

О. П. Скобелев, Н. М. Старобинский

ПОДАВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ ЭНЕРГИИ В ДАТЧИКАХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ МЕТОДОМ «НАЧАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ»

Большинство существующих первичных преобразователей работают в установившемся или квазистационарном режиме. При измерениях в таком режиме значительное влияние оказывают параметры элементов датчиков, связанные с рассеянием энергии.

Изменения таких параметров в ряде случаев настолько велики, что ставят под сомнение достоверность измерений.

Известно, что при возмущении скачком поведение некоторых апериодических систем в начальный момент времени определяется только их инерционными свойствами и не зависит от параметров, характеризующих рассеяние энергии. Эту особенность переходного процесса можно использовать в измерительных целях для построения устройств, в которых без каких-либо конструктивных мер подавляется влияние указанных мешающих факторов. Одновременно с повышением точности возрастает быстродействие измерительных преобразователей.

В простейшей апериодической системе с инерционностью I , параметром рассеяния энергии r , реакция y на импульсное воздействие в виде скачка U имеет вид:

$$y = \frac{Y}{r} (1 - e^{-\tau/T}),$$

где $T = \frac{I}{r}$ — постоянная времени.

В момент времени $\tau = 0$ по производной $\frac{dy}{d\tau}$ возможно измерение возмущающей функции или инерционного параметра:

$$\left. \frac{dy}{d\tau} \right|_{\tau=0} = \frac{Y}{I} \quad (1)$$

Этот метод реализован в измерительных преобразователях энергетических воздействий с термоприемниками (ТП) в качестве чувствительных элементов [1, 2]. В частности, в термоприемниках ультразвукового и электромагнитного поля мощность теплового источника в поглотителе ТП характеризует локальную мощность поля — важную энергетическую характеристику, необходимую при изучении силового воздействия поля на вещество, физико-химические процессы и т. д.

Достоверность оценки локальной мощности поля в значительной мере зависит от точности измерения соответствующей мощности теплового источника в поглотителе ТП. В подавляющем большинстве случаев мощность теплового источника P определяется по установившемуся температурному перепаду Θ :

$$\Theta = \frac{P}{F\alpha},$$

где α — коэффициент теплоотдачи;

F — поверхность ТП.

В равной мере температурный перепад зависит от условий теплопередачи в окружающую среду. В ультразвуковых полях в жидкости возможные колебания коэффициента теплоотдачи особенно велики и вызывают весьма существенные погрешности.

Измерение мощности теплового источника (возмущающей функции) по производной температуры ТП по времени в момент включения источника исключает влияние теплопередачи (фактора рассеяния энергии).

По аналогии с (1) производная температуры зависит только от мощности теплового источника P , теплоемкости ТП c (инерционный параметр) и не зависит от теплопередачи в окружающую среду).

$$\left. \frac{d\Theta}{d\tau} \right|_{\tau \rightarrow 0} = \frac{P}{cV\gamma}, \quad (3)$$

где γ — плотность поглотителя;

V — его объем.

Разумеется, выражение (3) справедливо лишь для идеального ТП, в котором температуры по объему и по поверхности одинаковы.

В реальном ТП начальная стадия переходного процесса отличается от идеального, а величина производной в некоторой степени зависит от коэффициента теплоотдачи.

Для исследования влияния коэффициента теплоотдачи, а также других мешающих факторов рассматривается двухъёмкостная эквивалентная схема ТП (рис. 1). Емкости C_1 и C_2 характеризуют теплоемкости терморезистора и поглотителя; ρ_1 — отвод тепла по проводам, ρ_T — сопротивление теплового потоку поглотитель — терморезистор (в ТП с терморезистором КМТ-14 тепловое сопротивление терморезистора — $\rho_{тр}$, слоя стекла $\rho_{ст}$, поглоти-

тля — $\rho_{п1}$; ρ_2 — отвод с поверхности поглотителя в окружающую среду (ρ) и сопротивление тепловому потоку в самом поглотителе ($\rho_{п2}$). Мощности измерительного тока P_1 и искомого теплового источника P_2 эквивалентны соответствующим источникам тока, а падение напряжения на ρ_1 эквивалентно температуре терморезистора Θ_1 .

Рассматриваются два случая:

1. Мощность измерительного тока предполагается пренебрежимо малой $P_1=0$.

2. Мощность $P_1 \neq 0$.

В первом случае решение системы дифференциальных уравнений, составленных для узлов схемы в предположении малых изменений ΔP_2 и $\Delta \Theta_1$,

в пределах которых терморезистор можно считать линейной системой, определяет статическую и динамическую чувствительность

$$S_{ст} = \frac{\Delta \Theta_1 |_{\tau \rightarrow \infty}}{\Delta P_2} = K_2 = \frac{y_T}{y_1(y_2 + y_T) + y_2 y_T}, \quad (4)$$

$$S_{д} = \frac{d\Theta_1}{d\tau} \Big|_{\tau = \tau_m} = \frac{k_2}{\tau_1 - \tau_2} (e^{-\tau_m/\tau_1} - e^{-\tau_m/\tau_2}), \quad (5)$$

где y_1, y_2, y_T — проводимости, соответствующие ρ_1, ρ_2, ρ_T ; $\tau_{1,2} = f_{1,2}(\rho_1, \rho_2, \rho_T, c_1, c_2)$ — постоянные времени ТП*;

$\tau_m = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}$ — время, соответствующее максимуму функции $\Delta \Theta(\tau)$.

Исследование влияния теплоотдачи сводится к вычислению статической и динамической чувствительности для различных вариаций параметра ρ_2 . Параметры ТП ρ_1, ρ_T, c_1, c_2 при изменении ρ_2 сохраняются неизменными.

Чтобы оценить возможный диапазон изменений ρ_2 , соответствующих имеющемуся диапазону коэффициента теплоотдачи α , реальная конструкция ТП с терморезистором КМТ-14 моделируется трехслойным шаром. Предполагается также, что поглощение энергии происходит равномерно по всему объему поглотителя. Тогда

$$\rho_2 = \rho_{п2} + \rho = \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_2^3}{2} - \frac{3r_3^2}{2} + \frac{4}{\alpha r_2^2}, \quad (6)$$

* Постоянные времена τ_1, τ_2 определены в работе Старобинского Н. М., Скобелева О. П. «Метод определения параметров двухъёмкостной модели терморезистора», включенной в настоящий сборник.

где r_2, r_3 — соответственно радиусы поглотителя и терморезистора;
 λ_2 — теплопроводность поглотителя.
 При $y_1 \rightarrow 0$ статическая чувствительность $S_{ст} = K_2 \approx \rho_2$.

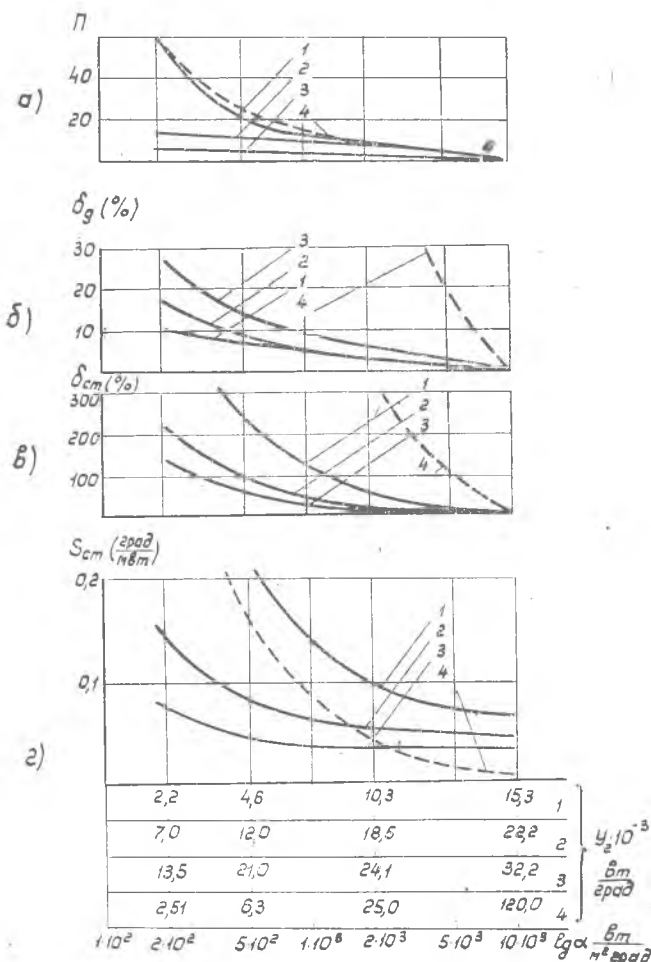


Рис. 2.

На рис. 2 представлены зависимости $S_{ст}$ от коэффициента теплоотдачи $\alpha = 1 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ при $y_1 \rightarrow 0$. Расчеты выполнены для ТП ультразвука с поглотителем из эпоксидной смолы и диаметрами поглотителя $d_2 \approx 2,0; 4,0; 6,0 \text{ мм}$, а также для ТП высокочастотного магнитного поля с поглотителем из оловянного припоя и диаметром $d_2 \approx 2,0 \text{ мм}$.

На рис. 2в приведены относительные изменения статической чувствительности $\delta_{ст}$:

$$\delta_{ст} = \frac{S_{\alpha} - S_{\alpha=10^4}}{S_{\alpha=10^4}} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Чем больше диаметр поглотителя, тем меньше влияние на чувствительность оказывает окружающая среда. Очевидно, что слой поглотителя играет роль теплоизоляции. Но даже в случае $d_2 \approx 6,0$ мм изменения $\delta_{ст}$ превышает 100%. Для поглотителя $d_2 \approx 2,0$ мм изменения статической чувствительности в том же диапазоне достигают 600%! Наибольшие отклонения наблюдаются у ТП магнитного поля, поглотитель которого выполнен из металла. Сопротивление слоя поглотителя ничтожно мало, его теплоизоляционные качества отсутствуют ($\rho_{п} \rightarrow 0$), чувствительность определяется сопротивлением теплопередачи ρ .

Влияние теплоотдачи α на динамическую чувствительность исследовалось с помощью выражения (5), в котором значение $k_2 \approx \rho_2$ определялось в соответствии с (6), а τ_1 , τ_2 , τ_m вычислялись по переменному параметру $y_2 = \frac{1}{\rho_2}$ и постоянным y_T , c_1 , c_2 , найденным экспериментально для ТП с диаметрами поглотителя $d_2 \approx 2,0$; 4,0; 6,0 мм*.

На рис. 2б представлены относительные изменения динамической чувствительности δ_d (7).

В отличие от изменений $S_{ст}$ наименьшее отклонение S_d наблюдается при минимальном диаметре поглотителя. Оно составляет всего 10%. Отклонение S_d при $d \approx 6,0$ мм порядка 30%.

Коэффициент подавления, определяемый как отношение $\Pi = \frac{\delta_c}{\delta_d} \tau$, позволяет оценить эффективность метода начальной производной (рис. 2а).

Наибольший коэффициент подавления соответствует ТП ультразвука (ТП УЗ) наименьшего диаметра. Эффективность метода повышается по мере уменьшения теплоотдачи ($\alpha < 2 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2 \text{ град}$. $\Pi > 10$).

Экспериментальным подтверждением возможности подавления влияния теплопередачи в окружающую среду служат начальные участки зависимости Θ , $\Theta_1(\tau)$.

Осциллограммы всего переходного процесса в различных условиях теплоотдачи, а также начальных участков при одной и той же локальной мощности поля приведены на рис. 3, 4, 5. На рис. 4 зависимости $\Theta_1(\tau)$ представлены в виде $U(\tau)$, где U — напряжение разбаланса мостовой схемы.

Величина производной $\frac{d\Theta_1}{d\tau}$, характеризующая динамическую

* Параметры y_T , c_1 , c_2 приведены в табл. 3 статьи Старобинского Н. М., Скобелева О. П. «Метод определения параметров двухмостовой модели термомприемника» в настоящем сборнике.

чувствительность ТП, определяется наклоном $\Theta_1(\tau)$ в точке перегиба. В приемниках ультразвука (ТПУЗ) (рис. 3, 4) наклон $\Theta, \Theta_1(\tau)$ при различных α оставался достаточно близким. Наибольшее отличие в динамической чувствительности наблюдается в ТП магнитного поля (ТПМП). В то же время установившиеся температурные перепады, определяющие $S_{ст}$, не только отличаются в не-

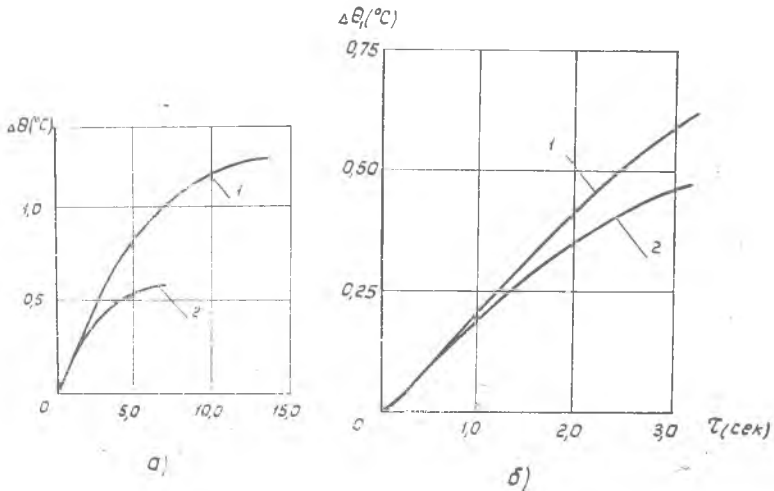


Рис. 3.

сколько раз, но и в некоторых случаях нестабильны во времени (рис. 4).

Рассмотрим теперь влияние коэффициента теплоотдачи с учетом нагрева, вызываемого измерительным током. В случае $P_1 \neq 0$ выражение для статической чувствительности

$$S_{ст} = K_1 \frac{P_1}{P_2} + K_2, \quad (8)$$

($P_1 \neq 0$)

где

$$K_1 = \frac{y_2 + y_T}{y_1(y_2 + y_T) + y_2 y_T}, \quad \text{при } y_1 = 0 \quad K_1 = \rho_T + \rho_2. \quad (9)$$

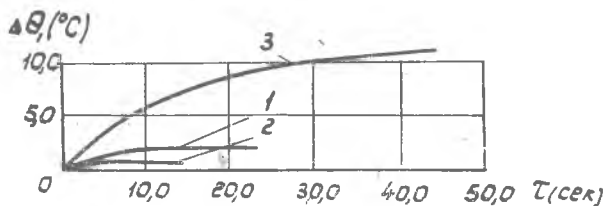
Для повышения чувствительности преобразователя температуры в напряжение желательно увеличение P_1 . Тогда при изменении условий теплоотдачи α возрастает влияние K_1 , связанного с ρ_2 и α (6).

Следовательно, от правильного выбора $\frac{P_1}{P_2}$ зависит величина возможной погрешности.

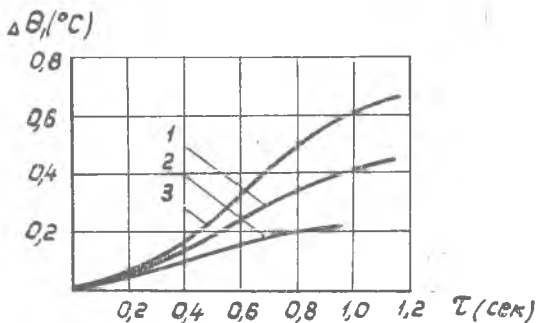
Выражение для динамической чувствительности S_d при $P_1 \neq 0$ получено решением системы дифференциальных уравнений, состав-

ленных для узлов эквивалентной схемы ТП, в виде $\Theta_1(\tau)$ и последующим его дифференцированием.

$$S_{\pi} = \frac{d\Theta_1}{d\tau} \Big|_{\tau=\tau_m} = \left\{ \left[\frac{h(a-b\tau_1)}{\tau_1^2} + K_1 \right] e^{-\tau_m/\tau_1} - \left[\frac{h(a-b\tau_2)}{\tau_2^2} + K_1 \right] e^{-\tau_m/\tau_2} \right\} \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \frac{P_1}{P_2} + \frac{K_2}{\tau_1 - \tau_2} (e^{-\tau_m/\tau_1} - e^{-\tau_m/\tau_2}), \quad (10)$$



а)



б)

Рис. 4.

где при $y_1 = 0$, $h = \frac{1}{y_2 y_\tau}$, $a = c_1 c_2 K_1$,

$$b = c_2 K_2 y_\tau + c_1 K_1 (y_2 + y_\tau) + c_2.$$

$$\tau_m = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{\left(a - b\tau_1 + d\tau_1^2 + \frac{P_2}{P_1} \tau_1^2 y_\tau \right) \tau_2^3}{\left(a - b\tau_2 + d\tau_2^2 + \frac{P_2}{P_1} \tau_2^2 y_\tau \right) \tau_1^3},$$

$$d = y_2 + y_\tau.$$

При определении $S_d(P_1 \neq 0)$ предполагалось также, что изменения P_1 при появлении P_2 пренебрежимо малы.

Чтобы сравнить влияние $\frac{P_1}{P_2}$ на статическую и динамическую чувствительность ТП, определим относительные изменения:

$$\delta_{ст} = \frac{S_{ст}(P_1 \neq 0) - S_{ст}(P_1 = 0)}{S_{ст}(P_1 = 0)} = \frac{K_1 P_1}{K_2 P_2} \cdot 100\%;$$

$$\delta_d = \frac{S_d(P_1 \neq 0) - S_d(P_1 = 0)}{S_d(P_1 = 0)}.$$

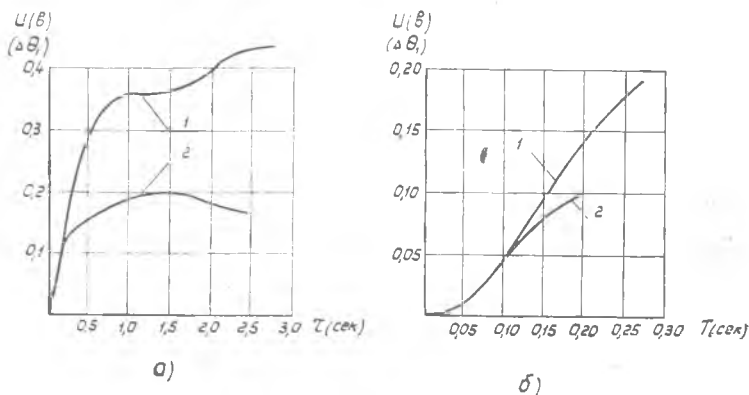


Рис. 5.

Для ТПУЗ $d_2 \approx 2,0$ мм диапазону изменений $\alpha = 200 \div 8000$ *вт/м²град* соответствуют предельные значения $y_2 = 2,0 \div 14$ *мвт/град*, $K_2 = 0,5 \div 0,071$ *град/мвт*, $K_1 = 0,936 \div 0,507$ *град/мвт* (9). При $\frac{P_1}{P_2} = 0,01$ для $\alpha = 200$ *вт/м²град*, $\delta_{ст} = 1,87\%$; для $\alpha = 8000$ *вт/м²град* $\delta_{ст} = 7,1\%$, а изменение $\sigma_{ст} = 7,1 - 1,87 = 5,23\%$. При $\frac{P_1}{P_2} = 0,1$ $\sigma_{ст} = 71,0 - 18,7 = 52,3\%$.

В аналогичных условиях изменения δ_d даже в случае $\frac{P_1}{P_2} = 0,1$ не превышают $\sigma_d = 1,0\%$.

Уменьшение влияния на динамическую чувствительность объясняется взаимной компенсацией слагаемых в квадратных и фигурных скобках выражения (10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение начального участка переходного процесса в аperiodических системах обеспечивает измерение импульсных воздействий при подавлении влияния параметров рассеяния энергии. При измерении энергетических воздействий с помощью ТП таким

параметром является коэффициент теплоотдачи. Исследования влияния теплоотдачи в окружающую среду показали, что при вариациях, соответствующих реальным условиям, имеют значительные изменения статической чувствительности (до 600% в ТП ультразвука).

Применение динамического метода измерений обеспечивает существенное уменьшение влияния теплоотдачи (до 10% при тех же вариациях коэффициента теплоотдачи).

Эффективность динамического метода повышается при уменьшении диаметра поглотителя и коэффициента теплоотдачи.

Подавление влияния теплоотдачи сохраняется и при наличии теплового источника от измерительного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. П. Скобелев, Ю. С. Быховский. Способ измерения интенсивности ультразвука. Авторское свидетельство № 133630, «Бюллетень изобретений» № 22, 1960.
2. О. П. Скобелев. Прибор для измерения локальной интенсивности ультразвука в жидких средах. ГОСИНТИ, № 18-63-186/1, Москва, 1961.

