

*В. А. Денисов*

## **ТОКОВИХРЕВЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

Экспериментальное исследование объектов авиадвиглостроения и энергомашиностроения ставит задачу бесконтактного измерения перемещений деталей, работающих при высоких температурах.

Следует различать два основных случая таких изменений:

1. Измерение перемещений, скорость изменения которых несоизмеримо велика по сравнению со скоростью изменения температуры. Сюда относится, например, измерение амплитуд вибраций лопаток турбин и осевых компрессоров.

2. Измерение перемещений, скорость изменения которых соизмерима со скоростью изменения температуры. Примером может служить измерение величины теплового удлинения вала турбины.

Кроме того, измерение перемещений в том и другом случае часто необходимо произвести в среде с меняющейся диэлектрической постоянной и при больших динамических скоростях деталей (например, измерение радиальных зазоров рабочих лопаток турбин).

Наиболее целесообразно в указанных выше случаях применить в качестве преобразователя перемещений токовихревой высокотемпературный датчик.

Измерения перемещений при обычных температурах токовихревыми преобразователями освоены большим кругом исследователей, однако измерения при высоких температурах в настоящее время почти не производятся. Основные трудности этих измерений вызваны, в первую очередь, трудностью изготовления надежно работающих токовихревых высокотемпературных датчиков.

Тепловое воздействие на токовихревой датчик приводит к изменению его активного сопротивления и индуктивности из-за неравенства нулю температурных коэффициентов сопротивления и

индуктивности. Учет этих изменений может быть произведен следующими способами:

1. Внесением поправки в результаты измерения. Поправка может быть внесена по тепловым характеристикам датчика, представляющим собой зависимости:

$$L = f_L(T, \omega); \quad C = f_C(T, \omega); \quad R = f_R(T).$$

В этом случае характеристики снимаются для нескольких датчиков из партии и по ним строятся средние характеристики.

С определенной точностью можно считать, что все датчики данной партии имеют указанные средние тепловые характеристики. Поправка вводится при обработке результатов измерений или автоматически.

2. Применением схемной компенсации (компенсационного датчика).

Применение обоих способов требует определенной стабильности тепловых характеристик токовихревых датчиков.

Для конкретизации этих требований вводится следующая классификация по степени необходимой стабильности:

1. Обеспечение постоянства тепловых характеристик для всех датчиков, независимости их от повторных нагревов, скорости и длительности нагрева.

В этом случае возможно внесение поправки в результаты измерения по тепловым характеристикам.

II. Обеспечение постоянства тепловых характеристик для всех датчиков, причем зависимость их от повторных нагревов должна быть одинакова. В этом случае возможно применение компенсационного датчика.

III. Обеспечение одинаковых зависимостей тепловых характеристик для всех датчиков от повторных нагревов, скорости и длительности нагрева.

В этом случае также возможно применение компенсационного датчика, но при условии, что подбор датчиков в пары (рабочий и компенсационный) производится после индивидуальной тепловой тарировки каждого датчика.

Основной принцип осуществления стабильных токовихревых высокотемпературных датчиков заключается в использовании каркасов, выполненных из радиочастотных керамических материалов, и принудительной фиксации катушки индуктивности на каркасе.

Тепловое воздействие на токовихревой датчик можно охарактеризовать следующими коэффициентами:

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (1)$$

температурным коэффициентом индуктивности;

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2)$$

температурным коэффициентом активного сопротивления;

$$\alpha_c = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT} \quad (3)$$

температурным коэффициентом собственной емкости катушки датчика;

$$\alpha_Q = \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dT} \quad (4)$$

температурным коэффициентом добротности,

$$\text{где} \quad Q = \frac{\omega L}{R} \quad (5)$$

$Q$  — добротность контура, в который включен датчик;

$L$  — индуктивность катушки датчика;

$R$  — активное сопротивление катушки датчика;

$C$  — собственная емкость катушки датчика.

Температурный коэффициент индуктивности ТКИ состоит в основном из трех главных составляющих. Первая составляющая ТКИ связана с изменением геометрических размеров катушки датчика. При изменении сцепления витков с каркасом датчика эта составляющая ТКИ численно равна температурному коэффициенту линейного расширения каркаса:

$$\alpha_{L_1} = a_l \quad (6)$$

Вторая составляющая ТКИ связана с применяемым типом измерительной схемы.

Так, например, при использовании датчика в генераторной измерительной схеме эта составляющая ТКИ для катушки с медным проводом равна [1]:

$$\alpha_{L_2} = \frac{13 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot C_{d g k}}{\sigma \left( S_0 - \frac{\sigma}{R_i} \right)} \quad (7)$$

где  $C_{d g k}$  — динамическая емкость лампы генератора;

$\sigma$  — коэффициент обратной связи;

$S_0$  — крутизна характеристики лампы;

$R_i$  — внутреннее сопротивление лампы.

Третья составляющая ТКИ  $\alpha_{L_3}$  трудно поддается расчету, т. к. она связана с экранирующим влиянием металла в месте установки датчика.

Температурный коэффициент активного сопротивления определяется температурным коэффициентом удельного электросопротивления провода датчика.

Для медных катушек он равен

$$\alpha_R = 0,0043 \text{ град.}^{-1} \quad (8)$$

Температурный коэффициент собственной емкости катушки датчика зависит от температурных коэффициентов диэлектричес-

кой проницаемости изоляции провода и материала каркаса. Найдем выражение для температурного коэффициента добротности через температурные коэффициенты индуктивности и активного сопротивления датчика.

Так как индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  датчика являются функциями температуры, то, подставляя (5) в (4), имеем

$$\alpha_Q = \frac{1}{Q} \left[ \frac{\partial Q}{\partial L} \cdot \frac{dL}{dT} + \frac{\partial Q}{\partial R} \cdot \frac{dR}{dT} \right],$$

используя (5) и учитывая, что

$$\frac{\partial Q}{\partial L} = \frac{\omega}{R}, \quad \frac{\partial Q}{\partial R} = -\frac{\omega L}{R^2};$$

получим

$$\alpha_Q = \alpha_L - \alpha_R, \quad (9)$$

т. е. температурный коэффициент добротности равен разности температурных коэффициентов индуктивности и активного сопротивления датчика.

Для большинства конструкций токовихревых датчиков собственная емкость мало зависит от температуры и  $\alpha_c \ll \alpha_L$ ;  $\alpha_c \ll \alpha_R$ .

Таким образом, пренебрегая температурным коэффициентом собственной емкости катушки датчика ввиду его малости, можно сделать вывод, что тепловое воздействие на токовихревой датчик и его стабильность можно охарактеризовать одним коэффициентом — температурным коэффициентом добротности.

Весьма распространенной схемой токовихревых преобразователей перемещений является схема с измерением частоты колебаний измерительного генератора.

Температурный коэффициент добротности токовихревого датчика в такой схеме можно определить, пользуясь выражениями (7), (8) и (9):

$$\alpha_Q = \left[ a_c + \frac{13 \cdot 10^{-3} \cdot I \cdot C_{d\text{дк}}}{z \left( S_0 - \frac{z}{R_1} \right)} + \alpha_{L_3} - 0,0043 \right] \text{град.}^{-1} \quad (10)$$

Анализируя выражения (5) и (10), можно видеть, что для обеспечения стабильности токовихревых высокотемпературных датчиков необходимо:

1) надежно зафиксировать катушку датчика на керамическом каркасе (геометрические размеры катушки датчика при нагреве и охлаждении будут соответственно увеличиваться и уменьшаться с цикличностью, задаваемой коэффициентом линейного расширения каркаса  $\alpha_1$ ;

2) стабилизировать режим работы измерительного генератора;

3) экранирующее влияние металла в месте установки (на-

пример, влияние элементов защиты датчика или его крепления) по возможности свести к минимуму. Этого можно достичь путем рационального конструирования датчика в каждом конкретном случае, а также выбором места его установки;

4) к материалам датчика предъявляются следующие требования: материал катушки датчика должен обладать большой электропроводностью и не окисляться под действием высоких температур; материал каркаса датчика должен обладать хорошо циклическим коэффициентом линейного расширения, малым старением при высоких температурах и малыми диэлектрическими потерями на рабочей частоте датчика.

При использовании токовихревых преобразователей перемещений относительное значение вносимой в датчик индуктивности может составить  $\frac{\Delta L_{\text{вн}}}{L} = 50\%$ . В схемах с измерительным генератором в этом случае девиация частоты будет до  $\frac{\Delta f}{f} = \pm 30\%$ .

В этой связи необходимо выяснить зависимость температурного коэффициента добротности от частоты.

Как известно [2], эффективные значения индуктивности  $L_{\text{эфф}}$  и активного сопротивления катушки  $R_{\text{эфф}}$  на частоте  $\omega$  равны:

$$L_{\text{эфф}} = \frac{L - CR^2 - \omega^2 L^2 C}{1 - 2\omega^2 LC + \omega^4 L^2 C^2 + \omega^2 C^2 R^2}; \quad (11)$$

$$R_{\text{эфф}} = \frac{R}{1 - 2\omega^2 LC + \omega^4 L^2 C^2 + \omega^2 C^2 R^2}, \quad (12)$$

где  $L = f_L(T)$ ;  $C = f_C(T)$  и  $R = f_R(T)$  — низкочастотные значения параметров катушки датчика.

После подстановки (11) в (1) и (12) в (2) с учетом (9) можно записать температурный коэффициент эффективной добротности на частоте  $\omega$  в виде:

$$\alpha_{Q_{\text{эфф}}} = \alpha_{L_{\text{эфф}}} - \alpha_{C_{\text{эфф}}} - \alpha_{R_{\text{эфф}}}, \quad (13)$$

где  $\alpha_{L_{\text{эфф}}} = A \cdot \alpha_L$  — эффективное значение температурного коэффициента индуктивности на частоте  $\omega$ ;

$\alpha_{C_{\text{эфф}}} = B \cdot \alpha_C$  — эффективное значение температурного коэффициента собственной емкости катушки датчика на частоте  $\omega$ ;

$\alpha_{R_{\text{эфф}}} = D \cdot \alpha_R$  — эффективное значение температурного коэффициента активного сопротивления датчика на частоте  $\omega$ ;

$\alpha_L, \alpha_C, \alpha_R$  — низкочастотные температурные коэффициенты.

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{L}{L_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\partial L_{\text{эфф}}}{\partial L} = \frac{L}{R_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\partial R_{\text{эфф}}}{\partial L} \\ B &= \frac{C}{R_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\partial R_{\text{эфф}}}{\partial C} = \frac{C}{L_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\partial L_{\text{эфф}}}{\partial C} \\ D &= \frac{R}{R_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\partial R_{\text{эфф}}}{\partial R} = \frac{R}{L_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\partial L_{\text{эфф}}}{\partial R} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

После подстановки (11) и (12) в (14) получим:

$$A = \frac{1 - 4p^2 + 5p^4 - 2p^6}{1 - 3p^2 - 3p^4 - p^6} \quad (15)$$

$$B = \frac{p^2 - 2p^4 + p^6}{1 - 3p^2 - 3p^4 - p^6} \quad (16)$$

$$D = \frac{1 - 3p^2 - 3p^4 - p^6}{1 - 3p^2 - 3p^4 - p^6} = 1, \quad (17)$$

где  $p = \frac{f}{f_0}$ , а  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  — собственная резонансная частота катушки датчика.

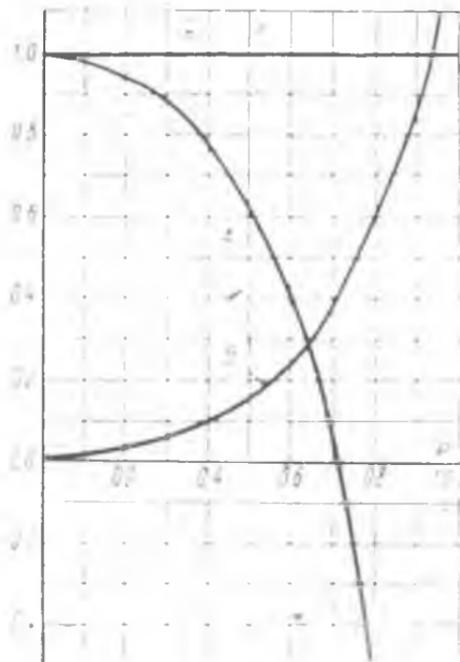


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $D$  от  $P$

На рис. 1 представлены графики зависимости коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $D$  от  $P$ , построенные по формулам (15), (16) и (17).

Из представленных графиков видно, что при  $P < 0,7$  эффективное значение температурного коэффициента собственной емкости  $\alpha_{C_{\text{эфф}}}$  мало и им можно пренебречь, тем более, что собственная емкость катушки датчика мала.

Тогда температурный коэффициент эффективной добротности датчика в области  $P < 0,7$  будет равен:

$$\alpha_{Q_{\text{эфф}}} = \alpha_{L_{\text{эфф}}} - \alpha_{R_{\text{эфф}}} = \alpha_{L_{\text{эфф}}} - D\alpha_R \quad (18)$$

С увеличением  $P$  влияние  $\alpha_{L_{\text{эфф}}}$  на эффективную добротность датчика ослабевает, исчезая при  $P = 0,7$ .

При  $P > 0,7$  величина  $\alpha_{L_{\text{эфф}}}$  резко возрастает, принимая большие отрицательные значения.

В этой области работы датчика в схеме измерительного генератора температурный коэффициент эффективной добротности

при девиации частоты значительно изменяется по величине. При измерениях динамических перемещений это может вызвать большую погрешность.

Таким образом, при значительной величине девиации частоты измерительного генератора целесообразно работать в области частот  $P < 0,3 \div 0,4$ . Если же необходимо работать в области частот  $P' > 0,4$ , то требуется обязательно учитывать изменение температурных коэффициентов в области девиации частоты.

### КОНСТРУКЦИИ ТОКОВИХРЕВЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИИ

Токвихревые высокотемпературные накладные датчики могут быть выполнены в виде цилиндрических или плоских спиральных катушек, закрепленных на диэлектрическом каркасе. Витки катушки датчика должны быть надежно изолированы. Материал катушки может быть серебряным, медным или биметаллическим. Покрытие медных проводов слоем никеля предотвращает их окисление при высоких температурах, этим стабилизируется датчик по активному сопротивлению при повторных нагревах.

Однако изоляция выпускаемых биметаллических проводов при нагреве теряет свою пластичность и разрушается при механическом воздействии (вибрация, тряска).

В работе [3] сообщается о разработке токовихревого высокотемпературного датчика. Катушки датчика намотаны тонким проводом в шелковой изоляции и для предохранения от выгорания при высоких температурах среды размещены в стеклянном баллоне, в котором создан вакуум до  $10^{-5}$ . Такой вакуум обеспечивает сохранность изоляции провода до температуры, близкой к температуре размягчения тугоплавкого молибденового стекла.

Недостатком этого датчика является технологическая сложность изготовления идентичных датчиков и малая механическая прочность стеклянного баллона.

В [4] приведен токовихревой датчик в виде печатной схемы на керамической пластине. Однако, как показали наши эксперименты, у датчиков из ультрафарфора и других керамических материалов с возженной катушкой индуктивности при воздействии высокочастотного поля датчика и температуры наблюдается интенсивный вынос серебра катушки датчика.

Связь серебра с керамикой нарушается, и катушка датчика отпадает от каркаса.

Физически это явление обуславливается перемещением ионов из керамики к серебряному слою.

Процесс разрушения катушки датчика с возженным серебром наиболее интенсивно происходит при температурах, начиная с  $+150^{\circ}\text{C}$  и выше. Стабильность параметров таких датчиков низка. Наиболее перспективным при создании токовихревых высокотемпературных датчиков представляется применение проводов в

сплошной стеклянной изоляции, получаемых по способу, предложенному профессором А. В. Улитовским [5], [6]. В настоящее время в Советском Союзе выпускаются провода в стеклянной изоляции из меди, чугуна, марганца и других металлов и сплавов с жилами различных диаметров.

Основное преимущество стеклопроводов — высокая термостойкость. Их стеклянная изоляция выдерживает длительное воздействие температур до  $+500^{\circ}\text{C}$ , сохраняя высокие электроизоляционные качества. Сопротивления изоляции стеклопроводов составляет не менее  $8 \cdot 10^{13}$  ом м. Стеклопровода хорошо переносят длительное воздействие вибрации и тряски.

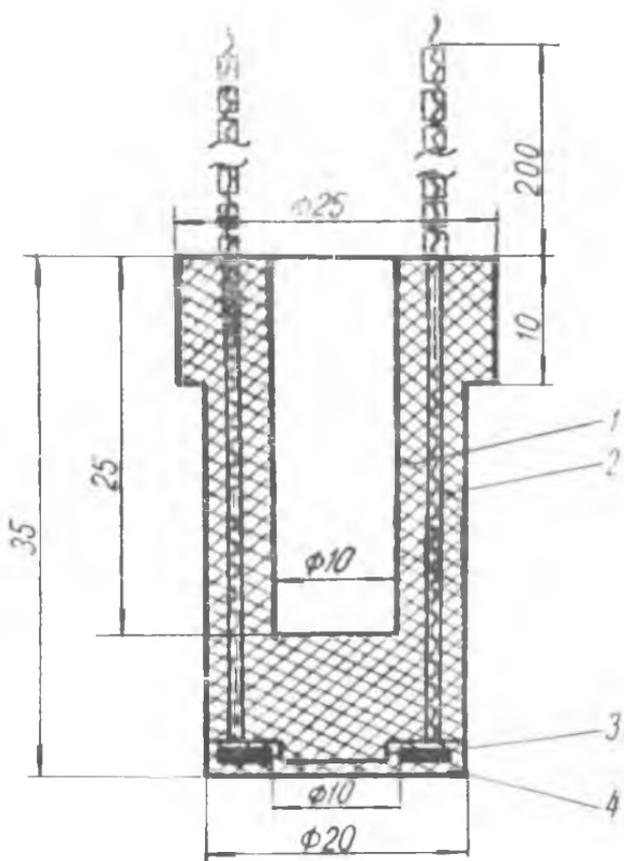


Рис. 2. Эскиз токовихревого высокотемпературного датчика

На рис. 2 приведен один из возможных вариантов конструкции токовихревого высокотемпературного датчика. Катушка датчика 3 представляет собой плоскую спираль из стеклопровода, которая крепится к керамическому каркасу 1 жаропрочным це-  
100



может быть поочередно подключен к контуру весьма стабильного генератора 2.

Генератор 2, включая электронную лампу, помещен внутри термостата с автоматической регулировкой температуры. Питание генератора осуществляется от стабилизированного выпрямителя.

Переключателем П2 выбирается начальная частота работы генератора, а следовательно, и датчиков. Измерение частоты генератора производится цифровым частотомером 3.

Для измерения температурных коэффициентов активного сопротивления датчиков используется измерительный мост 4, который на время измерений подключается переключателем П3.

На установке исследовались тепловые характеристики токовых высокотемпературных датчиков: с возженной серебряной катушкой индуктивности и с катушками из стеклопроводов.

Результаты исследований датчиков первого типа были приведены выше.

Исследования тепловых характеристик датчиков второго типа проводились для датчиков, витки стеклопровода которых крепились жаропрочным цементом и не были связаны с каркасом — типа а и для датчиков с конструкцией, приведенной на рис. 2 — типа в.

Исследования осуществлялись при изотермической выдержке и при циклическом нагреве датчиков в диапазоне температур от 25 до 500°C.

При циклическом нагреве до температуры 500°C определялось изменение активного сопротивления и индуктивности катушки датчиков.

При изотермической выдержке при различных температурах определялась стабильность параметров датчика и ресурс его работы.

В результате проведенных экспериментов выяснилось, что для повышения стабильности тепловых характеристик токовых датчиков из стеклопровода необходимо произвести предварительное оплавление изоляции стеклопроводов датчика.

Для этого датчик должен быть нагрет до температуры 620—650°C. Стекло при этой температуре приобретает пластичность, которая снимает механические напряжения в катушке датчика. Одновременно происходит надежное спекание витков друг с другом и катушка датчика представляет собой сплошной стеклянный монолит.

Коэффициент тепловой нестабильности активного сопротивления датчиков типов а и в после оплавления был

$$\beta_R = \frac{R' - R''}{R'}; \quad \beta_{Ra} = \beta_{Rb} = 2 \cdot 10^{-2}.$$

Коэффициент тепловой нестабильности индуктивности датчиков типов а и б после оплавления был

$$\beta_L = \frac{L' - L''}{L'}; \quad \beta_{La} = 4,5 \cdot 10^{-3}; \quad \beta_{Lb} = 1,2 \cdot 10^{-3}.$$

где  $L'$  и  $R'$  — значение параметров датчиков до нагрева;  
 $L''$  и  $R''$  — значение параметров датчиков после циклических  
нагревов с одночасовой изотермической выдержкой  
при температуре  $+500^\circ\text{C}$ .

На рис. 4 приведена зависимость активного сопротивления дат-  
чика от температуры нагрева.

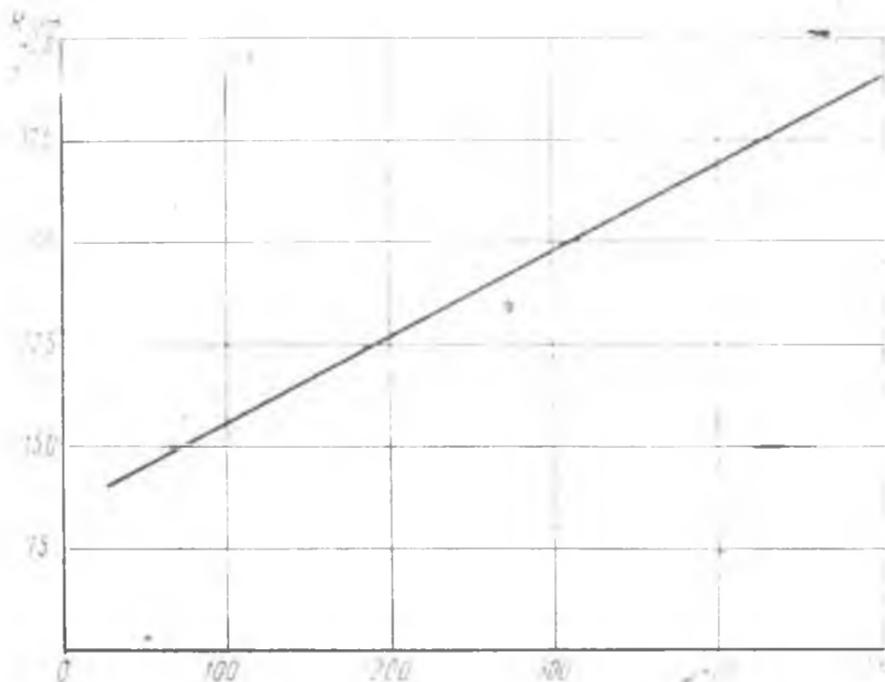


Рис. 4. График зависимости активного сопротивления токовихревого высокотемпературного датчика от температуры.

Как видно из приведенного графика, температурный коэффициент активного сопротивления датчиков типов *a* и *b* из стеклопровода постоянен в диапазоне температур от  $25$  до  $500^\circ\text{C}$  и равен

$$\alpha_R = 0,0043 \text{ град.}^{-1}$$

На рис. 5 приведены зависимости температурных коэффициентов индуктивности от температуры нагрева. Особенностью датчиков типа *b* является то, что в зоне температур  $275\text{--}285^\circ\text{C}$  температурный коэффициент индуктивности претерпевает резкий перелом. Это обуславливается, по-видимому, тем, что при этих температурах происходит рекристаллизация меди стеклопровода, его механические свойства резко меняются и происходит скачок размеров катушки датчика.

При дальнейшем нагревании температурный коэффициент индуктивности продолжает плавно изменяться.

Высокотемпературные датчики из стеклопровода длительно испытывались на вибростенде с ускорением до  $10 g$ . После испытаний стабильность тепловых характеристик оставалась прежней.

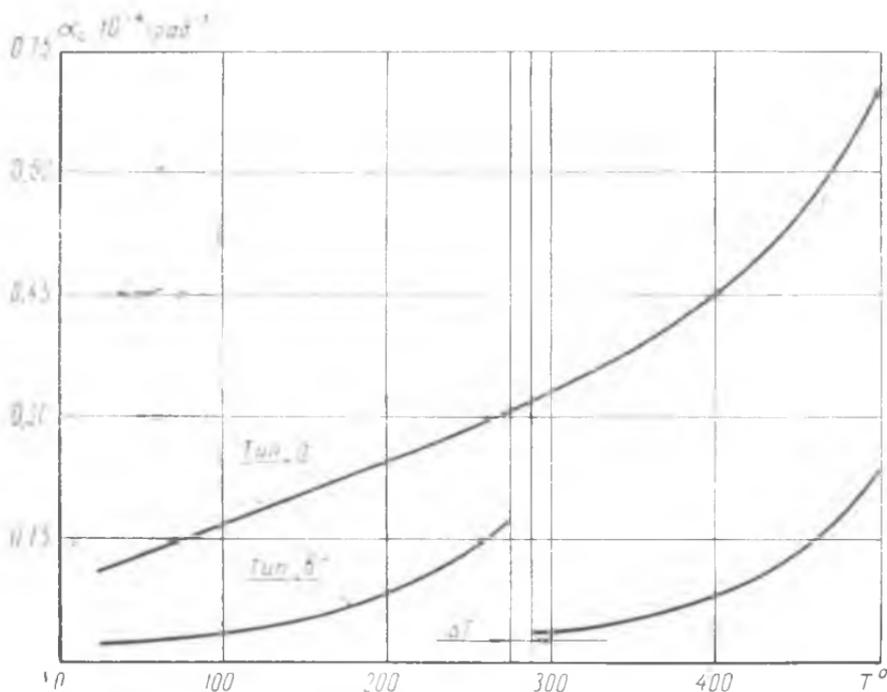


Рис. 5. График зависимости температурного коэффициента индуктивности высокотемпературных датчиков типа *a* и *b* от температуры.

## ВЫВОДЫ

1. Исследования тепловых характеристик токовихревых высокотемпературных датчиков с возженной катушкой в керамический каркас показали, что стабильность их параметров не удовлетворяет требованиям стабильности ни по одному пункту приведенной выше классификации датчиков по степени стабильности.

2. Исследования тепловых характеристик токовихревых высокотемпературных датчиков с катушками из стеклопроводов показали, что их стабильность отвечает III пункту классификации по степени стабильности для всех датчиков одной партии при температурах до  $+500^{\circ}\text{C}$  и изотермической выдержке 10 часов при температуре  $+500^{\circ}\text{C}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Шитов. Стабильные генераторы с контурной катушкой индуктивности работающей на частоте, близкой к собственной. «Радиотехника», т. 16, № 4, 1961.
2. Н. П. Потапов. Температурные коэффициенты мер добротности, «Измерительная техника», № 1, 1964.

3. Г. П. Зедгенидзе, Измерение температуры вращающихся деталей машин. Машгиз, 1962.

4. «Rotor Position Indicator for Studing Steam Turbines», «National Bureau of Standards», № 2, 1957.

5. А. В. Улитовский, Тонкая проволока в сплошной стеклянной изоляции и возможности ее применения. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 1957.

6. Б. А. Кожевников, М. А. Потапов, Тонкая проволока в сплошной стеклянной изоляции. «Вестник электропромышленности», № 8, Госэнергоиздат. 1956.

---