

УДК 531.7.08

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЁТ ИСКЛЮЧЕНИЯ
СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Скачек А.В., Соломахо В.Л., Цитович Б.В., Скачек В.А., Шапарь В.А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Повышение точности работы систем автоматизированного взвешивания, как и любых других средств измерений и технологического оборудования, может достигаться за счёт выявления и исключения систематических погрешностей. Рассмотрены методы снижения влияния температурной погрешности и методики расчета термокомпенсационных элементов тензометрических мостов. (E-mail: vsolo@bntu.by)

Ключевые слова: упругий элемент, тензометрический мост, датчик, термокомпенсация.**Введение**

В системах автоматизированного взвешивания наиболее широко распространены тензометрические датчики. Простая технология изготовления, высокая чувствительность и возможность обеспечить требуемую точность измерения при относительно низкой стоимости обусловили широкое распространение таких датчиков. Их основные недостатки – изменение начального коэффициента передачи (НКП) и рабочего коэффициента передачи (РКП) при изменении температуры [1, 2].

Целью работы являлась разработка методики дифференцированного подхода к аппаратурной компенсации систематических погрешностей, возникающих при изменении температуры окружающей среды.

Обозначим температуру, воздействующую на упругий элемент, – T_1 , на тензометрический мост – T_2 . Влияние T_1 на материал упругого элемента вызывает изменение модуля упругости материала (модуля Юнга). Влияние T_2 на тензометрический мост (на тензорезисторы и клеевой слой) приводит к изменениям измерительного сигнала, которые затруднительно оценить аналитически из-за сложности создания строгой модели.

Способы компенсации температурных погрешностей

В связи с тем, что погрешности, вызываемые рассматриваемыми влияющими величинами, при

закономерном изменении температуры имеют систематический характер, соответствующий тенденции функционального изменения температуры, принципиально возможна их компенсация. Стохастические колебания температуры в данном случае не рассматриваются.

Один из распространенных способов компенсации температурных погрешностей заключается в том, что в состав тензорезисторного моста включают дополнительные термочувствительные, расположенные непосредственно в зоне деформации элементы. Такая компенсация позволяет снизить погрешности до значения $0,1\% / 10^\circ\text{C}$.

Существенным недостатком способа является значительная нелинейность зависимости напряжения на эмиттерном переходе транзистора от температуры, что приводит к снижению точности компенсации.

Второй способ компенсации [3] предполагает включение в электрическую цепь датчика дополнительных терморезисторов. С учетом этого полная схема тензометрического моста имеет вид, представленный на рисунке 1.

Предлагается методика компенсации температурных влияний, включающая две составляющие: компенсацию температурного изменения модуля Юнга, т.е. изменения РКП, и компенсацию температурного изменения сопротивления тензорезисторов, т.е. изменения НКП. Важную роль в обеспечении качественной компенсации температурных погрешностей играет последовательность проведения этапов опреде-

ления значений сопротивлений терморезисторов R_{t1} и R_{t2} .

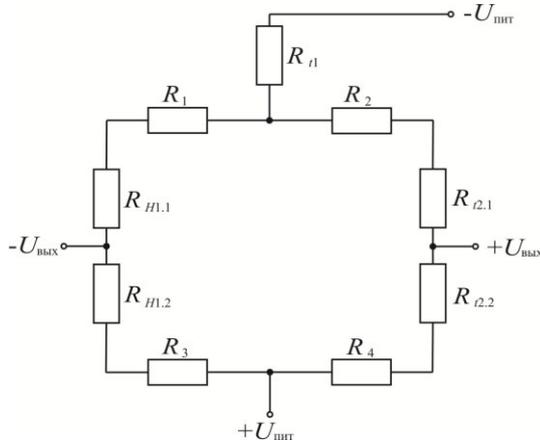


Рисунок 1 – Полная схема тензометрического моста: R_1 – R_4 – тензорезисторы; R_{t1} – терморезистор, компенсирующий температурную зависимость рабочего коэффициента передачи; R_{t2} – терморезистор, компенсирующий температурную зависимость начального коэффициента передачи; $R_{н1}$ – резистор, предназначенный для нормирования начального коэффициента передачи по величине

Наиболее простой является методика последовательного определения значения сопротивления сначала для компенсации НКП, затем – РКП.

Для расчета компенсационного терморезистора для НКП необходимо принять в качестве исходных данных равенство значений сопротивлений тензорезисторов моста и рассмотреть тензометрический мост как два делителя напряжения.

Если делители имеют одинаковую погрешность коэффициентов деления, то НКП равен нулю. Если же эти погрешности отличаются друг от друга, то значение НКП будет отличаться от нуля.

Коэффициенты деления первого и второго делителей равны соответственно:

$$K_{д1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad K_{д2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4},$$

где $K_{д1}$ и $K_{д2}$ – коэффициенты деления первого и второго делителей.

В связи с разностью температурного коэффициента сопротивления (ТКС) тензорезисторов делители напряжения имеют разные значения температурных коэффициентов отношения (ТКО) – температурных изменений коэффициента деления. Таким образом, температурная

погрешность НКП зависит от разности значения ТКО первого и второго делителей.

ТКО есть разность значений ТКС тензорезисторов, входящих в делитель.

Обозначим ТКС – τ_c , ТКО – τ_o , НКП – γ_n , РКП – γ_p .

Тогда τ_o делителей определяются по формулам:

$$\tau_{o1} = \tau_{c_{R2}} - \tau_{c_{(R1+R2)}}, \quad \tau_{o2} = \tau_{c_{R3}} - \tau_{c_{(R3+R4)}}$$

Так как значения сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 принимаем равными друг другу, то τ_c суммарных сопротивлений $R_1 + R_2$ и $R_3 + R_4$ будут равны:

$$\tau_{c_{R1+R2}} = 0,5\tau_{c_{R1}} + 0,5\tau_{c_{R2}},$$

$$\tau_{c_{R3+R4}} = 0,5\tau_{c_{R3}} + 0,5\tau_{c_{R4}}.$$

Тогда τ_o делителей равны:

$$\tau_{o1} = 0,5(\tau_{c_{R2}} - \tau_{c_{R1}}), \quad \tau_{o2} = 0,5(\tau_{c_{R3}} - \tau_{c_{R4}}),$$

Отсюда разность τ_o равна:

$$\Delta\tau_{o1} = 0,5(\tau_{c_{R2}} - \tau_{c_{R1}}) - 0,5(\tau_{c_{R3}} - \tau_{c_{R4}}).$$

Таким образом, задача компенсации сводится к приведению значения $\Delta\tau_o$ к нулю путем добавления терморезистора с известным значением τ_c к одному из резисторов:

$$0,5(\tau_{c_{R2}} - \tau_{c_{R1+\Delta}}) - 0,5(\tau_{c_{R3}} - \tau_{c_{R4}}) = 0,$$

$$0,5(\tau_{c_{R2}} - \tau_{c_{R1}}) - 0,5\Delta - 0,5(\tau_{c_{R3}} - \tau_{c_{R4}}) = 0,$$

$$-0,5\Delta + \tau_o = 0, \quad \Delta = 2\Delta\tau_o.$$

Отсюда следует, что для компенсации температурной погрешности двух делителей напряжения необходимо увеличить значение τ_c резистора в одном из плеч моста на величину, равную удвоенному значению разности τ_o этих делителей.

Проведя аналогичные преобразования для других резисторов, получаем такие же результаты за исключением знака. Физический смысл проведенных вычислений можно интерпретировать следующим образом.

Компенсацию положительных значений $\Delta\tau_0$ можно осуществлять, увеличивая значение τ_c резистора R_1 (при этом уменьшается τ_0 первого делителя) или τ_c резистора R_3 (при этом увеличивается τ_0 второго делителя).

Компенсация отрицательных значений $\Delta\tau_0$ достигается увеличением значения τ_c резистора R_2 или увеличением τ_c резистора R_4 .

Определим, каким образом изменение γ_H при изменении температуры связано с разностью значений τ_0 двух делителей. За начальную температуру примем температуру 20°C . При температуре 20°C γ_H будет равен: $\gamma_H = U_{\text{пит}}(K_{d1} - K_{d2})$, а при температуре t — $\gamma_{Ht} = U_{\text{пит}}(K_{d1}t - K_{d2}t)$, где $K_{d1}t$ и $K_{d2}t$ — коэффициенты деления первого и второго делителей при температуре t соответственно.

Тогда изменение γ_H при изменении температуры равно:

$$\gamma_H - \gamma_{Ht} = U_{\text{пит}}(K_{d1} - K_{d2}) - U_{\text{пит}}(K_{d1}t - K_{d2}t).$$

Запишем значения коэффициентов деления при температуре t через их τ_0 :

$$K_{d1}t = K_{d1} + K_{d1} \cdot \tau_{01} \cdot (t - 20),$$

$$K_{d2}t = K_{d2} + K_{d2} \cdot \tau_{02} \cdot (t - 20).$$

После подстановки и преобразования получаем:

$$\frac{\text{НКП}t - \text{НКП}}{U_{\text{пит}}(t - 20)} = K_{d1} \cdot \tau_{01} - K_{d2} \cdot \tau_{02}.$$

Запишем коэффициенты деления через их номинальные значения и погрешности, исходя из того, что:

$$qK_d = \frac{K_d - K_{дн}}{K_{дн}},$$

где qK_d — погрешность коэффициента деления; K_d — действительное значение коэффициента деления; $K_{дн}$ — номинальное значение коэффициента деления.

Тогда:

$$\frac{\gamma_{Ht} - \gamma_H}{U_{\text{пит}}(t - 20)} = K_{дн}[(1 + qK_{d1}) \cdot \tau_{01} - (1 + qK_{d2}) \cdot \tau_{02}].$$

Разделив обе части равенства на $K_{дн}$, получаем:

$$\frac{\gamma_{Ht} - \gamma_H}{U_{\text{пит}}(t - 20)K_0} = (1 + qK_{d1}\tau_{01} - (1 + qK_{d2}) \cdot \tau_{02}$$

Так как при равенстве сопротивлений резисторов $K_{дн} = 0,5$ и оба множителя при τ_0 незначительно отличаются от единицы, то можно записать формулу для разности $\Delta\tau_0$:

$$\Delta\tau_0 = \frac{\gamma_{Ht} - \gamma_H}{0,5U_{\text{пит}} \cdot \Delta t}.$$

Определим теперь значение сопротивления компенсирующего резистора. Необходимо, чтобы после последовательного соединения терморезистора с основным резистором суммарное значение τ_c увеличилось на $2\Delta\tau_0$, т.е.:

$$\tau_{c_{(R_0+R_{t2})}} - \tau_{c_{R_0}} = 2\Delta\tau_0,$$

где R_0 и R_{t2} — сопротивления тензорезистора и терморезистора соответственно.

В связи с тем, что значение τ_c суммы резисторов равно сумме значений этих τ_c , взятых со своими весовыми коэффициентами, определяющими, какую долю в общем сопротивлении занимает соответствующий резистор, можно записать:

$$\frac{R_0}{R_0 + R_{t2}} \cdot \tau_{c_{R_0}} + \frac{R_{t2}}{R_0 + R_{t2}} \cdot \tau_{c_{R_{t2}}} - \tau_{c_{R_0}} = 2\Delta\tau_0.$$

Решив это уравнение относительно R_{t2} , получаем:

$$R_{t2} = \frac{R_0 \cdot 2 \cdot \Delta\tau_0}{\tau_{c_{R_{t2}}} - 2 \cdot \Delta\tau_0 - \tau_{c_{R_0}}}.$$

В данном выражении присутствует неизвестное значение $\tau_{c_{R_0}}$. Однако, если выполняется неравенство $\tau_{c_{R_{t2}}} - 2\Delta\tau_0 \gg \tau_{c_{R_0}}$, то значением $\tau_{c_{R_0}}$ можно пренебречь.

Вторым этапом является расчет терморезистора для компенсации температурных изменений γ_p .

Так как выходной сигнал тензометрического моста прямо пропорционален напряжению питания, то, если при повышении температуры значение тока в цепи будет снижаться, это будет компенсировать увеличение выходного сигнала. Снижения тока в тензометрическом мосте при увеличении температуры можно до-

биться включением последовательно с мостом в цепь питания терморезистора, сопротивление которого увеличивается при увеличении температуры.

Математически уравнение компенсации можно записать в виде:

$$\frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{вх}} + R_{t1}} \Big|_t - \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{вх}} + R_{t1}} \Big|_{20} = - \frac{\gamma_{Pt} - \gamma_{P20}}{\gamma_{P20}}$$

Так как тензорезисторы изготавливаются из константановой фольги с низким значением температурного коэффициента сопротивления, то степень влияния τ_c на изменение γ_p существенно меньше степени влияния температурного коэффициента линейного расширения и, поэтому, для упрощения расчетов можно принять, что при изменении температуры значение $R_{\text{вх}}$ не меняется.

Сопротивление терморезистора при температуре t можно записать в виде:

$$R_{t1} = R_{t1} + R_{t1} \cdot \tau_{cRt1} \cdot (t - 20),$$

где τ_{cRt1} – температурный коэффициент сопротивления терморезистора.

Решая теперь уравнение компенсации относительно R_{t1} , получим:

$$R_{t1} = \frac{R_{\text{вх}} \cdot (\gamma_{Pt} - \gamma_{P20})}{\gamma_{P20} \cdot (1 + 2\tau_{cRt1} \cdot \Delta t) - \gamma_{Pt} \cdot (1 + \tau_{cRt1} \cdot \Delta t)}$$

Однако у приведенной выше методики есть ряд недостатков:

- начальная термокомпенсация γ_H путем добавления в одно из плеч моста дополнительного терморезистора с высоким τ_c приводит к искажению получаемой в процессе термокомпенсации γ_p информации. Это связано с тем, что при колебании температуры происходит изменение как модуля Юнга, так и сопротивления ТМ, что ведет к возникновению погрешности расчета компенсирующего резистора R_{t1} и, следовательно, к неполной компенсации;
- в свою очередь термокомпенсация γ_p приводит к тому, что терморезистор R_{t1} оказывает влияние на температурное изменение γ_H : при уменьшении тока в цепи происходит изменение как самого γ_H , так и его дрейфа. При этом, когда существует небольшой положи-

тельный дрейф γ_H , терморезистор R_{t1} , уменьшая при возрастании температуры ток в ТМ, уменьшает и γ_H , и его дрейф, оказывая, таким образом, положительное влияние. Когда присутствует небольшой отрицательный дрейф γ_H , терморезистор R_{t1} еще более его увеличивает, ухудшая характеристики датчика.

Такая методика позволяет довести уровень компенсации температурной погрешности датчика до значения 0,05 %/10 °С.

Для датчиков, к которым предъявляются более жесткие требования по точности, необходимо использовать методику, основанную на начальной компенсации РКП с последующей компенсацией γ_H .

На первом этапе производится расчет резистора R_{t1} (рисунок 2), компенсирующего температурные изменения γ_p , и соответствующий резистор устанавливается в цепь питания.

На втором этапе производится расчет резистора для компенсации температурного изменения НКП R_{t2} (рисунок 1), но уже с учетом терморезистора по γ_p .

Для расчета значения компенсирующего резистора по γ_p (R_{t1}) рассмотрим схему моста, приведенную на рисунке 2. В целях упрощения задачи можно сделать два допущения:

- для моста практически выполняется условие $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$;
- изменение γ_H можно представить так, как будто к одному из резисторов добавили терморезистор $R_{\text{вх}}$, изменение сопротивления которого и приводит к изменению γ_H .

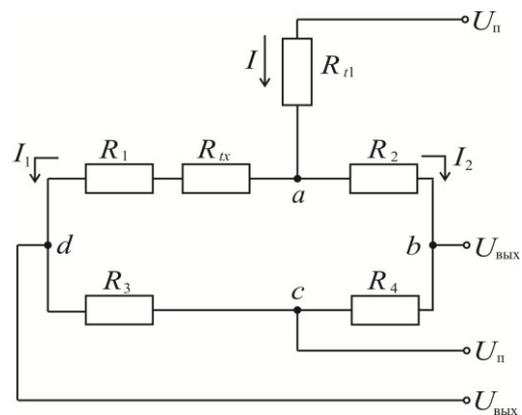


Рисунок 2 – Схема тензометрического моста с установленным резистором, компенсирующим рабочий коэффициент передачи

Суммарное входное сопротивление моста в этом случае определяется формулой:

$$R_{\text{вх}} = \frac{(R_{\text{тх}} + 2R) \cdot 2R}{R_{\text{тх}} + 4R} + R_{\text{т1}}$$

Тогда ток в цепи равен: $I = \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}}$. Напряжение в точке (а): $U_a = U_{\text{п}} - I \cdot R_{\text{т1}}$. Токи I_1 и I_2 соответственно равны:

$$I_1 = \frac{U_a}{R_{\text{тх}} + 2R}, \quad I_2 = \frac{U_a}{2R}$$

Тогда потенциалы в точках (d) и (b) равны:

$$U_d = U_a - I_1 \cdot (R_{\text{тх}} + R), \quad U_b = U_a - I_2 \cdot R$$

Таким образом, получаем выражение для $\gamma_{\text{Н}}$:

$$\gamma_{\text{Н}} = \frac{U_b - U_d}{U_{\text{п}}} = \frac{U_a - I_2 \cdot R - U_a + I_1 \cdot (R_{\text{тх}} + R)}{U_{\text{п}}}$$

После подстановки выражения для I_1 и I_2 и упрощения получаем:

$$\gamma_{\text{Н}} = \frac{R \cdot R_{\text{тх}}}{2R \cdot (R_{\text{тх}} + 2R) + R_{\text{т1}} \cdot (R_{\text{тх}} + 4R)}$$

Выразим $R_{\text{тх}}$:

$$R_{\text{тх}} = \frac{4R \cdot \gamma_{\text{Н}} \cdot (R + R_{\text{т1}})}{R - 2R \cdot \gamma_{\text{Н}} - R_{\text{т1}} \cdot \gamma_{\text{Н}}}$$

Для компенсации возникающего сопротивления $R_{\text{тх}}$ необходимо включить в смежное плечо моста компенсирующий резистор R_x , как показано на рисунке 3.

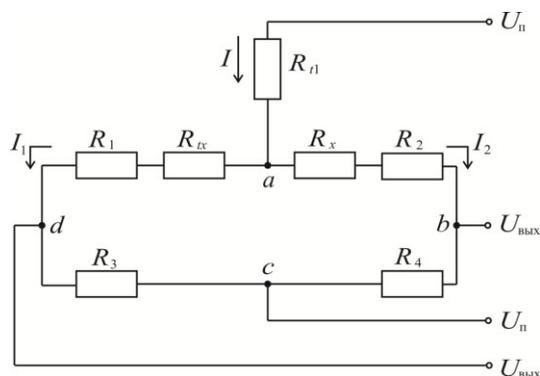


Рисунок 3 – Схема тензометрического моста с включенными компенсирующими резисторами по рабочему и начальному коэффициентам передачи

Для определения значения компенсирующего резистора R_x составим выражение для НКП:

$$\gamma_{\text{Н}} = \frac{2R \cdot (R_{\text{тх}} - R_x)}{R_x \cdot (2R + R_{\text{т1}}) + R_{\text{тх}} \cdot (2R + R_{\text{т1}}) + 2R \cdot (2R + 2R_{\text{т1}})}$$

Значение сопротивления резистора R_x определим из условия компенсации, которое заключается в равенстве значений $\gamma_{\text{Н}}$ при температуре 20°C (НКП₀) и повышенной температурах (НКП_t): $\gamma_{\text{Н}0} = \gamma_{\text{Н}t}$:

$$\frac{2R \cdot (R_{\text{тх}} - R_x)}{R_x \cdot (2R + R_{\text{т1}}) + R_{\text{тх}} \cdot (2R + R_{\text{т1}}) + 2R \cdot (2R + 2R_{\text{т1}})} = \frac{2R \cdot (R_{\text{тх}} - R_x \lambda)}{R_x \lambda (2R + R_{\text{т1}} \lambda) + R_{\text{тх}} \cdot (2R + R_{\text{т1}} \lambda) + 2R \cdot (2R + 2R_{\text{т1}} \lambda)}$$

где $\lambda = 1 + \alpha \cdot \Delta t$ – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления терморезистора при изменении температуры (α – температурный коэффициент сопротивления терморезистора); $R_{\text{тх}0}$, $R_{\text{тх}t}$ – значение сопротивления компенсирующего резистора при начальной температуре 20°C и повышенной температуре.

$$R_{\text{тх}0} = \frac{4R \cdot \gamma_{\text{Н}0} \cdot (R + R_{\text{т1}0})}{R - 2R \cdot \gamma_{\text{Н}0} - R_{\text{т1}0} \cdot \gamma_{\text{Н}0}}$$

$$R_{\text{тх}t} = \frac{4R \cdot \gamma_{\text{Н}t} \cdot (R + R_{\text{т1}} \cdot \lambda)}{R - 2R \cdot \gamma_{\text{Н}t} - R_{\text{т1}} \cdot \lambda \cdot \gamma_{\text{Н}t}}$$

Определив, таким образом, значение компенсирующего резистора $R_{\text{тх}}$, устанавливаем его в соответствующее плечо тензометрического моста.

Следует отметить, что приведенная методика предполагает использование базовой температуры окружающей среды. За такую температуру принимается температура, при которой производилось измерение сопротивления резистора $R_{\text{т1}}$. Поэтому все вычисленные значения сопротивлений компенсационных терморезисторов необходимо корректировать по температуре по формуле $R_{\text{тх}'} = R_{\text{тх}} \cdot \lambda$.

Вторая методика практически лишена недостатков первой, за исключением небольшого влияния на значение $\gamma_{\text{р}}$ резистора, предназначенного для компенсации $\gamma_{\text{Н}}$. Это влияние определяется добавлением к температурной зависимости мо-

дуля Юнга зависимости выходного сигнала от температуры из-за τ_c терморезистора. При этом температурная зависимость модуля Юнга является постоянной для каждого типа датчиков, и компенсировать ее можно по упрощенной методике, заключающейся в однократном измерении изменения γ_p и вычислении значения компенсирующего терморезистора, с последующим изготовлением терморезисторов с одинаковым сопротивлением на все датчики данного типа.

Приведенная методика позволяет уменьшить влияние температуры на γ_p до уровня 0,02 %/10 °С и на НКП до 0,05 %/10 °С, что является приемлемым уровнем для большинства технологических процессов, в которых применяются тензометрические датчики силы.

Заключение

Для повышения точности работы автоматизированных тензометрических систем дискретного дозирования необходимо проведение постоянного анализа и исключение систематических погрешностей измерений, в том числе, обусловленных колебаниями температуры в зоне измерения. С этой целью применяются специальные способы компенсации температурных воздействий.

Проанализирован метод термокомпенсации с включением $p-n$ перехода в цепь питания моста, осуществляемый путем включения в состав тензорезисторного моста дополнительных термочув-

ствительных, расположенных непосредственно в зоне деформации элементов. Установлено, что метод позволяет снизить температурную составляющую погрешности до уровня 0,1 %/10 °С. Дальнейшее снижение погрешности невозможно из-за значительной нелинейности зависимости напряжения на эмиттерном переходе транзистора от температуры.

Предложенный метод термокомпенсации с включением дополнительных терморезисторов в плечи тензометрического моста позволяет снизить температурную составляющую погрешности до уровня 0,05 %/10 °С. Такой метод компенсации целесообразно применять при незначительных колебаниях температур.

Применение цифровых программно-аппаратных способов может обеспечить более высокую точность компенсации температурных погрешностей.

Список использованных источников

1. Бауманн, Э. Измерение сил электрическими методами Э. Бауманн. – М. : Мир, 1978. – 383 с., ил.
2. Клокова, Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки / Н.П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с., ил.
3. Скачек, В.А. Цифровой тензометрический датчик силы / В.А. Скачек, А.В. Скачек, А.В. Сотцев // Материалы МНТК «Наука – образованию, производству, экономике». – Т. 1. – 2003.

Skachek A.V., Solomakho V.L., Tsitovich B.V., Skachek V.A., Shapar V.A.

Tolerance increase of automatic weight measuring systems on the basis of systematic error elimination

Rising of accuracy of automated weighting systems' functioning can be achieved by identifying and exclusion of systematic errors. Methods of reducing of temperature error's impact and design procedure of thermocompensation elements of strain-gauge bridges are considered. (E-mail: vsolo@bntu.by)

Key words: elastic element, tensometric bridge, gauge, temperature compensation.

Поступила в редакцию 19.02.2013.