

ВЛИЯНИЕ ФИКСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА ТРЕНИЯ ПРИБОРНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ

Э. Ф. КОЛОТИЙ

(Представлена научно-техническим семинаром факультета автоматики
и вычислительной техники)

Как известно [1], для измерения статического момента трения приборных шарикоподшипников можно применить электрический (обращенный) преобразователь, выходной величиной которого является сила или момент. Общая структурная схема прибора с электрическим преобразователем для измерения статического момента трения приборных шарикоподшипников приведена на рис. 1. Цель запуска приводит в действие генератор, на выходе которого появляется постепенно возрастающая электрическая величина y (ток или напряжение). С помощью электрического преобразователя эта величина преобразуется в момент M_β , приложенный к наружному кольцу испытуемого подшипника. Момент M_β также постепенно возрастает во времени. При выполнении условия $M_\beta > M_{тр}$ наружное кольцо подшипника приобретает некоторое ускорение. Это обстоятельство используется для фиксации того значения выходной электрической величины генератора, при котором появилось ускорение подвижной части (наружного кольца подшипника и надетого на него маховика, создающего определенную осевую нагрузку на подшипник). Функцию преобразования ускорения подвижной части в воздействие на генератор осуществляет фиксирующее устройство.

Как показано в [1], величина $\Delta M = M_\beta - M_{тр}$ может быть найдена, если известны момент инерции J подвижной части и наименьшее (пороговое) значение ускорения подвижной части

$$\left(\frac{a^2 x}{dt^2} \right)_{пор},$$

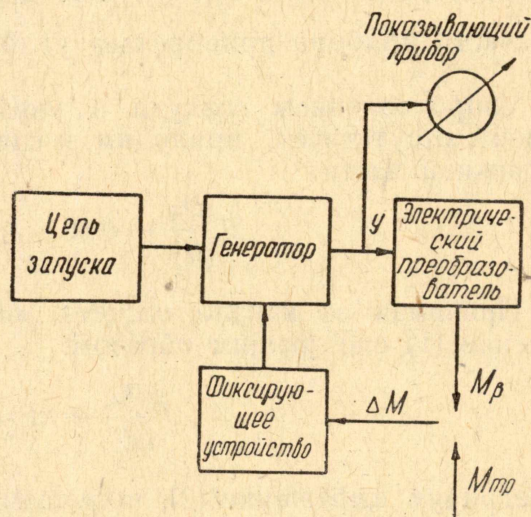


Рис. 1

при котором срабатывает фиксирующее устройство:

$$\Delta M = J \left(\frac{d^2 \alpha}{dt^2} \right)_{\text{пор}}.$$

Зная ΔM и воспользовавшись выражением $M_{\text{тр}} = M_{\beta} - \Delta M$, можно определить статический момент трения подшипника.

Однако создать фиксирующее устройство, реагирующее на ускорение подвижной части, затруднительно, поскольку величина этого ускорения обычно мала. Вследствие этого нами предлагается делать фиксирующие устройства, реагирующие не на ускорение подвижной части, а на угол α поворота подвижной части от начального (нулевого) положения. При этом, очевидно, есть смысл говорить о наименьшем (пороговом) значении угла α , при котором срабатывает фиксирующее устройство.

Пусть момент M_{β} нарастает во времени линейно, то есть $M_{\beta} = \kappa t$ (где κ — коэффициент пропорциональности). При этом так же линейно будет возрастать величина ΔM , причем разность $\Delta M = M_{\beta} - M_{\text{тр}}$ появится в момент времени t_1 (рис. 2) и скорость нарастания ΔM будет равна скорости нарастания M_{β} , то есть

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \frac{dM_{\beta}}{dt} = \kappa.$$

Очевидно, что $\Delta M = \kappa(t - t_1)$. Под влиянием момента ΔM подвижная часть прибора приобретает угловое ускорение $\frac{d^2 \alpha}{dt^2}$. Пренебре-

гая сопротивлением воздуха и учитывая, что противодействующий момент отсутствует, приходим к следующему уравнению движения подвижной части

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} - \kappa(t - t_1) = 0. \quad (1)$$

Принимая за начало отсчета момент времени t_1 , упростим выражение (1) следующим образом:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} - \kappa t = 0. \quad (2)$$

Интегрируя выражение (2), получаем

$$J \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{2} \kappa t^2 + C_1. \quad (3)$$

Принимая $C_1 = 0$ (начальная скорость движения подвижной части равна нулю), из равенства (3) путем интегрирования находим:

$$J\alpha = \frac{\kappa t^3}{6} + C_2. \quad (4)$$

При условии, что $C_2 = 0$ (начальный угол отклонения подвижной части равен нулю), равенство (4) примет вид

$$\alpha = \frac{\kappa}{6J} t^3. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет найти время t_2 , за которое подвижная

часть повернется на угол $\alpha_{\text{пор}}$, достаточный для срабатывания фиксирующего устройства:

$$t_2 = \sqrt[3]{\frac{6J\alpha_{\text{пор}}}{\kappa}}. \quad (6)$$

Используя выражение (6), определяем то значение момента ΔM , на которое момент M_β будет отличаться от измеряемого момента $M_{\text{тр}}$

$$\Delta M = \kappa t_2 = \sqrt[3]{6\kappa^2 J \alpha_{\text{пор}}}. \quad (7)$$

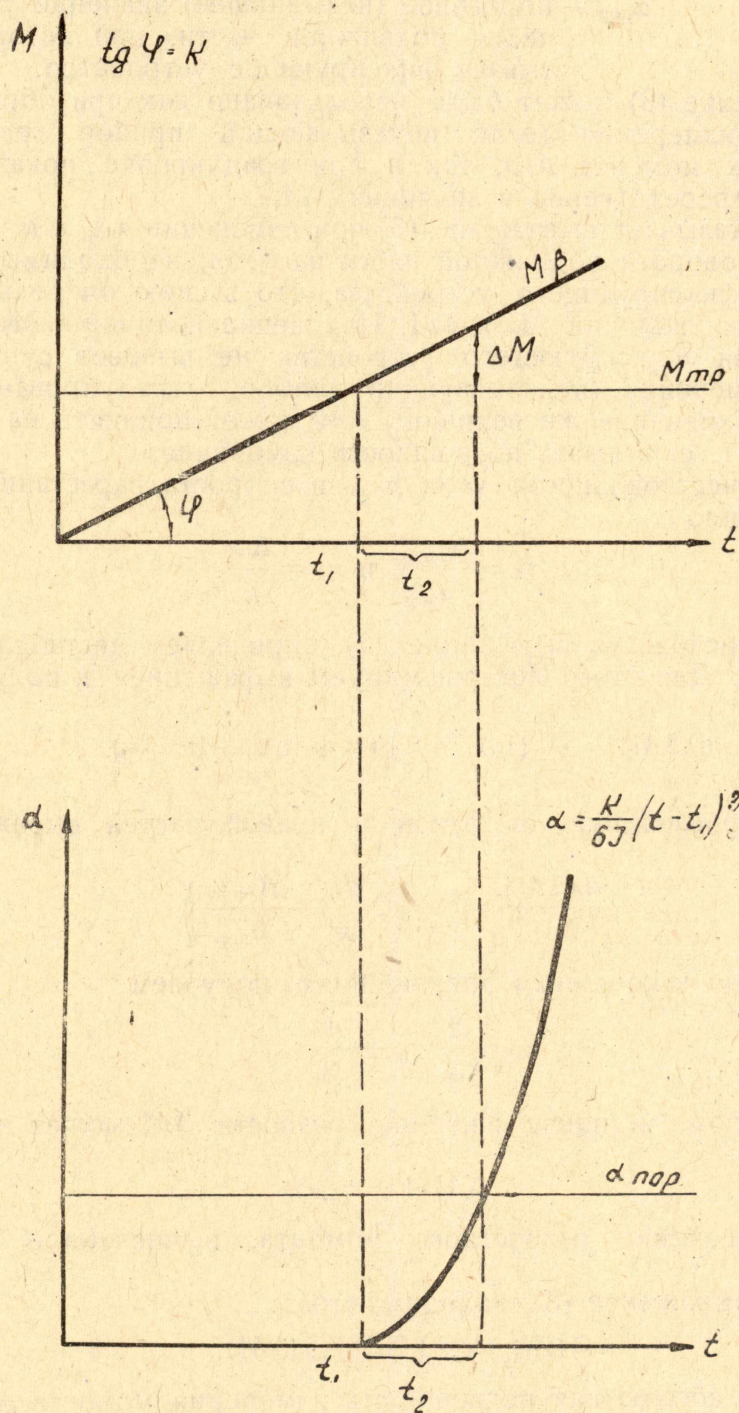


Рис. 2.

Истинная величина измеренного момента $M_{тр}$ может быть найдена, как

$$M_{тр} = M_{\beta} - \Delta M = M_{\beta} - \sqrt[3]{6\kappa^2 J \alpha_{пор}}, \quad (8)$$

где M_{β} — значение компенсирующего момента при срабатывании фиксирующего устройства;

$\kappa = \frac{dM_{\beta}}{dt} = \text{const}$ — скорость нарастания компенсирующего момента,

J — момент инерции подвижной части,

$\alpha_{пор}$ — пороговое (наименьшее) значение угла отклонения подвижной части, при котором срабатывает фиксирующее устройство.

Выражение (8) может быть использовано как при обработке результатов измерения (если показывающий прибор градуируется в значениях момента M_{β}), так и при градуировке показывающего прибора непосредственно в значениях $M_{тр}$.

Как показывает выражение (6) при изменении $\alpha_{пор}$ и κ изменяется время t_2 поворота подвижной части на угол, необходимый для срабатывания фиксирующего устройства, что в свою очередь приводит к изменению величин M_{β} и ΔM . Изменение величины M_{β} в момент срабатывания фиксирующего устройства не вызовет существенной ошибки измерения (показывающий прибор отградуирован в значениях M_{β}), изменение же величины ΔM может повлиять на результат измерения, т. е. вызвать погрешность измерения.

Пусть нестабильности угла $\alpha_{пор}$ и скорости нарастания κ равны соответственно

$$\gamma_{\alpha} = \frac{\Delta \alpha_{пор}}{\alpha_{пор}} \quad \text{и} \quad \gamma_{\kappa} = \frac{\Delta \kappa}{\kappa}.$$

Тогда, используя выражение (7), определяем нестабильность величины ΔM . Для этого логарифмируем выражение (7), получаем

$$\ln(\Delta M) = \frac{1}{3} (\ln 6 + 2 \ln \kappa + \ln J + \ln \alpha_{пор}). \quad (9)$$

Беря производную от левой и правой частей выражения (9), находим

$$\frac{d(\Delta M)}{\Delta M} = \frac{1}{3} \left(2 \frac{d\kappa}{\kappa} + \frac{d\alpha_{пор}}{\alpha_{пор}} \right) \quad (10)$$

или, переходя к конечным приращениям, получаем

$$\gamma_{\Delta M} = \frac{2}{3} \gamma_{\kappa} + \frac{1}{3} \gamma_{\alpha}. \quad (11)$$

Таким образом, истинное значение разности ΔM может колебаться в пределах

$$\Delta M (1 \pm \gamma_{\Delta M}),$$

где ΔM — значение разностного момента, вычисленное по выражению (7).

Используя выражение (8), находим, что

$$\delta(M_{тр}) = \delta(M_{\beta}) + \delta(\Delta M), \quad (12)$$

где $\delta(M_{тр})$ — абсолютная погрешность измерения момента $M_{тр}$,

$\delta(M_{\beta})$ — абсолютная погрешность момента M_{β} ,

$\delta(\Delta M)$ — абсолютная погрешность разностного момента ΔM .

Принимая $\delta(M_\beta) = 0$ (считаем, что показания стрелочного прибора точно соответствуют выходной величине электрического преобразователя — моменту M_β) получаем

$$\delta(M_{\text{тр}}) = \delta(\Delta M) = \Delta M \cdot \gamma_{\Delta M}. \quad (13)$$

Отсюда относительная погрешность измерения статического момента трения $M_{\text{тр}}$ исследуемого подшипника находится как

$$\begin{aligned} \gamma_{M_{\text{тр}}} &= \frac{\delta(M_{\text{тр}})}{M_{\text{тр}}} = \frac{\gamma_{\Delta M} \cdot \Delta M}{M_\beta - \Delta M} = \\ &= \frac{\left(\frac{2}{3} \gamma_k + \frac{1}{3} \gamma_\alpha \right) \sqrt[3]{6\kappa^2 J \alpha_{\text{пор}}}}{M_\beta - \sqrt[3]{6\kappa^2 J \alpha_{\text{пор}}}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет утверждать, что относительные неустойчивости скорости нарастания компенсирующего момента γ_k и порогового значения угла срабатывания фиксирующего устройства γ_α несущественно влияют на общую погрешность измерения статического момента трения подшипников. Это иллюстрируется следующим примером.

Пусть в момент срабатывания фиксирующего устройства показывающий прибор дал значение 2,5 г·см. Величина момента $\Delta M = 0,5$ г·см. Значения γ_k и γ_α равны соответственно 3 % и 6 %. Тогда

$$\gamma_{M_{\text{тр}}} = \frac{\left(\frac{2}{3} \cdot 3\% + \frac{1}{3} \cdot 6\% \right) \cdot 0,5 \text{ г·см}}{(2,5 - 0,5) \text{ г·см}} = 1\%.$$

Таким образом, даже не слишком жесткие требования к стабильности величин κ и α позволяют создать достаточно точный прибор для измерения статического момента трения приборных шарикоподшипников. В связи с изложенным следует заметить, что основную роль в погрешности измерения момента трения указанным методом будут играть, очевидно, неустойчивость коэффициента преобразования электрического преобразователя и погрешность показывающего прибора. Однако обсуждение этого вопроса выходит за рамки настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Ф. Колотий, И. Г. Лещенко. К вопросу об измерении момента трогания приборных шарикоподшипников, Известия ТПИ, т. 141, 1965 г.