1 + R_2$ .

В идеальном случае, при воздействии силы  $F$  упругий элемент подвергается деформации и происходят следующие изменения электрических величин:

$$\begin{aligned}
R1(\partial) &= R1 - \Delta R1; \\
R2(\partial) &= R2 + \Delta R2; \\
R_{пл}(\partial) &= R_{пл} = \text{const}; \\
I_0(\partial) &= I_0; \\
U_{вых} &= U_{вых} + \Delta U(\partial),
\end{aligned}
\tag{9}$$

где  $R_1, R_2$  – сопротивление резисторов при деформации;  
 $I_0$  – ток, протекающий через плечо моста,  
 $\Delta U(\partial) = I_0 \cdot (\Delta R1 + \Delta R2)$ .

В случае, когда  $\Delta R1 < \Delta R2$ , в выходном сигнале  $U_{вых}$  появляется напряжение погрешности  $U_{погр}$ :

$$U_{погр} = I_0 \cdot (\Delta R2 - \Delta R1) = I_0 \cdot R_{погр} . \tag{10}$$

То есть, сопротивление плеча моста увеличивается на величину  $R_{погр}$ :

$$R_{пл}(\partial) = R_{пл} + R_{погр} . \tag{11}$$

Следовательно, происходит изменение тока  $I_0$  в сторону уменьшения на величину  $I_{погр} = I_1(\partial) - I_0(\partial)$ . Восстановление равенства:  $I_0(\partial) = I_0$  на величину  $I_{погр}$  приводит к полной компенсации напряжения погрешности  $U_{погр}$ :

$$U_{комп} = I_{погр} \cdot R_{погр} . \tag{12}$$

Аналогичный процесс происходит и в случае, если  $\Delta R1 > \Delta R2$ .

В ряде случаев бывает необходимо выделить сигнал погрешности из суммарного сигнала  $U_{вых}$  СПЭ с целью качественной оценки характеристик весоизмерительной платформы, проведения тестирования и исследования протекающих процессов. В частности, выделение напряжения погрешности позволяет определить составляющие векторы приложения силы  $F_0$  по осям  $F_x, F_y, F_z$ . В этом случае питание моста СПЭ должно осуществляться напряжением стабильного уровня  $U_n$ . Разработанная нами схема, реализующая способ выделения сигнала  $U_{погр}$  приведена на рис.7:

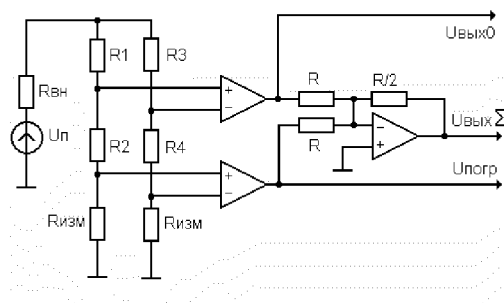
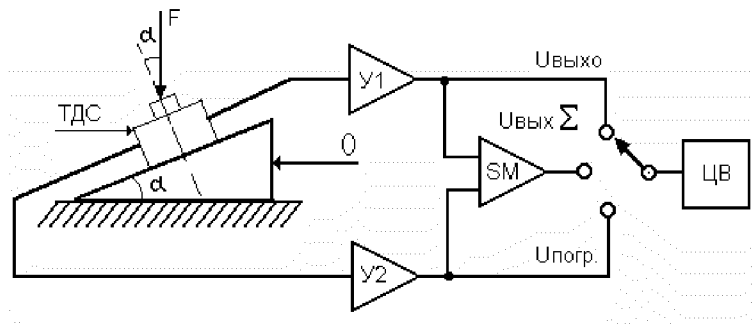


Рисунок 7 - Выделение сигнала погрешности  $U_{погр}$  в СПЭ

Данная схема (рис. 7) использовалась нами в измерительном стенде (рис. 8) для определения зависимости выходного напряжения  $U_{вых0}$  и сигнала погрешности  $U_{погр}$  от величины приложенной силы  $F$  и угла ее приложения  $\alpha$ .



*О* - основание, служит для установки угла приложения силы; *ТДС* - тензодатчик силы (СПЭ);  
*F* – сила;  $\alpha$  - угол между осью ТДС и вектором приложения силы *F*; *U1, U2* - усилители сигнала  
*U<sub>вых</sub>*, *U<sub>погр.</sub>*; *SM* – сумматор; *ЦВ* - цифровой вольтметр.

Рисунок 8 - Схема стенда для определения зависимостей вида  $U = F(\alpha)$  СПЭ

В качестве нагрузки использовались грузы весом 5, 10, 15 и 20 кг. Угол приложения силы составлял 0°, 15°, 30° и 45°. Анализ результатов показал, что схема компенсации погрешностей (рис. 7) обеспечивает линейную передаточную характеристику ТДС при изменении угла приложения силы *F* в пределах 0° ... 30°.

**Выводы.** Установлено, что при питании измерительного моста СПЭ стабильным током, компенсация *U<sub>погр.</sub>* происходит на внутреннем сопротивлении источника тока *R<sub>вн.</sub>*. Таким образом, решена задача компенсации погрешности тензометрического силоприемного элемента, вызванной воздействием тангенциальной нагрузки, что дало возможность расширить угол приложения вектора силы *F* к СПЭ от 1° до ± 30° и позволило упростить конструкцию измерительной платформы динамической весоизмерительной системы для определения веса объекта в движении.

## Список литературы

1. Датчики силоизмерительные тензорезисторные 1778 ДСТ.. К АЖЕ 2.320.005.ТО.
2. ГОСТ 1507778 Датчики силоизмерительные тензорезисторные.
3. Годзиковский В.А. Расчет основных конструктивных параметров и помехоустойчивости при проектировании тензорезисторных датчиков силы. В кн. "Современные проблемы развития испытательных машин, весоизмерительной и силоизмерительной техники под ред. Ю.М. Сергиенко / В.А. Годзиковский. - М.: НИКИМП, 1978. - С. 81-96.
4. Яворский Б.М. Справочное руководство по физике / Б.М. Яворский, Ю.А. Селезнев. - М.: Наука, 1975. - 624 с.

*Н. Смірнова, В. Смірнов*

**Компенсація погрішностей тензометричного сілоприємного елемента в умовах впливу на нього тангенціальних навантажень**

Приведено рішення задачі компенсації похибок тензометричного сілоприємного елемента, що виникають в умовах впливу тангенціальних навантажень в процесі визначення ваги об'єкта при його переміщенні по вимірвальній платформі ваговимірвальній системі.

*N. Smirnova, V. Smirnov*

**Tensometrical load cell drift compensation in impact on it of tangential loads**

The problem load cell drift compensation solution, resulting in conditions of the tangential loads in determining the weight of the object as it moves to the measuring platform weighing system submitted.

Получено 29.10.12