

В. Л. ПРИСЕКИН, А. Н. СЕРЬЕЗНОВ, А. А. СКОТНИКОВ

ПОГРЕШНОСТИ ПРОВОЛОЧНЫХ ТЕНЗОДАТЧИКОВ ЗА СЧЕТ НАГРЕВА ТЕНЗОРЕШЕТКИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПИТАНИИ

Одним из методов повышения чувствительности мостовых тензометрических схем является увеличение напряжения источника питания. Увеличить же напряжение питания тензометрических схем, не вызывая при этом недопустимого перегрева тензодатчиков, можно только за счет использования импульсного питания. Известен ряд работ по применению импульсного питания в тензометрических цепях [1—5], однако в них не рассматривается вопрос нагрева решетки тензодатчика и клея во время действия импульса и связанные с этим погрешности измерения.

В данной статье приведена оценка погрешности измерения, возникающей при использовании импульсного питания мостовых тензометрических цепей.

В конструктивном оформлении тензодатчик (рис. 1, а, б) состоит из тонкой тензочувствительной проволоки (решетки тензодатчика), связующего материала (клея), который прикрепляет решетку к основе тензодатчика, и выводных концов, предназначенных для соединения тензодатчиков в измерительную цепь.

При проведении прочностных испытаний связующее служит для передачи деформации от исследуемой детали к проволоке тензодатчика, а также для электрической изоляции чувствительной решетки от конструкции.

Для анализа тепловых процессов тензодатчика при использовании импульсного питания примем ряд допущений:

1) тензодатчики питаются импульсами прямоугольной формы с постоянной длительностью τ , амплитудой U_n и периодом T ;

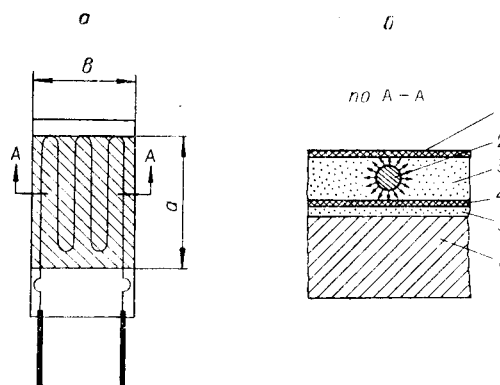


Рис. 1. Конструкция проволочного тензодатчика:

1 — бумага; 2 — нить чувствительной решетки; 3 — связующее: клей БФ-4; 4 — бумажная основа; 5 — клей БФ-4; 6 — конструкция.

2) тензодатчики изготавливаются на основе клея БФ-4, являются прозрачными; однако при определении тепловых режимов излучательной способностью проволоки пренебрегаем;

3) нагрев тензодатчика для принятых параметров определяется тепловым режимом при действии единичного скачка напряжения [6];

4) расчет тепловых процессов, происходящих в тензодатчике, ведется в предположении, что температура клея является функцией только времени и одинакова во всех точках клея (см. рис. 1, б);

5) охлаждение тензодатчика за счет конвекции незначительно, поэтому при определении тепловых режимов тензодатчика этот член в уравнении не учитываем [7].

Прохождение импульсов по решетке тензодатчика вызывает нагрев тензочувствительной проволоки. Полученное проволокой тепло передается клею и конструкции в результате теплоотдачи. Тензодатчик, показанный на рис. 1, б, можно рассматривать как систему, которая описывается линейными уравнениями. Тогда уравнения теплового баланса для решетки тензодатчика и клея можно записать так:

$$\pi r^2 l \rho_1 c_1 \frac{dT_1}{dt} = P f(t) - 2\pi r l h_1 (T_1 - T_2); \quad (1)$$

$$v_2 \rho_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} = 2\pi r l h_1 (T_1 - T_2) - ab h_2 (T_2 - T_0),$$

где r, a, l, b — радиус, ширина, длина тензодатчика в см; ρ_1 — плотность константана в г/см³; c_1 — удельная теплоемкость константана в кал/г; T_1 — температура проволоки в °С; P — полная потребляемая мощность в кал/сек; h_1 — коэффициент теплоотдачи от константана к клею в кал/см² °С сек; T_2 — средняя температура клея в °С; $v_2 = abd$ — объем клея тензодатчика без учета объема тензочувствительной решетки (см. рис. 1, а); δ — толщина клея в тензодатчике в см; ρ_2 — плотность клея в г/см³; c_2 — удельная теплоемкость клея в кал/г °С; h_2 — коэффициент теплоотдачи от клея в конструкции в кал/см² °С сек; T_0 — температура конструкции в °С.

Введем новые обозначения:

$$\begin{aligned} T_1 - T_0 &= k_1 \vartheta_1; \quad \frac{dT_1}{dt} = k_1 \frac{d\vartheta_1}{d\tau}; \\ T_2 - T_1 &= k_1 \vartheta_2; \quad \frac{dT_2}{dt} = k_1 \frac{d\vartheta_2}{d\tau}; \quad l = k_2 \tau; \\ k_1 &= \frac{P}{2\pi r l h_1}; \quad k_2 = \frac{r \rho_1 c_1}{2h_1}. \end{aligned}$$

Согласно принятым обозначениям, после ряда преобразований уравнения (1) примут вид:

$$\frac{d\vartheta_1}{d\tau} + \vartheta_1 - \vartheta_2 = \varphi(\tau); \quad \frac{d\vartheta_2}{d\tau} + x_2 \vartheta_2 - x_1 \vartheta_1 = 0, \quad (2)$$

где

$$x_1 = \frac{v_1 \rho_1 c_1}{v_2 \rho_2 c_2}; \quad x_2 = \frac{abr \rho_1 c_1}{2v_2 \rho_2 c_2}; \quad P = \frac{U_n^2}{R};$$

v_1 — объем проволоки тензодатчика в см³; U_n, R — напряжение питания и сопротивление тензодатчика в в и ом.

Общее решение уравнений (2) будет следующим:

$$\vartheta_1 = A_1 e^{\alpha_1 \tau} + A_2 e^{\alpha_2 \tau} + \frac{z_2}{z_2 - z_1};$$

$$\vartheta_2 = (1 + \alpha_1) A_1 e^{\alpha_1 \tau} + (1 + \alpha_2) A_2 e^{\alpha_2 \tau} + \frac{z_1}{z_2 - z_1}, \quad (3)$$

где

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2}(1 + z_2) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(1 + z_2)^2 - (z_2 - z_1)}.$$

Таким образом, решение уравнений (2) с нулевыми начальными условиями позволяет определить температуру решетки и клея тензодатчика за время действия импульса. В установившемся режиме для температуры решетки тензодатчика и клея можно получить соотношения:

$$\vartheta_{1 \max} = A_1 \frac{1 - e^{-\alpha_1 (\tau_2 - \tau_1)}}{1 - e^{-\alpha_1 \tau_2}} + A_2 \frac{1 - e^{-\alpha_2 (\tau_2 - \tau_1)}}{1 - e^{-\alpha_2 \tau_2}} + \frac{z_2}{z_2 - z_1};$$

$$\vartheta_{1 \min} = A_1 \frac{e^{-\alpha_1 \tau_1}}{1 - e^{-\alpha_1 \tau_2}} + A_2 \frac{e^{-\alpha_2 \tau_2} - 1}{1 - e^{-\alpha_2 \tau_2}}; \quad (4)$$

$$\vartheta_{2 \max} = (1 + \alpha_1) A_1 \frac{1 - e^{-\alpha_1 (\tau_2 - \tau_1)}}{1 - e^{-\alpha_1 \tau_2}} + (1 + \alpha_2) A_2 \frac{1 - e^{-\alpha_2 (\tau_2 - \tau_1)}}{1 - e^{-\alpha_2 \tau_2}} + \frac{z_1}{z_2 - z_1};$$

$$\vartheta_{2 \min} = (1 + \alpha_1) A_1 \frac{e^{-\alpha_1 \tau_1}}{1 - e^{-\alpha_1 \tau_2}} + (1 + \alpha_2) A_2 \frac{e^{-\alpha_2 \tau_2} - 1}{1 - e^{-\alpha_2 \tau_2}}. \quad (5)$$

Решения уравнений (3)–(5), рассчитанные для частоты $f = 100$ гц, при амплитуде питания $U_n = 150$ в и сопротивления тензодатчика $R_T = 110$ ом приведены на рис. 2, а, б. Кривые графика наглядно по-

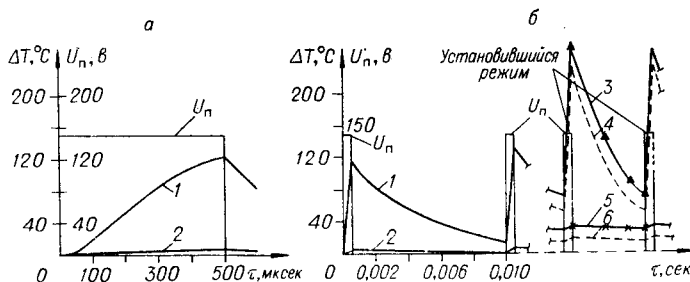


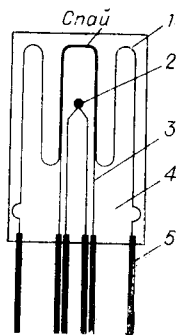
Рис. 2. Изменение температуры решетки и температуры клея тензодатчика в зависимости от частоты повторения импульсов: 1 — ΔT проволоки; 2 — ΔT клея; 3 — ΔT проволоки (эксперимент); 4 — ΔT проволоки (расчет); 5 — ΔT клея (эксперимент); 6 — ΔT клея (расчет).

казывают изменение температуры решетки и температуры клея тензодатчика в зависимости от длительности действия импульса и частоты повторения. Можно заметить, что даже при сравнительно малой длительности импульса температура решетки резко отличается от температуры клея тензодатчика.

Для подтверждения теоретических результатов был проведен эксперимент по определению нагрева решетки и клея тензодатчика при $U_n = 150$ в, частоте 100 гц и $\tau_{\text{имп}} = 5 \cdot 10^{-4}$ сек.

Эксперимент осуществлялся следующим образом. На стальную пластинку размерами $300 \times 30 \times 1,5$ наклеивался проволочный тензодатчик

с вмонтированными в него двумя микротермопарами градуировки медь — константан (МК). Рабочий спай одной микротермопары размещался в клее тензодатчика, второй — приваривался к тензочувствительной проволоке. Выводные электроды микротермопары изолировались от провода решетки клеем БФ-4 и выводились так, как показано на рис. 3. От генератора прямоугольных импульсов (ГПИ) на тензодатчик подавались импульсы с частотой $f=100$ гц и амплитудой $U_n = 150$ в; при этом регистрировалась температура нагрева решетки и клея тензодатчика в установившемся режиме. Запись изменения температуры осуществлялась на осциллографе магнитоэлектрической системы. На рис. 2, б показано изменение экспериментально измеренной и расчетной температуры решетки и клея тензодатчика в установившемся режиме. Из графика видно, что температура клея и решетки тензодатчика имеют удовлетворительную сходимость с расчетной.



Из рис. 2, а, б видно также, что показатели темпера-

Рис. 3. Монтажная схема тензодатчика с вмонтированными в него микротермопарами:

1 — чувствительная решетка; 2 — микротермопара градуировки медь — константан (МК), расположенная в клее; 3 — микротермопара МК, расположенная на тензорешетке; 4 — подложка; 5 — выводные концы.

туры перегрева решетки тензодатчика и клея существенно отличаются друг от друга. Поэтому необходимо учитывать температурное приращение сопротивления тензодатчика, которое при изменении температуры от t_0 до t_1 определяется выражением

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = (\alpha - \beta_n S_n) (T_1 - T_0), \quad (6)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления проволоки; β_n — температурный коэффициент расширения проволоки тензодатчика; S_n — тензочувствительность проволоки.

Руководствуясь формулой (6) и графиком рис. 2, а, б, можно сделать вывод, что для измерения полезного сигнала в тензометрических цепях с минимальной погрешностью необходимо стремиться к уменьшению разности температур, уменьшению температурного коэффициента расширения материала тензочувствительной решетки или уменьшению температурного коэффициента сопротивления проволоки решетки.

В качестве примера произведем расчет температурной погрешности тензодатчиков, изготовленных на бумажной основе с тензочувствительной решеткой, выполненной из константановой проволоки, и наклеенных на стальную пластинку.

При расчете принято, что температурный коэффициент сопротивления проволоки $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, линейный коэффициент расширения проволоки $\beta_n = 15 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, коэффициент тензочувствительности $S_n = 2,0$, температура перегрева проволоки в установившемся режиме (см. рис. 2) $T_n = 236^\circ\text{C}$, температура нагрева клея, а соответственно материала пластины 20°C .

После подстановки принятых значений в (6) и вычислений получим

$$\frac{\Delta R}{R} = -0,662. \quad (7)$$

Известно, что $\frac{\Delta R}{R} = S \varepsilon$, где $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ — относительная деформация; σ — напряжение в деформируемой пластине в $кг/мм^2$; E — модуль упругости материала пластины; для стали $E = 2 \cdot 10^4$ $кг/мм^2$.

Тогда, учитывая (7), можно найти, что ошибка тензометрирования за счет перегрева тензодатчика импульсным током составит

$$\sigma_r = \frac{E}{S_n} \frac{\Delta R}{R} = - 66 \text{ кг/мм}^2.$$

Таким образом, при выборе параметров импульсного питания измерительных цепей с тензодатчиками необходимо учитывать влияние перегрева проволоки тензорешетки на погрешность измерения деформаций исследуемого элемента конструкции. Неучет влияния перегрева проволоки, как показано в примере, приводит к большим погрешностям.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Левин, Ю. И. Семко. Импульсное питание параметрических датчиков и цифровое преобразование параметров M , L , C , R при импульсном питании измерительных цепей.— Автометрия, 1966, № 2.
2. Применение импульсного питания в схемах с тензодатчиками сопротивления.— Strain Gage Readings, 1962—1963, v. 5, № 5.
3. Стейн. Импульсное питание мостов с тензодатчиками.— Instruments and Control Systems, 1965, v. 38, № 2.
4. Иотс, Лукас и др. Импульсное питание тензодатчиков сопротивления при динамических измерениях многоканальной аппаратурой.— Proc. Soc. for Experimental Stress Analysis, 1953, v. XI, № 1.
5. Пани. Импульсное измерение величин с помощью тензодатчиков, включенных в мостовую схему.— La recherche aérospatiale, 1959, № 69.
6. Ф. Реза и С. Сили. Современный анализ электрических цепей. М., «Энергия», 1964.
7. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1947.

Поступила в редакцию
27 мая 1967 г.,
окончательный вариант —
25 августа 1967 г.