

УДК 621.436.001: 621.314.12

**Борисенко А. Н., Борисенко Е. А., Крикуненко Е. Н.****СИНТЕЗ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ**

Повышение экономической эффективности технологических процессов в машиностроительном производстве Украины связано с широким использованием компьютерных систем. Применение известных аппаратных средств имеет цель сократить время обработки детали и получить заданную шероховатость обработанной поверхности [1]. Входные и выходные сигналы, а также ее аппаратные средства подвержены действию помех. Помехи каналов обработки информации формируют полосу нечувствительности вокруг номинальной характеристики программного движения станка, что оказывает существенное влияние на его экономические показатели. Применение аппаратных средств управления фазовыми запаздываниями позволит повысить помехозащищенность каналов обработки информации на их основе разработать новые методы контроля программных движений станка, что и определяет актуальность данной научно-прикладной задачи.

Цель данного исследования – синтезировать математические модели процессов преобразования параметров алмазного шлифования в соответствующие фазовые запаздывания, оценить их методическую погрешность и создать аппаратные средства для реализации.

Задачи исследований – построить математическую модель фазового запаздывания в зависимости от угловой скорости и момента нагрузки на шлифовальный круг при равномерном и равнопеременном вращении.

Решение задачи – построим математическую модель фазового запаздывания в случае равномерного вращения шлифовального круга.

При работе двигателя (Д) привода шлифовального круга измеряется длительность управляющего импульса согласно формуле [2]:

$$t_{впр} = K_p M_n, \quad (1)$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности между длительностью импульса управления и моментом нагрузки двигателя  $M_n$ .

Длительность  $t_{впр}$  преобразуется с помощью импульсов частоты  $f' \gg \omega/2\pi$ .

$$N_3 = t_{впр} f' = K_p M_n f'. \quad (2)$$

В момент прихода круга в верхнюю опорную точку (ВОТ) формируется импульс длительностью  $t_{II}$ . Интервал времени  $t_{вн}$  с момента окончания этого импульса до момента прихода круга в нижнюю опорную точку (НОТ) преобразуется с помощью высокочастотных импульсов частотой  $f' \gg \omega/2\pi$  в некоторое число  $N_1$ , которое можно выразить так [3]:

$$N_1 = t_{вн}, \quad f = f' \left( \frac{\pi}{\omega} - t_{II} \right). \quad (3)$$

С момента захода круга в НОТ происходит преобразование интервала времени  $t_{HB}$  во второе число  $N_2$  с помощью импульсов той же частоты  $f' \gg \omega/2\pi$ , причем

$$N_2 = ft, (\%). \quad (4)$$

Числа  $N_2$  и  $N_3$  суммируются и в момент равенства  $N_2 + N_3 = N_1$ , то есть при соблюдении соотношения:

$$ж_р Mf' + tf = f \left( \frac{\pi}{\omega} - t_{II} \right) \quad (5)$$

формируется сигнал начала подачи круга. Частота следования импульсов  $f$  получается путем преобразования частоты следования импульсов ВОТ и НОТ в напряжение:

$$U = K_{\omega} \frac{\omega}{\pi},$$

$K_{\omega}$  – коэффициент преобразования частоты в напряжение, а напряжения – в частоту:

$$f = K_{II} U = K_{II} K_{\omega} \frac{\omega}{\pi}, \quad (6)$$

где  $K_{II}$  – первый коэффициент преобразования напряжения в частоту.

Частота импульсов  $f'$  также получается путем преобразования постоянного (по знаку) напряжения  $U$  в импульсный сигнал:

$$f' = K_V U = K_V K_{\omega} \frac{\omega}{\pi}, \quad (7)$$

где  $K_V$  – второй коэффициент преобразования напряжения в частоту.

Подставляя (6) и (7) в выражение (5) получаем:

$$t_{\%0} = \frac{\pi}{\omega} - t_{II} - \frac{ж_р M ж_V}{ж_{II}}.$$

Следовательно, время фазового запаздывания равно:

$$t_{\bullet} = \frac{\pi}{\omega} - t = t_{II} + \frac{ж_р M ж_V}{ж_{II}},$$

а фаза запаздывания определяется в виде:

$$\theta = \left( t_u + \frac{K_p M_H K_V}{K_{II}} \right) \omega. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой математическую модель процессов преобразования угловой скорости и момента нагрузки шлифовального круга в угол фазового запаздывания при  $\omega = \text{const}$ , то есть угловое ускорение  $\varepsilon = 0$ .

Рассмотрим процесс формирования фазового запаздывания при неравномерном с постоянным ускорением  $\varepsilon$  вращении шлифовального круга. При этом будем считать, что угловая скорость шлифовального круга равна  $\omega_0$  в начале оборота в ВОТ. С учетом выражения (3) число  $N_1$  можно записать таким образом [4]:

$$N_1 = f \left( \frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon\pi} - \omega_0}{\varepsilon} - t_{II} \right). \quad (9)$$

Второе число  $N_2$  определяется по (4). Соотношение, символизирующее начало движения шлифовального круга, с учетом (9) можно представить, как:

$$K_p M_H f' + t_{HB} f' = f \left( \frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon\pi} - \omega_0}{\varepsilon} - t_{II} \right). \quad (10)$$

Поскольку вращение круга считаем равноускоренным, то его средняя угловая скорость при движении из ВОТ в НОТ равна:

$$\omega_{-p1} = \frac{\omega_0 + \sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon\pi}}{2}, \quad (11)$$

и соответственно:

$$f = \frac{K_{II} K_{\omega}}{2\pi} \left( \omega_0 + \sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon\pi} \right). \quad (12)$$

По аналогии с (11) среднюю угловую скорость круга при его повороте из НОТ к ВОТ можно представить, как:

$$\omega_{cp2} = \frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon\pi} + \sqrt{\omega_0^2 + 4\varepsilon\pi}}{2},$$

в результате чего:

$$N_2 = \frac{K_{II} K_{H\theta}}{2\pi} \left( \sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon\pi} + \sqrt{\omega_0^2 + 4\varepsilon\pi} \right). \quad (13)$$

Шлифовальный круг получает ускорение с ВОТ при угловой скорости  $\omega_0$ , тогда:

$$f' = K_v K_{\omega} \frac{\omega_0}{\pi}. \quad (14)$$

С учетом (12), (13) и (14) выражение (5) преобразуется к виду:

$$\frac{K_p M_{HB} K_v \omega_0}{\pi} + \frac{K_{II} t_{HB}}{2\pi} \left( \sqrt{\omega_0^2 + 2a\pi} + \sqrt{\omega_0^2 + 4a\pi} \right) = \frac{K_{II}}{2\pi} \left( \omega_0 + \sqrt{\omega_0^2 + 2\epsilon\pi} \right) \left( \frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2\epsilon\pi} - \omega_0}{\epsilon} - t_H \right). \quad (15)$$

Используя обозначения

$$\omega_{HOT} = \sqrt{\omega_0^2 + 2a\pi}, \quad \omega_{BOT} = \sqrt{\omega_0^2 + 4\epsilon\pi},$$

запишем из выражения (13):

$$t_{HB} = \frac{(\omega_0 + \omega_{HOT}) \left( \frac{\omega_{HOT} - \omega_0}{\epsilon} - t_H \right) - \frac{2K_p \omega_0 M_H K_v}{K_H}}{\omega_{HOT} + \omega_{BOT}}. \quad (16)$$

За время  $t_{HB}$  вал поворачивается на угол:

$$\theta_{HOT} = \omega_{HOT} t_{HB} + \frac{\epsilon t_{HB}^2}{2}.$$

или с учетом (16):

$$\theta_{HOT} = \left[ \frac{(\omega_0 + \omega_{HOT}) \left( \frac{\omega_{HOT} - \omega_0}{\epsilon} - t_H \right) - \frac{2K_p M_H K_v \omega_0}{K_H}}{\omega_{HOT} + \omega_{BOT}} \right] \times \left\{ \omega_{HOT} + \frac{\epsilon}{2} \left[ \frac{(\omega_0 + \omega_{HOT}) \left( \frac{\omega_{HOT} - \omega_0}{\epsilon} - t_H \right) - \frac{2K_p M_H K_v \omega_0}{K_H}}{\omega_{HOT} + \omega_{BOT}} \right] \right\}. \quad (17)$$

Тогда угол фазового запаздывания с учетом (17) можно записать:

$$\theta = \pi - \theta_{HOT} = \pi - \left[ \frac{(\omega_0 + \omega_{HOT}) \left( \frac{\omega_{HOT} - \omega_0}{\epsilon} - t_H \right) - \frac{2K_p M_H K_v \omega_0}{K_H}}{\omega_{HOT} + \omega_{BOT}} \right] \times \left\{ \omega_{HOT} + \frac{\epsilon}{2} \left[ \frac{(\omega_0 + \omega_{HOT}) \left( \frac{\omega_{HOT} - \omega_0}{\epsilon} - t_H \right) - \frac{2K_p M_H K_v \omega_0}{K_H}}{\omega_{HOT} + \omega_{BOT}} \right] \right\}. \quad (18)$$

Полученная модель отражает зависимость фазового запаздывания от угловой скорости шлифовального круга, его углового ускорения и момента нагрузки в переходных режимах. Тогда с учетом (18) относительную методическую погрешность формирования фазы запаздывания можно представить выражением:

$$\delta = \frac{\pi - S_1 \left( \omega_{\text{НОТ}} + \frac{\varepsilon}{2} S_1 \right)}{\omega_{\text{ВОТ}} \left( t_{\text{И}} + \frac{K_p M_H K_v}{K_{\text{И}}} \right)} - 1, \quad S_1 = (\omega_0 + \omega_{\text{НОТ}}) \left( \frac{\omega_{\text{НОТ}} - \omega_0}{\varepsilon} - t_{\text{И}} \right) - \frac{2K_p M_H K_v \omega_0}{K_{\text{И}}}.$$

Следовательно, методическая погрешность является функцией многих параметров. В качестве примера для конкретного режима ее график показан на рис. 1.

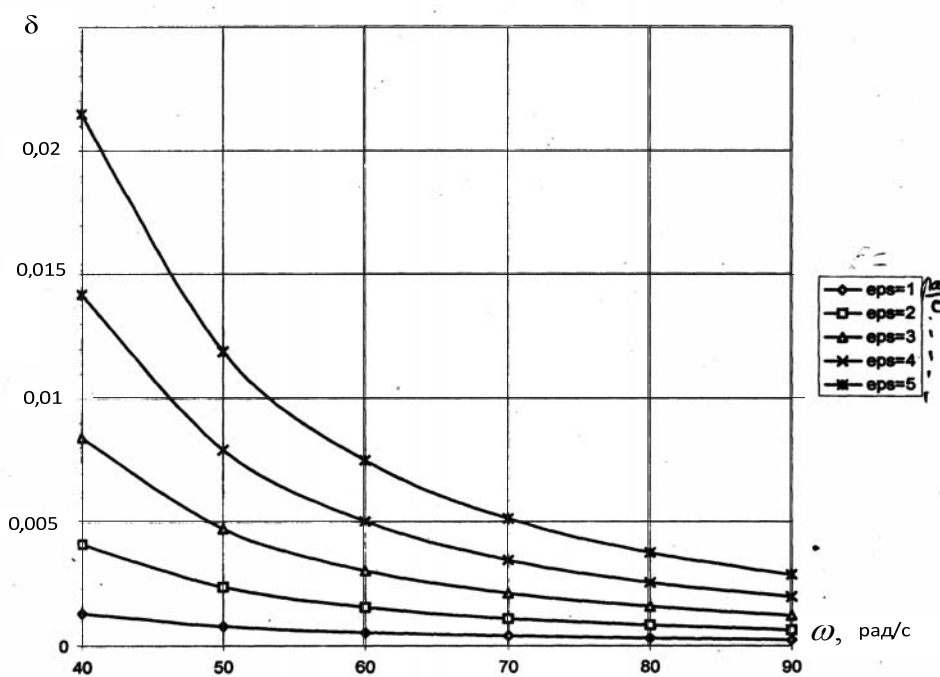


Рис. 1. Графики погрешностей

## ВЫВОДЫ

Из анализа данных рисунка видно, что методическая погрешность формирования фазового запаздывания растет с увеличением углового ускорения шлифовального круга и падает с ростом его угловой скорости.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еникеев А. Ф. *Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования* / А. Ф. Еникеев. – Краматорск : ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Борисенко А. Н. *Анализ характеристик сдвига фаз между импульсными последовательностями* / А. Н. Борисенко, В. П. Самсонов, А. Ф. Еникеев // *Техническая электродинамика*. – 1986. – № 1. – С. 92–94.
3. Борисенко А. М. *Определение оптимальной частоты квантующих импульсов цифрового интегрирующего фазометра по минимуму среднеквадратической ошибки* / А. М. Борисенко, О. В. Сосіна // *Український метрологічний журнал*. – Харків, 2012. – № 2. – С. 50–55.
4. *Цифровые методы измерения сдвига фаз* / [Гл. ред. С. Д. Кондорф]. – Н. : Наука, 1979. – 288 с.