ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
СОЮЗА ССР

ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

ГОСТ 21615—76

Издание официальное

МОСКВА—1976

gost.e-ecolog.ru

УДК 531.781.2.087.92.083(083.74) Группа П19

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

Методы определения характеристик

Strain Gages. Characteristics test methods

ГОСТ 21615—76

Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 3 марта 1976 г. № 540 срок действия установлен

с 01.01 1978 г.
до 01.01 1983 г.

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт распространяется на тензорезисторы и устанавливает методы определения следующих характеристик:

сопротивления тензорезистора при нормальной температуре (п. 3.1);

статической характеристики преобразования при нормальной температуре (п. 3.2);

чувствительности при нормальной температуре (п. 3.3);

механического гистерезиса при нормальной температуре (п. 3.4);

ползучести при нормальной температуре (п. 3.5);

часовой ползучести при нормальной температуре (п. 3.6);

ползучести при максимальной температуре (п. 3.7);

часовой ползучести при максимальной температуре (п. 3.8);

функции влияния температуры на чувствительность (п. 3.9);

значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной (минимальной) температуре (п. 3.10);

температурной характеристики сопротивления (п. 3.11);

максимального значения температурной характеристики сопротивления в рабочей области значений температуры (п. 3.12);

воспроизводимости температурной характеристики сопротивления (п. 3.13);

дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре (п. 3.14);

Издание официальное **Перепечатка воспрещена**

★

часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре (п. 3.15);

относительной поперечной чувствительности при нормальной температуре (п. 3.16);

сопротивления изоляции в рабочей области значений температуры (п. 3.17).

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ

1.1. Измерительные приборы должны иметь действующие свидетельства о государственной или ведомственной поверке, а установки — паспорт и удостоверение о прохождении государственной или ведомственной метрологической аттестации.

1.2. Суммарная предельная погрешность измерительных приборов и установок не должна превышать половины допускаемого значения выборочного среднего квадратического отклонения определяемой метрологической характеристики тензорезисторов, кроме испытаний, для которых погрешность оговорена особо.

2. ПОДГОТОВКА К ИСПЫТАНИЯМ

2.1. Все испытания, если это не оговорено особо, проводятся в нормальных условиях, характеризующихся:

температурой окружающей среды 25±10°С;

относительной влажностью 65±15%;

атмосферным давлением 100 000±3 300 Па (760±25 мм рт. ст.).

2.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают на образцы (балки, пластины и т. д.) в соответствии с инструкцией по наклейке (установке) на конкретный тип тензорезисторов.

2.3. Влияние изменения температуры на характеристики тензорезисторов, определяемые по пп. 3.2—3.6; 3.16; должно исключаться методом схемной компенсации с использованием компенсационных тензорезисторов, установленных на отдельные образцы, или другим способом.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Определение сопротивления тензорезисторов при нормальной температуре

3.1.1. Сопротивление тензорезисторов измеряют прибором класса не ниже 0,05.

3.2. Определение статической характеристики преобразования при нормальной температуре

3.2.1. Определение статической характеристики преобразования должно проводиться на градуировочной установке, обеспечиваю-

щей задание испытуемым тензорезисторам деформации в диапазоне $\pm \varepsilon_{пр}$, где $\varepsilon_{пр}$ — предельная деформация тензорезистора.

Рекомендуется применять установку с балкой постоянного сечения, нагружаемой чистым изгибом. В этом случае деформацию тензорезисторов, установленных на поверхности балки, вычисляют по формулам:

при установке прогибомера на вогнутой стороне балки (чертеж справочного приложения 1)

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)}{L^2+4f^2+4fh} f,$$

при установке прогибомера на выпуклой стороне балки

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)}{L^2+4f^2-4fh} f,$$

где h — толщина балки, мм;

Δh — расстояние от поверхности балки до середины чувствительного элемента тензорезистора, мм;

f — прогиб на базе L, мм.

3.2.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают на одной стороне балки. Главные оси тензорезисторов должны быть направлены параллельно продольной оси балки.

3.2.3. Балку с установленными тензорезисторами нагружают от деформации $\varepsilon=0$ до деформации $\varepsilon=+\varepsilon_{пр}(-\varepsilon_{пр})$ и разгружают. Затем нагружают до деформации $\varepsilon=-\varepsilon_{пр}(+\varepsilon_{пр})$ и снова разгружают.

Нагружение и разгружение проводят равными ступенями, число которых в интервале от $\varepsilon=0$ до $\varepsilon=\varepsilon_{пр}$ должно быть не менее пяти, включая $\varepsilon=0$. На каждой ступени нагружения и разгружения определяют выходные сигналы $\xi(\varepsilon)$ тензорезисторов.

Время, затрачиваемое на деформирование балки и определение выходных сигналов тензорезисторов, не должно превышать 2 мин на ступень.

Температура окружающей среды за время испытаний не должна изменяться более, чем на 1°С.

3.2.4. Проводят 2 и 3-й циклы деформирования по п. 3.2.3. Перед началом каждого цикла балка должна быть выдержана в разгруженном состоянии не менее 30 мин.

Температура окружающей среды за время проведения трех циклов не должна изменяться более, чем на 5°С.

3.2.5. По полученным в пп. 3.2.3, 3.2.4 значениям выходных сигналов вычисляют для каждой ступени деформации среднее значение выходного сигнала по всем испытуемым тензорезисторам и всем циклам деформирования.

По средним значениям выходного сигнала $\overline{\xi(\varepsilon)}$ методом наименьших квадратов определяют коэффициенты $A_1 \ldots A_r$ аппроксимирующего полинома

$$\hat{\xi}(\varepsilon)=A_1\varepsilon+A_2\varepsilon^2+\ldots A_r\varepsilon^r.$$

Выборочную среднюю квадратическую погрешность аппроксимации определяют по п. 4.2.

Примеры определения коэффициентов аппроксимирующего полинома и выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации приведены в справочном приложении 2.

3.3. Определение чувствительности при нормальной температуре

3.3.1. Определение чувствительности должно проводиться на градуировочной установке, соответствующей требованиям п. 3.2.1.

3.3.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают на балку согласно п. 3.2.2.

Допускается устанавливать испытуемые тензорезисторы на обе стороны балки.

3.3.3. Балку с установленными тензорезисторами нагружают до деформации $\varepsilon_н=1000\cdot10^{-6}$, разгружают, затем нагружают в противоположном направлении и снова разгружают, каждый раз определяя при этом выходные сигналы тензорезисторов. Осуществляют три таких цикла деформирования балки.

Время, затрачиваемое на деформирование балки и определение выходных сигналов, а также постоянство температуры должны соответствовать требованиям п. 3.2.3.

3.3.4. Вычисляют среднее значение выходного сигнала $\overline{\xi}(\varepsilon)$ каждого тензорезистора по трем циклам деформирования при $\varepsilon=+\varepsilon_н$, $\varepsilon=-\varepsilon_н$. После чего определяют чувствительность K_l каждого тензорезистора по формуле

$$K_l=\frac{/\overline{\xi}(+\varepsilon_н)/+/\overline{\xi}(-\varepsilon_н)/}{2\varepsilon_н}.$$

По полученным данным определяют выборочное среднее значение чувствительности и выборочное среднее квадратическое отклонение.

Примеры определения выборочного среднего значения чувствительности и выборочного среднего квадратического отклонения приведены в справочном приложении 3.

3.4. Определение механического гистерезиса при нормальной температуре

3.4.1. Определение механического гистерезиса должно проводиться на градуировочной установке, соответствующей требованиям п. 3.2.1.

3.4.2. Выполняют операции по пп. 3.2.2—3.2.4.

3.4.3. Механический гистерезис тензорезистора для каждого цикла деформирования определяют как наибольшую абсолютную разность значений выходного сигнала при деформации $\varepsilon=0$. Затем определяют среднее значение гистерезиса для каждого тензорезистора по трем циклам деформирования.

По полученным для отдельных тензорезисторов данным определяют выборочное среднее значение механического гистерезиса.

3.4.4. Допускается при определении механического гистерезиса использовать результаты измерений, полученные при определении статической характеристики преобразования (п. 3.2).

3.5. Определение ползучести при нормальной температуре

3.5.1. Определение ползучести при нормальной температуре должно проводиться на градуировочной установке, соответствующей требованиям п. 3.2.1.

3.5.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают на балку в соответствии с п. 3.3.2.

3.5.3. Балку с установленными тензорезисторами нагружают до деформации $\varepsilon_н = 1000 \cdot 10^{-6}$ (если иное не оговорено в технической документации на тензорезисторы конкретного типа, далее — техническая документация) за время не более 30 с и в течение последующих 60 с определяют начальные значения $\xi(0)$ выходных сигналов тензорезисторов.

3.5.4. Затем значения выходных сигналов $\xi(\tau_j)$ определяют спустя 5, 10, 20, 60 и 120 мин.

3.5.5. Для каждого тензорезистора определяют относительную ползучесть $П(\tau_j)$ в процентах для указанных в п. 3.5.4. моментов времени по формуле

$$П(\tau_j) = \frac{\xi(\tau_j) - \xi(0)}{\xi(0)} 100.$$

Затем находят выборочные средние значения ползучести $\overline{П}(\tau)$ для тех же моментов времени.

По полученным для каждого момента времени средним значениям ползучести методом наименьших квадратов вычисляют параметры $A_п$ и $\alpha_п$ аппроксимирующей экспоненциальной функции

$$\hat{П}(\tau) = A_п(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_п}}),$$

где $A_п$ — условное предельное значение ползучести, %;

τ — время, ч;

$\alpha_п$ — постоянная времени ползучести, ч.

Выборочную среднюю квадратическую погрешность аппроксимации определяют по п. 4.3.

Примеры определения аппроксимирующей экспоненциальной функции ползучести и выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации приведены в справочном приложении 4.

3.5.6. Допускается для определения ползучести использовать те же тензорезисторы, что и для определения чувствительности (п. 3.3).

3.6. Определение часовой ползучести при нормальной температуре

3.6.1. Определение часовой ползучести при нормальной температуре должно проводиться на градуировочной установке, соответствующей требованиям п. 3.2.1.

Испытуемые тензорезисторы устанавливают на балку в соответствии с п. 3.3.2.

3.6.2. Балку с установленными тензорезисторами нагружают до деформации $\varepsilon_н = 1000 \cdot 10^{-6}$ за время не более 30 с и в течение последующих 60 с определяют начальные значения выходных сигналов тензорезисторов. Затем значения выходных сигналов тензорезисторов определяют по истечении 1 ч.

3.6.3. Для каждого тензорезистора определяют часовую ползучесть в процентах по п. 3.5.5.

По полученным данным определяют выборочное среднее значение часовой ползучести и выборочное среднее квадратическое отклонение.

3.6.4. Допускается для определения часовой ползучести использовать те же тензорезисторы, что и для определения чувствительности (п. 3.3).

3.7. Определение ползучести при максимальной температуре

3.7.1. Определение ползучести при максимальной температуре должно проводиться на установке с изгибаемой балкой, обеспечивающей соответствие требованиям п. 1.2 по погрешности поддержания деформации и температуры во время испытаний.

3.7.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают на балку в соответствии с п. 3.3.2.

Влияние дрейфа должно исключаться введением поправки на дрейф, методом схемной компенсации (с использованием компенсационных тензорезисторов, устанавливаемых на отдельные образцы, или попарным объединением в полумосты тензорезисторов, расположенных на противоположных сторонах балки) или другим способом.

3.7.3. Балку с тензорезисторами нагревают до максимальной температуры за время, регламентированное в технической документации.

3.7.4. Балку с установленными тензорезисторами нагружают до деформации $\varepsilon_н = 1000 \cdot 10^{-6} \pm 50 \cdot 10^{-6}$ (если иное не оговорено в технической документации) за время не более 30 с и в течение последующих 60 с определяют начальные значения $\xi(0)$ выходных сигналов тензорезисторов.

3.7.5. Выполняют операции по пп. 3.5.4, 3.5.5.

3.8. Определение часовой ползучести при максимальной температуре

3.8.1. Определение часовой ползучести при максимальной температуре должно проводиться на установке, соответствующей требованиям п. 3.7.1.

3.8.2. Выполняют операции по пп. 3.7.2—3.7.4.

3.8.3. Затем определяют выходные сигналы каждого тензорезистора по истечении 1 ч и выполняют операции по п. 3.6.3.

3.9. Определение функции влияния температуры на чувствительность

3.9.1. Определение функции влияния температуры на чувствительность должно проводиться на установке с изгибаемой балкой, обеспечивающей соответствие требованиям п. 1.2 по погрешности воспроизводимости заданной деформации и погрешности поддержания заданной температуры.

3.9.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают на балку в соответствии с п. 3.7.2.

3.9.3. Балку с тензорезисторами нагружают при нормальной температуре до деформации $\varepsilon_н = 1000 \cdot 10^{-6} \pm 50 \cdot 10^{-6}$ (если иное не оговорено в технической документации), затем определяют выходные сигналы тензорезисторов, вызванные приложенной деформацией, и разгружают. Время, затрачиваемое на нагружение балки и определение выходных сигналов тензорезисторов, не должно превышать 90 с. Всего проводят три указанных цикла деформирования балки.

3.9.4. Балку с тензорезисторами последовательно нагревают (охлаждают) ступенями до максимальной (минимальной) температуры, выполняя на каждой ступени операции по п. 3.9.3. Число ступеней нагрева (охлаждения) должно быть не менее пяти, включая нормальную температуру. Скорость нагрева (охлаждения) и время выдержки на каждой ступени должны регламентироваться в технической документации.

3.9.5. Для нормальной температуры и для каждой ступени нагрева (охлаждения) вычисляют среднее значение выходного сигнала $\overline{\xi(\varepsilon)}$ для каждого тензорезистора по трем циклам деформирования, после чего определяют чувствительность $K_t\ (t)$ по формуле

$$K_t(t) = \frac{\overline{\xi(\varepsilon)}}{\varepsilon_н} .$$

3.9.6. Для каждого тензорезистора вычисляют для каждой ступени нагрева (охлаждения) отношение

$$\Phi_t(t) = \frac{K_t(t)}{K_t(t_0)} ,$$

где $K_t\ (t)$ — чувствительность при температуре t заданной ступени нагрева (охлаждения);

$K_t\ (t_0)$ — чувствительность при нормальной температуре t_0.

3.9.7. По полученным данным определяют выборочные средние значения $\overline{\Phi_j}\ (t)$ для каждой ступени нагрева, используя которые методом наименьших квадратов определяют коэффициенты B_0, B_1, B_2 ... B_r аппроксимирующего полинома

$$\hat{\Psi}(t)=\frac{\overline{K}(t)}{\overline{K}(t_0)}=B_0+B_1t+B_2t^2+\ldots B_rt^r.$$

Выборочную среднюю квадратическую погрешность аппроксимации определяют по п. 4.2.

3.9.8. Допускается для определения функции влияния температуры на чувствительность использовать те же тензорезисторы, что и для определения ползучести при максимальной температуре (п. 3.7).

3.10. Определение значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной (минимальной) температуре

3.10.1. Определение значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной (минимальной) температуре должно проводиться на установке, соответствующей требованиям п. 3.9.1.

Испытуемые тензорезисторы устанавливают на балку в соответствии с п. 3.7.2.

3.10.2. Выполняют операции по п. 3.9.3.

3.10.3. Балку с тензорезисторами нагревают (охлаждают) до максимальной (минимальной) температуры и выполняют операции по п. 3.9.3. Скорость нагрева (охлаждения) и время выдержки при максимальной температуре должны регламентироваться в технической документации.

3.10.4. Для нормальной и максимальной (минимальной) температуры вычисляют средние значения выходного сигнала для каждого тензорезистора по трем циклам деформирования, после чего определяют чувствительность $K_l(t_{\max(\min)})$ по п. 3.9.5.

3.10.5. Для каждого тензорезистора вычисляют отношение

$$\Phi_{l\max(\min)}=\frac{K_l(t_{\max(\min)})}{K_l(t_0)},$$

где $K_l(t_{\max(\min)})$ — чувствительность при максимальной (минимальной) температуре.

3.10.6. По полученным данным определяют выборочное среднее значение функции влияния температуры на чувствительность и выборочное среднее квадратическое отклонение.

3.10.7. Допускается для определения значения функции влияния температуры на чувствительность при максимальной (минимальной) температуре использовать те же тензорезисторы, что и для определения часовой ползучести при максимальной температуре (п. 3.8).

3.11. Определение температурной характеристики сопротивления

3.11.1. Тензорезисторы должны быть установлены на образец, изготовленный из заданного материала. Образец не должен иметь внутренних напряжений, его размеры и форма должны быть вы-

браны таким образом, чтобы при испытаниях в нем не возникало температурных напряжений и при этом обеспечивалась необходимая скорость изменения его температуры, регламентированная в технической документации.

Во время испытаний образец не должен подвергаться внешней механической деформации.

Влияние изменения сопротивления линий связи на результаты измерений должно быть исключено (например, методом включения тензорезисторов в измерительную цепь по трехпроводной схеме).

3.11.2. Образец с установленными тензорезисторами помещают в камеру тепла (холода) и нагревают (охлаждают) до максимальной (минимальной) температуры ступенями или непрерывно. Число ступеней должно быть не менее пяти, включая начальную температуру.

3.11.3. На каждой ступени после установления температурного равновесия определяют выходные сигналы тензорезисторов и температуру. Время выдержки тензорезисторов на каждой ступени не должно превышать 15 мин. Время, затрачиваемое на определение выходных сигналов и температуры на каждой ступени, не должно превышать 1 мин.

При непрерывном нагреве (охлаждении) образца выходные сигналы тензорезисторов и температура определяются синхронно.

3.11.4. По результатам измерений, полученным для отдельных тензорезисторов на каждой ступени нагрева (охлаждения), определяют выборочные средние значения $\bar{\xi}(t_j)$ выходных сигналов, по которым методом наименьших квадратов определяют коэффициенты $C_0, C_1 \ldots C_r$ аппроксимирующего полинома

$$\hat{\xi}(t) = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + \ldots C_r t^r.$$

Выборочную среднюю квадратическую погрешность аппроксимации определяют по п. 4.2.

Примеры определения коэффициентов аппроксимирующего полинома температурной характеристики сопротивления и выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации приведены в справочном приложении 5.

3.11.5. Допускается при определении температурной характеристики сопротивления тензорезисторов перед проведением цикла нагрева (охлаждения) по пп. 3.11.2, 3.11.3 проводить предварительные тренировочные циклы, что должно быть оговорено в технической документации.

3.12. Определение максимального значения температурной характеристики сопротивления в рабочей области значений температуры

3.12.1. При определении максимального значения температурной характеристики сопротивления тензорезисторы должны быть установлены на образец в соответствии с требованиями п. 3.11.1.

3.12.2. Образец с установленными тензорезисторами помещают в камеру тепла (холода) с начальной температурой 25±2°С, нагревают (охлаждают) до температуры $t_н$ и определяют выходные сигналы тензорезисторов при этой температуре.

Температура $t_н$, при которой абсолютное значение температурной характеристики сопротивления является максимальным в рабочей области значений температуры, задается в технической документации и в дальнейшем корректируется при типовых испытаниях.

3.12.3. По значениям выходных сигналов, полученным для отдельных тензорезисторов, определяют выборочное среднее максимальное значение температурной характеристики сопротивления и выборочное среднее квадратическое отклонение.

3.13. Определение воспроизводимости температурной характеристики сопротивления

3.13.1. При определении воспроизводимости температурной характеристики сопротивления тензорезисторы должны быть установлены на образец в соответствии с требованиями п. 3.11.1.

3.13.2. Образец с установленными тензорезисторами нагревают до максимальной температуры, выполняя операции по пп. 3.11.2, 3.11.3.

3.13.3. Тензорезисторы выдерживают при максимальной температуре в течение 1 ч и охлаждают до нормальной температуры. После чего осуществляют второй цикл нагрева до максимальной температуры.

3.13.4. Для каждого тензорезистора воспроизводимость температурной характеристики определяют как разность между значениями температурной характеристики при максимальной температуре при первом и втором циклах нагрева.

3.13.5. По полученным для отдельных тензорезисторов данным определяют выборочное среднее значение воспроизводимости температурной характеристики сопротивления и выборочное среднее квадратическое отклонение.

3.13.6. Допускается совмещать испытания по определению воспроизводимости температурной характеристики с испытаниями по определению максимального значения температурной характеристики сопротивления (п. 3.12) и часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре (п. 3.15).

3.14. Определение дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре

3.14.1. При определении дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре тензорезисторы должны быть установлены на образец в соответствии с требованиями п. 3.11.1.

3.14.2. Образец с установленными тензорезисторами нагревают до максимальной температуры и определяют начальные значения $\xi(0)$ выходных сигналов тензорезисторов.

3.14.3. Затем значения выходных сигналов $\xi(\tau_j)$ определяют спустя 5, 10, 20, 60 и 120 мин.

3.14.4. Для каждого тензорезистора дрейф выходного сигнала $Д(\tau_j)$ для указанных в п. 3.14.3 моментов времени определяют по формуле

$$Д(\tau_j)=\xi(\tau_j)-\xi(0).$$

3.14.5. По значениям дрейфа выходного сигнала, полученным для отдельных тензорезисторов, определяют выборочные средние значения дрейфа $Д(\tau_j)$ за 5, 10, 20, 60 и 120 мин, по которым методом наименьших квадратов определяют параметры $A_д$ и $\alpha_д$ аппроксимирующей экспоненциальной функции

$$\widehat{Д}(\tau_j)=A_д(1-e^{-\frac{\tau}{\alpha_д}}),$$

где $A_д$ — условное предельное значение дрейфа, $1\cdot10^{-6}$;

τ — время ч;

$\alpha_д$ — постоянная времени дрейфа, ч.

Выборочную среднюю квадратическую погрешность аппроксимации определяют по п. 4.3.

3.14.6. Допускается совмещать испытания по определению дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре с испытаниями по определению температурной характеристики сопротивления (п. 3.11).

3.15. Определение часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре

3.15.1. При определении часового дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре тензорезисторы должны быть установлены на образец в соответствии с требованиями п. 3.11.1.

3.15.2. Выполняют операции по п. 3.14.2. Затем значения выходных сигналов тензорезисторов определяют по истечении 1 ч.

3.15.3. Для каждого тензорезистора часовой дрейф выходного сигнала определяют по п. 3.14.4.

По полученным данным определяют выборочное среднее значение часового дрейфа выходного сигнала и выборочное среднее квадратическое отклонение.

3.15.4. Допускается совмещать испытания по определению часового дрейфа выходного сигнала с испытаниями по определению максимального значения температурной характеристики сопротивления (п. 3.12).

3.16. Определение относительной поперечной чувствительности при нормальной температуре

3.16.1. Определение относительной поперечной чувствительности должно проводиться на установке с образцом, на поверхности которого должна создаваться деформация $\varepsilon_н=1000\cdot10^{-6}$ (если иное не оговорено в технической документации). При этом деформация в перпендикулярном направлении не должна превышать $2\cdot10^{-6}$.

3.16.2. Испытуемые тензорезисторы устанавливают перпендикулярно к оси образца, вдоль которой создается одноосная деформация $\varepsilon_н$.

3.16.3. Образец нагружают до деформации $\varepsilon_н$, которая должна измеряться с погрешностью не более $\pm 20 \cdot 10^{-6}$, и определяют выходные сигналы тензорезисторов $\xi(\varepsilon_н)$, вызванные этой деформацией.

Относительную поперечную чувствительность $K_{\perp t}$ в процентах для каждого тензорезистора определяют по формуле

$$K_{\perp t} = \frac{\xi(\varepsilon_н)}{\varepsilon_н \overline{K}} 100,$$

где $\overline{K}$ — выборочное среднее значение чувствительности, полученное в п. 3.3.

По полученным для отдельных тензорезисторов данным определяют выборочное среднее значение относительной поперечной чувствительности.

3.17. Определение сопротивления изоляции в рабочей области значений температуры

3.17.1. При определении сопротивления изоляции тензорезисторы должны быть установлены на металлический образец.

Допускается определять сопротивление изоляции на тензорезисторах, прошедших испытания по проверке других характеристик при нормальной температуре.

3.17.2. Для измерения сопротивления изоляции должен быть использован мегомметр постоянного тока с погрешностью измерений не более 10% и с напряжением питания в измерительной цепи, указанным в технической документации.

3.17.3. Сопротивление изоляции тензорезисторов измеряют при нормальной и максимальной температурах. При измерениях отдельные тензорезисторы не должны быть электрически соединены друг с другом. Продолжительность подключения мегомметра перед каждым измерением должна быть не менее 2 мин.

3.17.4. За сопротивление изоляции проверяемой партии тензорезисторов принимают наименьшее из всех значений, полученных для отдельных тензорезисторов при нормальной и максимальной температурах.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Статистическую обработку полученных данных проводят по ГОСТ 11.004—74. Оценку анормальности результатов измерений проводят по ГОСТ 11.002—73.

4.2. Среднюю квадратическую погрешность аппроксимации статической характеристики преобразования (п. 3.2), функции влияния температуры на чувствительность (п. 3.9) и температурной характеристики сопротивления (п. 3.11) определяют по формуле

$$S_{az}=\sqrt{\frac{1}{m-l}\sum_{j=1}^{m}[\hat{Z}(X_j)-\overline{Z}(X_j)]^2},$$

где $\overline{Z}(X_j)$ — выборочное среднее значение выходного сигнала $\overline{\xi}(\varepsilon_j)$ для ступени деформации ε_j или выборочное среднее значение выходного сигнала $\overline{\xi}(t_j)$ для ступени температуры нагрева (охлаждения) t_j, или выборочное среднее значение функции влияния температуры на чувствительность $\overline{\Phi}(t_j)$ для ступени нагрева (охлаждения) t_j;

$\hat{Z}(X_j)$ — расчетное значение выходного сигнала $\hat{\xi}(\varepsilon_j)$, $\hat{\xi}(t_j)$ или функции влияния $\hat{\Phi}(t_j)$;

m — число ступеней деформации или температуры нагрева (охлаждения);

l — число коэффициентов полинома;

j — номер ступени, $j=1, 2 \ldots m$.

4.3. Среднюю квадратическую погрешность аппроксимации ползучести при нормальной температуре (п. 3.5) и максимальной температуре (п. 3.7) и дрейфа выходного сигнала при максимальной температуре (п. 3.14) определяют по формуле

$$S_{ay}=\sqrt{\frac{1}{m-2}\sum_{j=1}^{m}[\hat{Y}(\tau_j)-\overline{Y}(\tau_j)]^2},$$

где $\overline{Y}(\tau_j)$ — выборочное среднее значение ползучести $\overline{\Pi}(\tau_j)$ или дрейфа $\overline{\Delta}(\tau_j)$ для момента времени τ_j;

$\hat{Y}(\tau_j)$ — расчетное значение ползучести $\hat{\Pi}(\tau_j)$ или дрейфа выходного сигнала $\hat{\Delta}(\tau_j)$;

m — число моментов времени;

j — номер момента времени, $j=1, 2 \ldots m$.

4.4. Результаты испытаний заносят в протокол (или журнал испытаний). В протоколе должны быть указаны:

дата и год испытаний;

цель и место проведения испытаний;

пункты настоящего стандарта и технической документации, по которым проводят испытания;

тип испытуемых тензорезисторов, дата их изготовления, номер партии;

типы, классы точности и заводские номера используемых приборов и оборудования;

температура и влажность воздуха в помещении;

наименование связующего и номер инструкции по наклейке (установке) тензорезисторов;

результаты испытаний;

заключение по результатам испытаний, должность и фамилия лица, проводившего испытания.

5. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

5.1. К работам по испытаниям тензорезисторов допускают лиц не моложе 18 лет, прошедших инструктаж по технике безопасности при работе с растворителями, клеями, легковоспламеняющимися веществами, переносным электрифицированным инструментом и электрическими приборами.

5.2. Помещение, в котором проводят испытания тензорезисторов, должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией или местными отсосами воздуха, обеспечивающими содержание вредных веществ в концентрациях, не превышающих установленные предельно допустимые концентрации.

5.3. Нагреваемые и подвижные части испытательных установок должны быть снабжены защитными устройствами.

5.4. При работе с электроустановками следует руководствоваться «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденными Госэлектронадзором 12 апреля 1969 года.

5.5. При проведении работ по лужению и пайке с использованием припоев, содержащих свинец, следует руководствоваться «Санитарными правилами организации процессов пайки мелких изделий сплавами, содержащими свинец», утвержденными Главным санитарным врачом СССР 20 марта 1972 года, № 952—72, согласованными с Госстроем СССР и ВЦСПС.

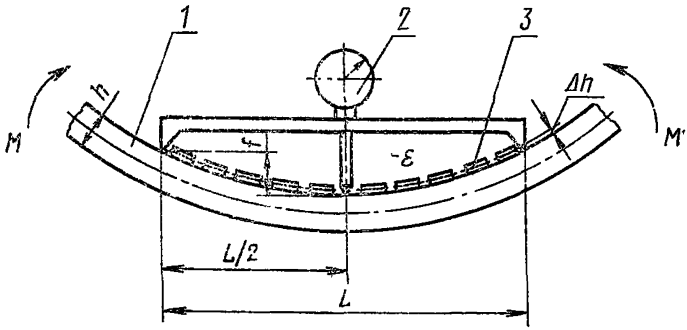
5.6. На рабочем месте химические продукты (клеи, растворители и так далее) должны находиться в количестве, необходимом для работы в течение одной смены.

Для сбора загрязненных клеями обтирочных материалов должны устанавливаться металлические контейнеры с крышками.

5.7. В стандартах и технической документации должны быть установлены требования, обеспечивающие безопасное ведение работ в соответствии с особенностями конкретных типов тензорезисторов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Справочное

Схема измерения деформации тензорезисторов прогибомером, установленным на вогнутой стороне балки



1—балка; *2*—индикатор перемещений или микатор (нуль—индикатор) с набором плоскопараллельных концевых мер; *3*—тензорезистор

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Справочное

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АППРОКСИМИРУЮЩЕГО ПОЛИНОМА СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ВЫБОРОЧНОЙ СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ

1. Пусть в технической документации заданы: $\varepsilon_{пр}=\pm 1000\cdot 10^{-6}$, статическая характеристика преобразования должна аппроксимироваться уравнением прямой линии $\hat{\xi}(\varepsilon)=A_1\varepsilon$, допускаемое значение выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации $S_{a\varepsilon}=6\cdot 10^{-6}$.

2. В результате испытаний выборки ($n=10$) тензорезисторов по пп. 3.2.1—3.2.5 для различных ступеней деформации получены средние значения выходного сигнала $\bar{\xi}(\varepsilon_j)$, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Номер ступени деформации j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varepsilon_j, 1\cdot 10^{-6}$	—1000	—750	—500	—250	0	250	500	750	1000
$\bar{\xi}(\varepsilon_j), 1\cdot 10^{-6}$	—1951	—1460	—974	—490	—4	477	959	1441	1930

Полученные экспериментальные данные $\bar{\xi}(\varepsilon_j)$ аппроксимируются уравнением прямой линии

$$\hat{\xi}(\varepsilon)=A_0+A_1\varepsilon. \qquad (1)$$

Наиболее вероятные значения коэффициентов A_0 и A_1 находим методом наименьших квадратов [6, 7].

В основе этого метода лежит принцип наименьших квадратов, согласно которому лучшей из аппроксимирующих функций заданного класса будет та, у которой сумма квадратов разностей значений аппроксимирующей функции и экспериментальных значений в тех же точках будет наименьшей, то есть

$$\sum_{j=1}^{m}[\hat{\xi}(\varepsilon_j)-\bar{\xi}(\varepsilon_j)]^2=\min, \qquad (2)$$

где $\bar{\xi}(\varepsilon_j)$ — выборочное среднее значение выходного сигнала для ступени деформации ε_j (экспериментальное);

$\hat{\xi}(\varepsilon_j)=A_0+A_1\varepsilon_j$ — значение аппроксимирующей функции для ступени деформации ε_j (расчетное);

m — число ступеней деформации;

j — номер ступени деформации.

Уравнение (2) можно записать в данном случае следующим образом

$$\sum_{j=1}^{m}[A_0+A_1\varepsilon_j-\overline{\xi}(\varepsilon_j)]^2=\min.$$

Рассматривая здесь A_0 и A_1 как независимые переменные и приравнивая нулю частные производные от левой части по этим переменным, получим систему уравнений (нормальные уравнения метода наименьших квадратов), в результате решения которой определяются значения A_0 и A_1.

$$\begin{cases}\sum\limits_{j=1}^{m}[A_0+A_1\varepsilon_j-\overline{\xi}(\varepsilon_j)]=0\\ \sum\limits_{j=1}^{m}[A_0+A_1\varepsilon_j-\overline{\xi}(\varepsilon_j)]\varepsilon_j=0\end{cases}$$

Отсюда

$$\begin{cases}A_0m+A_1\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j=\sum\limits_{j=1}^{m}\overline{\xi}(\varepsilon_j)\\ A_0\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j+A_1\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j^2=\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j\overline{\xi}(\varepsilon_j),\end{cases}$$

$$A_0=\frac{\sum\limits_{j=1}^{m}\overline{\xi}(\varepsilon_j)-A_1\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j}{m};\qquad(3)$$

$$A_1=\frac{m\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j\overline{\xi}(\varepsilon_j)-\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j\sum\limits_{j=1}^{m}\overline{\xi}(\varepsilon_j)}{m\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j^2-(\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_j)^2}.\qquad(4)$$

3. Пользуясь данными, приведенными в табл. 1, производим вычисления (при $m=9$):

$$\sum_{j=1}^{9}\varepsilon_j=0;\quad\sum_{j=1}^{9}\varepsilon_j^2=375\cdot10^{-8};\quad\sum_{j=1}^{9}\overline{\xi}(\varepsilon_j)=-72\cdot10^{-6};$$

$$\sum_{j=1}^{9}\varepsilon_j\overline{\xi}(\varepsilon_j)=726{,}5\cdot10^{-8}.$$

Подставляя численные значения в формулы (4) и (3), получаем:

$$A_1=\frac{726{,}5\cdot10^{-8}}{375\cdot10^{-8}}=1{,}94;$$

$$A_0=\frac{-72\cdot10^{-6}}{9}=-8\cdot10^{-6}.$$

Таким образом, выражение (1) имеет вид

$$\hat{\xi}(\varepsilon)=-8\cdot10^{-6}+1{,}94\varepsilon.\qquad(5)$$

Первое слагаемое в выражении (5) содержит информацию об изменении начального сопротивления тензорезисторов из-за упругих несовершенств связующего, подложки и так далее. Второе слагаемое является собственно статической характеристикой преобразования. Поэтому статическую характеристику преобразования испытуемых тензорезисторов представляем в окончательном виде

$$\hat{\xi}(\varepsilon)=1{,}94\varepsilon.$$

4. Для определения выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации S_{as} вначале для каждой ступени деформации из соотношения (5) оп-

ределяем значения $\hat{\xi}(\varepsilon_j)$ и отклонения от них значений $\bar{\xi}(\varepsilon_j)$, в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Номер ступени деформации j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varepsilon_j, 1\cdot10^{-6}$	—1000	—750	—500	—250	0	250	500	750	1000
$\hat{\xi}(\varepsilon_j), 1\cdot10^{-6}$	—1948	—1463	—978	—493	—8	477	962	1447	1932
$[\hat{\xi}(\varepsilon_j)-\bar{\xi}(\varepsilon_j)], 1\cdot10^{-6}$	3	—3	—4	—3	—4	0	3	6	2

Затем по п. 4.2 определяем $S_{a\varepsilon}$

$$S_{a\varepsilon}=\sqrt{\frac{1}{9-2}\sum_{j=1}^{9}[\hat{\xi}(\varepsilon_j)-\bar{\xi}(\varepsilon_j)]^2}=$$

$$=\sqrt{\frac{1}{7}[(3)^2+(-3)^2+(-4)^2+(-3)^2+(-4)^2+(3)^2+(6)^2+(2)^2]\cdot10^{-6}}=$$

$$=4\cdot10^{-6}.$$

Так как полученное значение $(4\cdot10^{-6})$ не превышает допускаемого $(6\cdot10^{-6})$, то проверяемая партия тензорезисторов признается годной. В паспорте на партию должно быть записано:

$A_1=1{,}94$,

$S_{a\varepsilon}=4\cdot10^{-6}$,

$n=10$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Справочное

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБОРОЧНОГО СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СРЕДНЕГО КВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ

Пример 1. Пусть в технической документации заданы: интервал средних значений чувствительности 1,90—2,10, допускаемое выборочное среднее квадратическое отклонение чувствительности $S_К = 0{,}02$.

В результате испытаний выборки тензорезисторов ($n=10$) по пп. 3.3.1—3.3.4 получены следующие значения чувствительности K_l, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Номер тензорезистора l	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_l	1,940	1,935	1,945	1,960	1,921	1,923	1,932	1,928	1,969	1,935
$K_l-\overline{K}$	0,001	−0,004	0,006	0,021	−0,018	−0,016	−0,007	−0,011	0,030	−0,004

Выборочное среднее значение чувствительности $\overline{K}$ определяем по формуле (1) ГОСТ 11.004—74

$$\overline{K}=\frac{1}{10}\sum_{l=1}^{10}K_l=1{,}939.$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение чувствительности $S_К$ определяем по формуле (3) ГОСТ 11.004—74:

$$S_К=\sqrt{\frac{1}{9}\sum_{l=1}^{10}(K_l-\overline{K})^2}=\sqrt{\frac{1}{9}[(1)^2+(-4)^2+(6)^2+(21)^2+(-18)^2+}$$

$$+(-16)^2+(-7)^2+(-11)^2+(30)^2+(-4)^2]\cdot 10^{-3}=0{,}015.$$

Так как результаты испытаний не содержат анормальных значений, полученное значение $S_К$ (0,015) не превышает допускаемого (0,02), и значение $\overline{K}$ находится в заданном интервале, то проверяемая партия тензорезисторов признается годной. В паспорте на партию должно быть записано:

$$\overline{K}=1{,}94; \quad S_К=0{,}015; \quad n=10.$$

Пример 2. Пусть в условиях примера 1 для выборки тензорезисторов ($n=10$) получены следующие значения чувствительности K_l, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Номер тензорезистора i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_i	1,921	1,940	1,935	1,945	1,960	2,153	1,923	1,932	1,928	1,969
$K_i-\overline{K}$	—0,040	—0,020	—0,026	—0,016	—0,001	0,192	—0,038	—0,029	—0,033	—0,008

Вычисляем выборочное среднее значение чувствительности и выборочное среднее квадратическое отклонение: $\overline{K}=1,961$; $S_к=0,069$.

Проводим анализ результатов испытания с целью выявления анормальных значений чувствительности K_i. Оцениваем значение 2,153. По формуле (3) ГОСТ 11.002—73 вычисляем

$$U_n=\frac{K_n-\overline{K}}{S_к}=\frac{2,153-1,961}{0,069}=2,78.$$

В табл. 1 ГОСТ 11.002—73 для $n=10$ и уровня значимости $\alpha=0,05$ находим значение $\beta=2,18$. Поскольку $U_n>\beta$, результат 2,153 считаем анормальным. Поэтому должна быть испытана новая выборка тензорезисторов такого же объема.

Пример 3. Пусть в условиях примера 1 при испытаниях выборки ($n=10$) тензорезисторов получены следующие значения чувствительности K_i, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Номер тензорезистора i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_i	1,894	1,996	1,971	1,972	1,992	1,951	1,926	1,921	1,918	1,966
$K_i-\overline{K}$	—0,057	0,045	0,020	0,021	0,041	0	—0,025	—0,030	—0,033	0,015

Вычисляем выборочное среднее значение чувствительности и выборочное среднее квадратическое отклонение: $\overline{K}=1,951$; $S_к=0,034$.

Проводим анализ результатов испытаний с целью выявления анормальных значений чувствительности, оцениваем значение 1,894. В том случае $U_n=1,66$; $\beta=2,18$. Так как $U_n<\beta$, то результат 1,894 не является анормальным. Оцениваем значение 1,996. В этом случае $U_n=1,41$. Результат 1,996 также не является анормальным. Поскольку полученное выборочное среднее квадратическое отклонение чувствительности (0,034) больше допускаемого (0,02), испытуемая партия тензорезисторов должна быть забракована (или переведена в более низкую группу качества).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Справочное

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ И СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ

1. Пусть в технической документации задано допускаемое значение средней квадратической погрешности аппроксимации $S_{ап}=0{,}03\%$. В результате испытаний выборки тензорезисторов ($n=10$), по пп. 3.5.1—3.5.5 для различных моментов времени τ_j получены выборочные средние значения ползучести $\overline{\Pi}(\tau_j)$, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Номер момента времени j	1	2	3	4	5	6
τ_j, мин	0	5	10	20	60	120
$\overline{\Pi}(\tau_j)$, %	0	−0,16	−0,29	−0,48	−0,97	−1,13

По этим данным производим аппроксимацию зависимости ползучести от времени экспоненциальной функцией вида

$$\hat{\Pi}(\tau)=A_{п}\left(1-e^{-\frac{\tau}{\alpha_{п}}}\right). \qquad (1)$$

Значения коэффициентов $A_{п}$ и $\alpha_{п}$ определяем методом наименьших квадратов (см. справочное приложение 2).

2. Условие метода наименьших квадратов для данного случая запишется как

$$\sum_{j=1}^{m}[\hat{\Pi}(\tau_j)-\overline{\Pi}(\tau_j)]^2=\sum_{j=1}^{m}\left[A_{п}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\right)-\overline{\Pi}(\tau_j)\right]^2=\min,$$

где $\overline{\Pi}(\tau_j)$ — выборочное среднее значение ползучести для момента времени τ_j (экспериментальное);

$\hat{\Pi}(\tau_j)=A_{п}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\right)$ — значение аппроксимирующей функции для момента времени τ_j (расчетное);

m — число моментов времени;

j — номер момента времени.

Нормальные уравнения метода наименьших квадратов имеют вид:

$$\begin{cases} \sum\limits_{j=1}^{m}\overline{\Pi}(\tau_j)\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\right)-A_{п}\sum\limits_{j=1}^{m}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\right)^2=0 \\ \frac{2A_{п}}{\alpha_{п}^2}\sum\limits_{j=1}^{m}\overline{\Pi}(\tau_j)e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\tau_j-A_{п}\sum\limits_{j=1}^{m}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\right)e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{п}}}\tau_j=0. \end{cases} \qquad (2)$$

Из первого уравнения системы (2) получают выражение для

$$A_{\text{п}}=\frac{\sum\limits_{j=1}^{m}\overline{\Pi}(\tau_j)\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\right)}{\sum\limits_{j=1}^{m}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\right)^2}. \qquad (3)$$

Подставив его во второе уравнение системы (2), получают

$$\sum_{j=1}^{m}\overline{\Pi}\,(\tau_j)\,e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\tau_j\sum_{j=1}^{m}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\right)^2-\sum_{j=1}^{m}\overline{\Pi}(\tau_j)\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\right)\sum_{j=1}^{m}\left(1-e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\right)e^{-\frac{\tau_j}{\alpha_{\text{п}}}}\tau_j=0. \qquad (4)$$

Трансцендентное уравнение (4) решают одним из методов [8] с помощью ЭВМ и получают значение искомого параметра $\alpha_{\text{п}}$, зная который, вычисляют параметр $A_{\text{п}}$ по формуле (3). Для данного примера $\alpha_{\text{п}}=0{,}6$ ч, $A_{\text{п}}=-1{,}2\%$. Таким образом, выражение (1) имеет вид

$$\hat{\Pi}(\tau)=-1{,}2\left(1-e^{-\frac{\tau}{0{,}6}}\right). \qquad (5)$$

Для определения выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации $S_{\text{ап}}$ для каждого момента времени из соотношения (5) определяем значения $\hat{\Pi}(\tau_j)$ и отклонения от них средних значений $\overline{\Pi}(\tau_j)$ (табл. 2).

Таблица 2

Номер момента времени j	1	2	3	4	5	6
τ_j, мин	0	5	10	20	60	120
$\hat{\Pi}(\tau_j)$, %	0	−0,15	−0,28	−0,50	−0,95	−1,14
$\hat{\Pi}(\tau_j)-\overline{\Pi}(\tau_j)$,%	0	0,01	0,01	−0,02	0,02	−0,01

Затем по п. 4.3 определяем $S_{\text{ап}}$

$$S_{\text{ап}}=\sqrt{\frac{1}{6-2}\sum_{i=1}^{6}\left[\hat{\Pi}(\tau_j)-\overline{\Pi}(\tau_j)\right]^2}=\sqrt{\frac{1}{4}\left[(1)^2+(1)^2+(-2)^2+(2)^2+(-1)^2\right]}\cdot 10^{-2}=0{,}02\%.$$

Так как полученное значение $S_{\text{ап}}$ (0,02) меньше допускаемого (0,03), то партия тензорезисторов признается годной.

В паспорте на партию должно быть записано:

$A_{\text{п}}=-1{,}2\%$,

$\alpha_{\text{п}}=0{,}6$ ч,

$S_{\text{ап}}=0{,}02\%$,

$n=10$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
Справочное

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АППРОКСИМИРУЮЩЕГО ПОЛИНОМА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ

1. Пусть в технической документации задано, что температурная характеристика сопротивления должна быть аппроксимирована полиномом третьей степени вида

$$\hat{\xi}(t)\,10^6 = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3,$$

допускаемое значение средней квадратической погрешности аппроксимации $S_{at} = 12 \cdot 10^{-6}$.

2. При испытаниях выборки тензорезисторов ($n=10$) по пп. 3.11.1—3.11.4 (материал образца сталь с коэффициентом линейного расширения $\beta_t = 11 \cdot 10^{-6}$1/°С, рабочая область значений температуры тензорезисторов 20—420°С) для различных ступеней температуры t_j были определены выборочные средние значения $\overline{\xi}(t_j)$ выходных сигналов, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Номер ступени температуры j	1	2	3	4	5	6
t_j, °С	26	103	180	261	343	423
$\overline{\xi}(t_j)$, $1 \cdot 10^{-6}$	0	1260	2283	3067	3534	3670

По полученным значениям $\overline{\xi}(t_j)$ методом наименьших квадратов определяем коэффициенты полинома (см. справочное приложение 2).

3. Условие метода наименьших квадратов для данного случая запишется как

$$\sum_{j=1}^{m} [\hat{\xi}(t_j) - \overline{\xi}(t_j)]^2 = \sum_{j=1}^{m} [C_0 + C_1 t_j + C_2 t_j^2 + C_3 t_j^3 - \overline{\xi}(t_j)]^2 = \min,$$

где $\overline{\xi}(t_j)$ — выборочное среднее значение выходного сигнала для ступени температуры t_j при нагреве (экспериментальное);

$\hat{\xi}(t_j) = C_0 + C_1 t_j + C_2 t_j^2 + C_3 t_j^3$ — значение аппроксимирующей функции для ступени температуры t_j (расчетное);

m — число ступеней температуры;

j — номер ступени температуры.

Нормальные уравнения метода наименьших квадратов имеют вид:

$$\begin{cases} \sum\limits_{j=1}^{m}[C_0+C_1t_j+C_2t_j^2+C_3t_j^3-\overline{\xi}(t_j)]=0 \\ \sum\limits_{j=1}^{m}[C_0+C_1t_j+C_2t_j^2+C_3t_j^3-\overline{\xi}(t_j)]t_j=0 \\ \sum\limits_{j=1}^{m}[C_0+C_1t_j+C_2t_j^2+C_3t_j^3-\overline{\xi}(t_j)]t_j^2=0 \\ \sum\limits_{j=1}^{m}[C_0+C_1t_j+C_2t_j^2+C_3t_j^3-\overline{\xi}(t_j)]t_j^3=0. \end{cases}$$

Система линейна относительно искомых параметров C_0—C_3 и решается одним из методов решения системы линейных уравнений [8], например, с помощью определителей, методом Краута и так далее с использованием ЭВМ.

Для данного примера

$C_0=-480$; $C_1=18{,}91$; $C_2=-18{,}72\cdot10^{-3}$; $C_3=-66{,}2\cdot10^{-7}$.

Таким образом, температурная характеристика может быть представлена в виде

$$\hat{\xi}(t)10^6=-480+18{,}91t-18{,}72\cdot10^{-3}t^2-66{,}2\cdot10^{-7}t^3. \quad (1)$$

4. Для определения выборочной средней квадратической погрешности аппроксимации S_{at} вначале для каждой температурной ступени из соотношения (1) определяем значение $\hat{\xi}(t)$ и отклонения от их средних значений (табл. 2).

Таблица 2

Номер ступени температуры j	1	2	3	4	5	6
t_j, °С	26	103	180	261	343	423
$\hat{\xi}(t_j)$, $1\cdot10^{-6}$	1	1262	2279	3063	3537	3668
$[\hat{\xi}(t_j)-\overline{\xi}(t_j)]$, $1\cdot10^{-6}$	—1	2	—4	—4	3	—2

Затем по п. 4.2 определяем S_{at}

$$S_{at}=\sqrt{\frac{1}{6-4}\sum_{j=1}^{6}[\hat{\xi}(t_j)-\overline{\xi}(t_j)]^2}=\sqrt{\frac{1}{2}[(-1)^2+(2)^2+(-4)^2+(-4)^2+(3)^2+(-2)^2]}\cdot10^{-6}=5\cdot10^{-6}$$

Так как полученное значение S_{at} ($5\cdot10^{-6}$) не превышает допускаемого ($12\cdot10^{-6}$), то партия тензорезисторов признается годной.

Зависимость (1) получена для начальной температуры 26°С.

Необходимо получить зависимость для начальной температуры 25°С (нормальная температура). Новая зависимость будет отличаться только значением свободного члена C_0, которое должно быть определено из условия $\hat{\xi}(25)=0$.

Решаем уравнение относительно C_0

$$\hat{\xi}(25)\cdot10^{-6}=C_0+18{,}91\cdot25-18{,}72\cdot10^{-3}\cdot25^2-66{,}2\cdot10^{-7}\cdot25^3=0.$$

Отсюда $C_0=-461$.

В окончательном виде имеем:

$$\hat{\xi}(t)\cdot 10^{6}=-461+18{,}91t-18{,}72\cdot 10^{-3}t^{2}-66{,}2\cdot 10^{-7}t^{3}.$$

В паспорте на партию тензорезисторов должно быть записано:

$C_0=-461$; $C_1=18{,}91$; $C_2=-18{,}72\cdot 10^{-3}$; $C_3=-66{,}2\cdot 10^{-7}$;

$S_{at}=4\cdot 10^{-6}$; сталь $\beta=11\cdot 10^{-6}$ 1/°С; $n=10$.

gost.e-ecolog.ru

© Издательство стандартов, 1976