

**Е. М. ИВАНОВ, В. И. КОСТИН**

### **О ДИНАМИЧЕСКОЙ ТАРИРОВКЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ С ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ ВКЛЮЧЕНИЯ ДАТЧИКА**

В настоящее время для исследования динамических напряжений в деталях машин и элементах конструкций широко применяется метод проволочной тензометрии.

При динамическом тензометрировании используется аппаратура с потенциометрической схемой включения тензодатчика (рис. 1). Такая аппаратура исключает медленно изменяющиеся или статические сигналы (в том числе, от температурных изменений сопротивления тензодатчика), но требует динамической тарировки.

Для выполнения динамической тарировки применяют различные методы — возбуждение колебаний тарировочных балок в установках для усталостных и вибрационных испытаний, возбуждение тарировочной балки на частоте собственных колебаний электромагнитом и др.

Тарировочную балку в сечении, для которого рассчитана величина деформации, препарировывают тензодатчиками. Тарировочной установкой задаются определенные размахи колебания балки, величина которых фиксируется по микроскопу. Зная величину прогиба и записав сигналы с тензодатчика через усилитель на пленку шлейфового осциллографа, можно рассчитать масштаб записи, т. е. тарировочный коэффициент.

Такой метод трудоемок и требует специального оборудования, а также обладает в сравнении с предлагаемым худшей надежностью. Кроме того, динамическая тарировка на балке распространенного в настоящее время камертонного тарировочного устройства производится на собственной частоте колебаний балки (порядка 100÷150 гц), что требует учета частотных характеристик усилителей, кабелей и шлейфов.

Описываемый метод существенно упрощает работу по проведению динамической тарировки, позволяет отказаться от специального оборудования и дает возможность проведения тарировки непосредственно во время работы и на необходимой частоте.

Для выяснения сущности этого метода рассмотрим работу потенциометрической схемы включения тензодатчика (рис. 1). Она состоит из источника постоянного напряжения  $U$ , сопротивления элемента установки тока  $R_y$ , сопротивления тензодатчика  $R_a$  и миллиамперметра контроля тока.

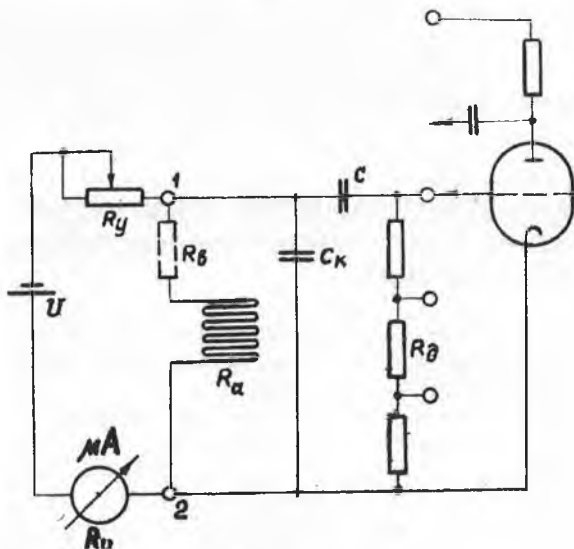


Рис. 1. Потенциометрическая схема включения тензодатчика в усилитель

При последовательном включении указанных элементов для постоянного тока имеем

$$U = I(R_y + R_a + R_u), \quad (1)$$

где  $I$  — постоянный ток;

$R_u$  — сопротивление миллиамперметра.

Падение напряжения на сопротивлении тензодатчика  $e_a = IR_a$ .

Для малых изменений сопротивления тензодатчика (как это имеет место в тензометрии) можно считать пропорциональным соответствующее изменение падения напряжения

$$\Delta e_a = I \Delta R_a. \quad (2)$$

При динамическом тензометрировании имеем периодическую функцию  $\Delta R_a(t)$ , а соответствующее  $\Delta I_a(t)$  можно представить как

переменную э. д. с. параметрического генератора с внутренним сопротивлением  $R_a$ . Здесь

$$\Delta e_a(t) = I \cdot \Delta R_a(t). \quad (3)$$

Пренебрегая сопротивлением источника постоянного напряжения, изменением сопротивления  $\Delta R_a(t)$  и влиянием входного сопротивления усилителя  $Z_{вх}$  ( $X_c, R_n$ ), которое в реальных схемах на 2÷3 порядка выше, чем выходное сопротивление потенциометрической схемы  $Z_{п.вых}$ , с погрешностью, не превышающей 1%, можно написать

$$\Delta e_a(t) = \Delta i_a(t) \cdot Z_n, \quad (4)$$

где  $\Delta i_a(t)$  — переменный ток в потенциометрической схеме;

$Z_n$  — полное сопротивление потенциометрической схемы при последовательном включении сопротивлений  $Z_a$  и  $Z_n$ ;

$Z_n$  — полное сопротивление последовательно включенных  $Z_y$ ,  $Z_u$  и параллельно с ними  $X_{ск}$ ;

$Z_a, Z_y, Z_u$  — полные сопротивления тензодатчика, элемента установки тока и миллиамперметра соответственно;

$X_{ск}$  — емкостное сопротивление датчика и кабеля, связывающего датчик с прибором.

Переменное напряжение на зажимах тензодатчика 1 и 2

$$\Delta u_a(t) = \Delta e_a(t) \frac{Z_n}{Z_n}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) значение  $\Delta e_a(t)$  из (3), получим

$$\Delta u_a(t) = I \cdot \Delta R_a(t) \cdot \frac{Z_n}{Z_n}. \quad (6)$$

В диапазоне частот динамического тензометрирования индуктивностью тензодатчика можно пренебречь, поэтому  $Z_a = R_a$ . Умножив и разделив (6) на  $R_a$ , получим зависимость, по которой переменное напряжение на выходе потенциометрической схемы прямо пропорционально постоянному току, относительному изменению сопротивления тензодатчика и полному выходному сопротивлению потенциометрической схемы, т. е.

$$\Delta u_a(t) = I \frac{\Delta R_a(t)}{R_a} \cdot Z_{п.вых}, \quad (7)$$

где  $Z_{п.вых} = \frac{R_a Z_n}{Z_n}$  — полное выходное сопротивление потенциометрической схемы, или полное сопротивление параллельно соединенных  $R_a, X_{ск}$  и  $(Z_y + Z_u)$ .

Обычно сопротивление элемента установки тока также активное, т. е.  $Z_y = R_y$ , а сопротивление  $Z_u$  можно выбрать небольшим (не более 1% от  $R_y$  в указанном диапазоне частот).

Зная зависимость выходного напряжения потенциометрической схемы от относительного изменения сопротивления тензодат-

чика (7), можно производить тарировку усилительной и регистрирующей частей измерительного канала. Для этого задаем на вход усилителя переменное напряжение от внешнего генератора и определяем «фиктивное» относительное изменение сопротивления по (7).

Наиболее удобно подавать тарировочное напряжение на выход потенциометрической схемы при высоком выходном сопротивлении внешнего генератора (рис. 2).

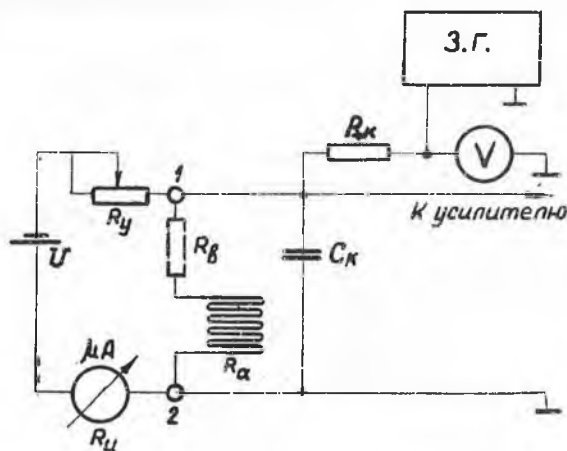


Рис. 2. Схема тарировки от генератора

Если выбрать сопротивление  $R_k$  достаточно большим,

$$\text{то } \Delta u_k(t) = u_k(t) \frac{Z_{п. вых}}{R_k}, \quad (8)$$

где  $\Delta u_k(t)$  — переменное напряжение тарировки;

$u_k(t)$  — переменное напряжение звукового генератора (ЗГ);

$R_k$  — сопротивление, определяющее выходное сопротивление внешнего генератора.

При тарировке на выбранной частоте

$$\Delta u_a(t) = \Delta u_k(t). \quad (9)$$

Подставляя в (9) значение  $\Delta u_a(t)$  из (7) и  $\Delta u_k(t)$  из (8), для амплитудных значений имеем

$$I \cdot \frac{\Delta R_{амГ}}{R_a} \cdot Z_{п. вых} = u_{км} \cdot \frac{Z_{п. вых}}{R_k} \quad (10)$$

или

$$\frac{\Delta R_{ам}}{R_a} = \frac{u_{км}}{I \cdot R_k}. \quad (11)$$

Индекс  $m$  обозначает амплитудные значения величин.

Видно, что в предлагаемой схеме тарировки отпадает необходимость учета выходного сопротивления потенциметрической схемы  $Z_{п. вых.}$ .

Преобразуем (11) для относительной деформации и введем эффективное значение напряжения генератора  $U_k$ .

$$\varepsilon_{км} = \frac{U_k}{S \cdot I \cdot R_k \cdot 0,707}, \quad (12)$$

где  $S$  — тензочувствительность тензодатчика;

$\varepsilon_{км}$  — амплитуда «фиктивной» относительной деформации, получаемой при тарировке.

Для удобства сопротивление  $R_k$  можно выбрать таким, чтобы численные значения  $U_k$  и  $\varepsilon_{км} \cdot 10^4$  совпадали. Так, если  $S=2,0$ ;  $I=30$  ма,  $R_k=235$  ком, то численное значение  $U_k[b]$  совпадает с  $\varepsilon_{км} \cdot 10^4$  (относительных единиц деформации).

Проведение тарировки по данному методу осуществляется следующим образом.

Собирается схема по рис. 2 или делается соответствующее переключение. Устанавливается номинальный ток  $I = \text{const}$ . Звуковым генератором задается напряжение необходимой амплитуды и частоты и производится запись тарировочного сигнала на пленку шлейфового осциллографа. Расшифровка результатов измерений производится по формуле

$$\varepsilon_{дм} = \varepsilon_{км} \frac{2A_d}{2A_k}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_{дм}$  — амплитуда относительной деформации, воспринимаемой решеткой тензодатчика при измерении;

$2A_d$  — размах записи измеряемой деформации;

$2A_k$  — размах записи тарировочного сигнала.

В некоторых случаях необходимо учитывать сопротивление проводов от тензодатчика к усилителю. На схемах рис. 1 и 2 это сопротивление  $R_b$  указано пунктиром и подключено последовательно с  $R_a$ . При тарировке сопротивление проводов  $R_b$  можно учесть введением полной тензочувствительности  $S_b$  по формулам

$$S_b = \frac{S}{1 + K}, \quad (14)$$

где  $K = \frac{R_b}{R_a}$ .

$$\varepsilon_{квм} = \frac{U_k}{S_b \cdot I \cdot R_k \cdot 0,707}. \quad (15)$$

Проведем сравнительную оценку точности указанных методов тарировки.

Согласно (12) амплитуда «фиктивной» деформации при тарировке от генератора равна

$$\epsilon_{км1} = \frac{U_k}{S_n \cdot I_n R_k \cdot 0,707},$$

где индекс «и» относится к процессу измерения, а «к» — к процессу тарировки.

Среднеквадратическая относительная погрешность задаваемой «фиктивной» деформации может быть найдена в соответствии с законом накопления погрешностей

$$\delta_{\epsilon_{км1}} = \pm \sqrt{\delta_{U_k}^2 + \delta_{S_n}^2 + \delta_{I_n}^2 + \delta_{R_k}^2}, \quad (16)$$

где  $\delta$  — среднеквадратическая относительная погрешность, а индексы при  $\delta$  соответствуют указанным обозначениям.

Если тарировка проводится с помощью тарировочной балки, то задаваемая деформация определяется следующим образом.

Амплитуда напряжения на выходе потенциометрической схемы при тарировке может быть получена из (7)

$$\Delta u_{км} = I_k \cdot S_k \cdot k_b \cdot y_b \cdot Z_{п. вых. к},$$

где  $k_b$  — коэффициент связи между прогибом и деформацией тарировочной балки ( $\epsilon_b = k_b y_b$ );

$y_b$  — амплитуда динамического прогиба тарировочной балки.

Амплитуда напряжения на выходе потенциометрической схемы при «фиктивной» тарировке в условиях измерений

$$\Delta u_{км} = I_n \cdot S_n \cdot \epsilon_{км2} \cdot Z_{п. вых. и}.$$

Следовательно, амплитуда задаваемой тарировочной деформации, приведенной к условиям измерений,

$$\epsilon_{км2} = \frac{I_k \cdot S_k \cdot k_b \cdot y_b \cdot Z_{п. вых. к}}{I_n \cdot S_n \cdot Z_{п. вых. и}}. \quad (17)$$

Аналогично предыдущему определяем среднеквадратическую относительную погрешность задаваемой «приведенной» деформации

$$\delta_{\epsilon_{км2}} = \pm \sqrt{\delta_{I_k}^2 + \delta_{S_k}^2 + \delta_{k_b}^2 + \delta_{y_b}^2 + \delta_{Z_{п. вых. к}}^2 + \delta_{I_n}^2 + \delta_{S_n}^2 + \delta_{Z_{п. вых. и}}^2}. \quad (18)$$

Не вдаваясь в подробный анализ источников погрешностей, из (16) и (18) делаем вывод, что тарировка от генератора обеспечивает большую точность, чем тарировка на балке. Помимо меньшей точности, можно отметить худшую надежность тарировки с помощью балки, так как применение специальных и сложных в эксплуатации приборов увеличивает возможность промахов. Кроме того, надежность тензодатчиков, используемых для тарировки, относительно невелика.

## ВЫВОДЫ

Опыт работы с тарировкой от звукового генератора показал его существенные преимущества в условиях массовых тензоизмерений по сравнению с динамической тарировкой на тарировочной балке, так как:

значительно сокращается время, необходимое для подготовки, проведения и получения результатов тарировки;

отпадает необходимость в дорогостоящих специальных тарировочных устройствах;

повышается точность и увеличивается надежность тарировки; тарировка проводится одновременно с проведением эксперимента и на необходимой частоте;

при расшифровке результатов тарировки отпадает необходимость учета сопротивлений потенциометрической схемы;

электрическая схема тарировки может быть построена так, что численное значение задаваемого напряжения генератора равно численному значению задаваемой «фиктивной» деформации.