

## НЕКОТОРЫЕ ПОГРЕШНОСТИ КОПИРОВАНИЯ ОДНОКООРДИНАТНЫХ ГИДРОКОПИРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ, АВТОМАТИЗИРУЮЩИХ ТОКАРНЫЕ СТАНКИ

И. А. НЕМИРОВСКИЙ

(Представлено кафедрой технологии машиностроения ТПИ)

Однокоординатные гидрокопировальные системы находят широкое применение для автоматизации металлорежущих станков. Такие системы, в частности, применены в гидросуппортах ГС-1, УП-240, КСТ-1 и др.

Важным показателем, характеризующим качество гидрокопировальной системы, является погрешность копирования.

В статье рассматриваются погрешности копирования, вносимые следящей гидросистемой в переходных режимах копирования, при условии аperiodической устойчивости системы.

При всех прочих равных условиях погрешность копирования, вызванная рассогласованием  $h$  в золотниковом узле гидроследящей системы, является функцией скорости копирования  $V_k$  и усилия  $P_{об}$ , развиваемых гидроцилиндром:

$$h = h(P_{об}, V_k), \quad (1)$$

где  $h$  — смещение следящего золотника из нейтрального положения, при котором  $P_{об} = 0$  и  $V_k = 0$ .

Тяговое усилие на поршне  $P_{об}$  зависит от преодолеваемых усилий: резания, сил сухого и вязкого трения, инерционных сил и сил веса (если имеются узлы, перемещаемые гидросистемой в вертикальном направлении).

Величина и направление развиваемой системой скорости копирования  $V_k$  зависит от копируемого профиля и скорости задающей подачи.

Следовательно,  $P_{об}$  и  $V_k$  в выражении (1) являются независимыми переменными.

Отсюда

$$dh = \frac{\partial h}{\partial P_{об}} \cdot dP_{об} + \frac{\partial h}{\partial V_k} dV_k. \quad (2)$$

В дифференциальное уравнение (2) входят статические характеристики системы

$$\frac{\partial P_{\partial s}}{\partial h} = E, \quad (3)$$

где  $E$  — жесткость гидросистемы, измеряемая в  $\text{кг/мм}$ ;

$$\frac{\partial V_k}{\partial h} = C, \quad (3a)$$

где  $C$  — коэффициент усиления системы по скорости,  $1/\text{сек}$ .

Статические характеристики  $E$  и  $C$  реальных систем нелинейны [4, 5, 6]. Принято [1, 2, 3] линеаризовать эти характеристики (рис. 1), что, естественно, приводит к некоторым погрешностям в расчетах.

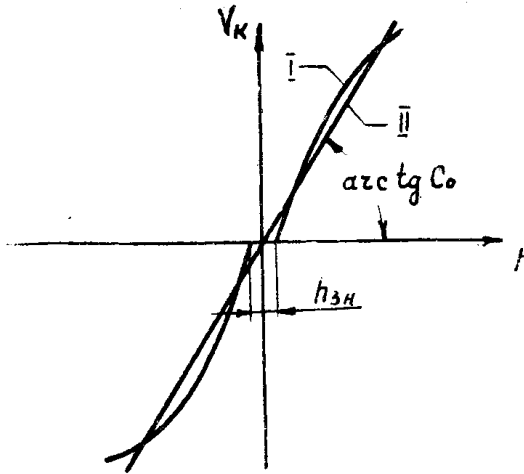


Рис. 1а.

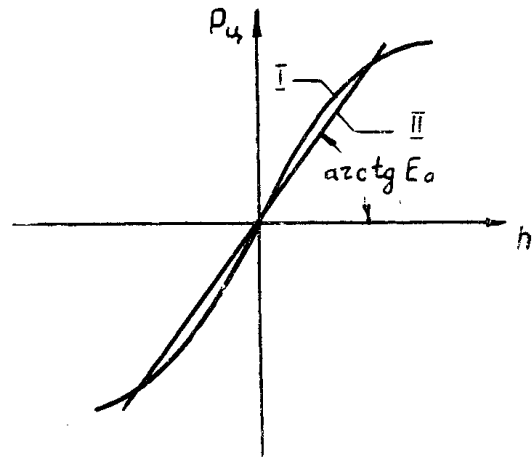


Рис. 1б.

Примем

$$E = E_0 = \text{const},$$

$$C = C_0 = \text{const}.$$

Тяговое усилие, развиваемое поршнем гидрокопировального устройства, равно

$$P_{\partial s} = P_0 + M \frac{dV_k}{dt}, \quad (4)$$

где  $P_{\partial s}^*$  — усилие, развиваемое гидросистемой;

$P_0$  — сумма сил резания и сухого трения, принимаемая постоянной (ограничиваем движение рабочего органа одним направлением, что соответствует копировальной обточке ступенчатых валиков с возрастающими размерами диаметров при аperiodической устойчивости системы; силы трения считаем не зависящими от скорости движения);

$M$  — приведенная масса движущихся узлов;

$V_k$  — скорость копировального движения.

Дифференцируя выражение (4), получаем

$$dP_{\partial s} = M \frac{d^2 V_k}{dt^2} dt. \quad (5)$$

Подставляя (3), (3а) и (5) в (2), получаем

$$dh = \frac{1}{E_0} M \frac{d^2 V_k}{dt^2} dt + \frac{1}{C_0} dV_k. \quad (6)$$

После интегрирования

$$h = \frac{M}{E_0} \frac{dV_k}{dt} + \frac{V_k}{C_0} + \text{const.} \quad (7)$$

При  $V_k = 0$  и  $\frac{dV_k}{dt} = 0$ , имеем  $h = \frac{P_0}{E_0}$ .

Таким образом,

$$h = \frac{M}{E_0} \frac{dV_k}{dt} + \frac{V_k}{C_0} + \frac{P_0}{E_0}, \quad (8)$$

или же

$$V_k = C_0 \left[ h - \frac{M}{E_0} \frac{dV_k}{dt} - \frac{P_0}{E_0} \right]. \quad (9)$$

Рассмотрим конкретный случай копирования гидроконтрольным суппортом перехода от цилиндрической к конической поверхности (рис. 2). Примем угол наклона направляющих гидросуппорта к оси

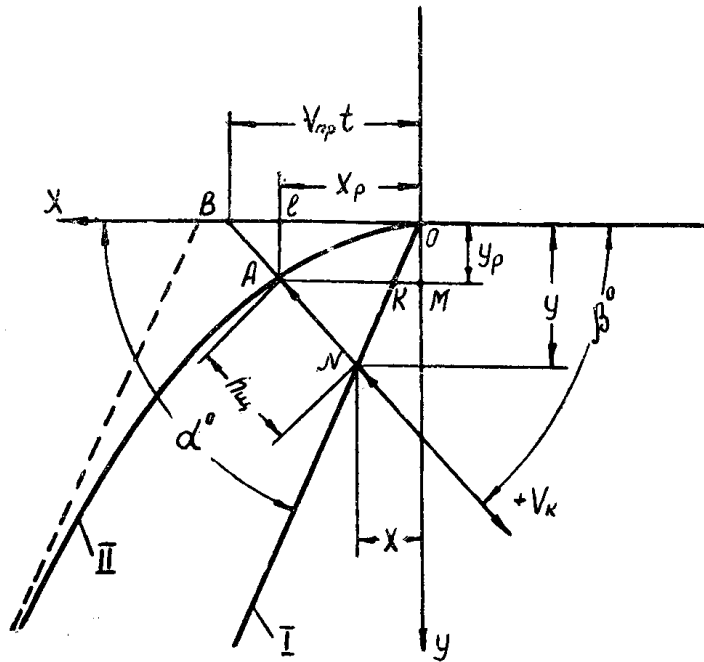


Рис. 2.

детали  $\beta^\circ$ , а угол между образующей копируемого конуса и осью детали  $\alpha^\circ$ .

Линия I на рис. 2 изображает профиль шаблона, а линия II — профиль детали, скопированный гидросистемой. Точка N определяет положение щупа гидросуппорта в какой-то момент времени  $t$ , а точка A — соответствующее положение резца, образующего профиль на детали.

Обозначим:

$s$  — продольная подача суппорта, в мм/об;

$n$  — число оборотов детали, в об/мин;

$V_{pr}$  — скорость продольной подачи, мм/сек,

$$V_{np} = n \cdot s \cdot \frac{1}{60},$$

$x$  и  $y$  — текущие координаты щупа, соответствующие профилю копира

$$x = V_{np} \cdot t \left[ 1 - \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right], \quad (10)$$

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (11)$$

$x_p$  и  $y_p$  — текущие координаты резца;

$i$  — передаточное отношение рычажного механизма, передающего движение от щупа к золотнику;  $i \geq 1$ ;

$h_{uc}$  — смещение копирующего щупа из нейтрального положения.

Смещение  $\delta x$  по оси  $x$  обработанного профиля относительно профиля копира можно подсчитать, как разность  $(x - x_p)$  при различных ( $y = y_p$ ), т. е.

$$\delta x = (x - x_p)_{y = y_p}. \quad (12)$$

Аналогично, смещение  $\delta y$  по оси  $y$

$$\delta y = (y - y_p)_{x = x_p}. \quad (13)$$

Зависимость  $x = f(y)$  задана профилем копира.  $x = f_t(t)$  — режимом механической обработки.

Для определения  $\delta x$  и  $\delta y$  необходимо знать

$$x_p = \varphi(y) \text{ и } x_p = \varphi_t(t).$$

Рассмотрим положение резца и щупа в момент времени  $t$ . Согласно рис. 2

$$h_{uc} = \frac{AK \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad AK = x_p - KM; \quad KM = y_p \operatorname{ctg} \alpha.$$

Отсюда

$$h_{uc} = (x_p - y_p \operatorname{ctg} \alpha) \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в формулу (9) и учитывая, что  $V_y = V_k \sin \beta$ , а  $h = h_{uc} \cdot i$ , получаем

$$V_y = C_0 \left[ i(x_p \sin \alpha - y_p \cos \alpha) \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{M}{E_0} \frac{dV_y}{dt} - \frac{P_0}{E_0} \right]. \quad (15)$$

Согласно рис. 2

$$x_p = \overline{OB} - \overline{EB} = V_{np} t - y_k \operatorname{ctg} \beta. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (15), получаем после элементарных преобразований

$$\frac{M}{E_0} \frac{d^2 y_p}{dt^2} + \frac{1}{C_0} \frac{dy_p}{dt} + i y_p = \frac{V_{np} i}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \cdot t + \frac{P_0}{E_0} \sin \beta. \quad (17)$$

Аналогично (с учетом, что  $V_{x_p} = V_k \cos \beta$ )

$$\frac{1}{\sin \beta} \frac{M}{E_0} \frac{d^2 x_p}{dt^2} + \frac{1}{C_0} \frac{dx_p}{dt} + \frac{i}{\sin \beta} x_p = \frac{V_{np} \cdot i \cdot \operatorname{ctg} \beta}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \cdot t + \frac{P_0}{E_0} \operatorname{ctg} \beta. \quad (18)$$

Решение дифференциальных уравнений (17) и (18) не представляет затруднений [8, 9] и здесь не приводится.

Получение сравнительно простых уравнений (17) и (18), дающих возможность совместно с выражениями (12) и (13) подсчитать осевые  $\delta_x$  и радиальные  $\delta_y$  погрешности, вносимые системой в переходном режиме копирования, стало возможным вследствие линеаризации статических характеристик системы и рассмотрения только тех систем, которые являются аperiodически устойчивыми. При этом не учитывалось, что сила трения имеет «падающую» характеристику.

Если же рассматривать колебательно-устойчивые системы с учетом нелинейности статических характеристик, зон нечувствительности, разрывности «падающей» характеристики сил трения, то решение получающихся нелинейных дифференциальных уравнений становится возможным либо при помощи электронной моделирующей установки, либо приближенными графо-аналитическими методами, например, методом А. В. Башарина [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Айзерман. Лекции по теории автоматического регулирования. Физматгиз, Москва, 1958.
2. Б. Л. Коробочкин. Гидравлические следящие системы копировальных станков и основы их проектирования. Автоматизация в машиностроении, Машгиз, 1957.
3. З. Ш. Блох. Динамика линейных систем автоматического регулирования машин, ГИТЛ, Москва, 1952.
4. А. Ф. Домрачев. Сравнительное исследование однокоординатных гидравлических следящих систем, применяемых в копировальных станках. Автореферат диссертации. Киев, 1954.
5. И. А. Немировский. Вестник машиностроения, № 3, 1960.
6. Васке. Das Verhalten hydraulischer kopiersysteme. Industrie—Anzeiger, № 98, 1957.
7. И. А. Немировский. Межвузовская научная конференция по автоматизации производства и автоматическим машинам. Тезисы докладов, г. Тула, 1960.
8. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Физматгиз, Москва, 1961.
9. В. В. Степанов. Курс дифференциальных уравнений. ГИТЛ, Москва, 1952.
10. А. В. Башарин. Расчет динамики и синтез нелинейных систем управления. Госэнергоиздат, 1960.