

Ю.А. СИЗЫЙ, д-р. техн. наук, *А.В. ФЕСЕНКО*, канд. техн. наук, *Ю.Н. ЛЮБИМЫЙ*, *С.Н. КАДЫГРОБ*, НТУ «ХПИ», г. Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

Розробка математичної моделі переривчастого шліфування в замкнутій технологічній системі, що дозволяє виконати аналіз конструктивних особливостей круга й вибрати раціональні режими різання.

Working out of mathematical model of faltering grind in the closed technological system, allowing to make the analysis of design features of a circle and to choose rational modes of cutting.

В настоящее время актуальной проблемой является обеспечение заданного качества и повышения производительности шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов. Улучшение качества поверхностного слоя деталей в основном решается созданием определенных температурных условий съема припуска за счет оптимального выбора режимов шлифования, характеристик абразивного инструмента и смазочно–охлаждающих технологических средств.

Перспективным направлением в интенсификации процессов алмазно–абразивной обработки следует считать прерывистое шлифование. При таком виде обработки происходит периодическое прерывание контакта круга с заготовкой, что приводит к уменьшению теплового насыщения поверхностных слоев обрабатываемого материала. Это позволяет повысить качество обработки при одновременном увеличении производительности шлифования. Причем эффект от прерывания контакта круга с заготовкой в ряде случаев выше, чем от оптимизации условий обычного шлифования [1].

Вопросы кинематики прерывистого шлифования, теплофизики, динамики, оптимизации выбора конструктивных параметров круга и режимов шлифования рассматривались в ряде работ. При этом предложены методики аналитического решения задач по определению области устойчивой работы круга. Однако нет количественного анализа величины возникающих колебаний глубины шлифования в результате переменной жесткости контакта круга с обрабатываемой поверхностью.

Такой анализ имеет важное практическое значение, поскольку колебания системы в значительной степени влияют на шероховатость обработанной поверхности. При этом в каждом конкретном условиях применения прерывистого шлифования амплитуды колебаний будут различными в связи с переменной жесткостью системы станка, массами круга и детали, демпфирующими свойствами системы.

Исследования динамики процесса резания прерывистыми шлифовальными кругами проводились ранее применительно к упругой схеме при обди-

рочном плоском шлифовании [2]. В настоящей работе рассмотрена жесткая схема круглого наружного шлифования, при которой задается глубина резания, а производными являются усилия и деформации в технологической системе.

При жесткой схеме шлифования круг подается на определенную глубину h_{ex} механизмом подачи. Учитывая упругие деформации станка под действием радиальной составляющей силы резания P_y , инерционность движущихся масс станка и силы демпфирования, фактическая глубина шлифования h_{ϕ} будет отличаться на величину смещения круга x_2 и заготовки x_1 относительно друг друга (рис. 1).

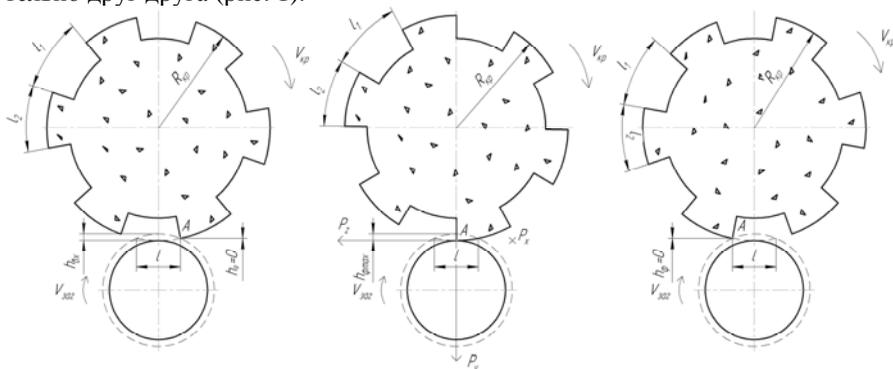


Рис. 1 – Схема шлифования

Функциональная схема процесса прерывистого шлифования в технологической системе определяется в зависимости от принятой дискретной модели станка. В настоящих исследованиях рассматривается изменение глубины шлифования при достаточно высокочастотном воздействии прерывистой поверхности круга. В связи с большой инерционностью шлифовальная бабка не будет реагировать на высокие частоты колебаний, возникающие в процессе резания [3], поэтому можно ограничиться двухмассовой моделью станка состоящей из масс m_1 заготовки и m_2 круга на шпинделе.

Принимаем следующие данные для расчета: масса заготовки $m_1 = 10$ кг, круга $m_2 = 46$ кг; жесткость заготовки $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$ Н/м, круга $c_2 = 1 \cdot 10^8$ Н/м; демпфирование (вязкое трение) заготовки $\lambda_1 = 1,3 \cdot 10^4$ Н·с/м, круга $\lambda_2 = 1 \cdot 10^4$ Н·с/м (рис.5). Эти условия соответствуют шлифованию вала диаметром 100 мм на станке 3М152ВФ–20–2 [4].

Входным сигналом в систему является глубина шлифования h_{ex} , которая принимает какое-то фактическое значение h_{ϕ} , когда поверхность заготовки входит в контакт с выступом круга, и ноль – когда подходит впадина.

Возникающая при шлифовании радиальная составляющая силы резания P_y приводит к деформациям систем шлифовального круга x_2 и заготовки x_1 . Суммарная деформация в зоне контакта круга и заготовки x_3 приводит к изменению фактической глубины шлифования.

Принимая направление координат x_1 и x_2 в противоположные стороны, ведущее к увеличению глубины шлифования, получаем, что сумма $x_3 = x_1 + x_2$ составит общее изменение глубины шлифования за счет смещения круга и заготовки. Вычитая смещение x_3 из $h_{вх}$ получим фактическую глубину шлифования h_ϕ , которая и определяет величину P_y .

Описанные выше закономерности могут быть представлены в виде функциональной схемы прерывистого шлифования (рис.2).

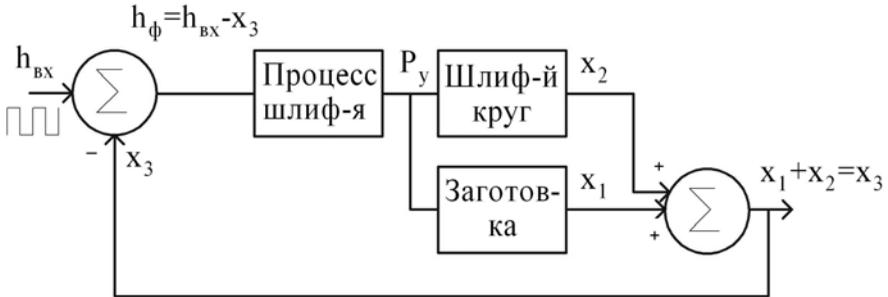


Рис. 2 – Функциональная схема процесса прерывистого шлифования

Характерной особенностью прерывистого шлифования является то, что по мере износа круга происходит самоформирование его макропрофиля. На рабочих выступах образуются фронтальные поверхности, расположенные под некоторым углом атаки к плоскости резания [1].

При моделировании было принято допущение, при котором входной сигнал представлен в виде прямоугольных выступов, высота которых $h_{вх}$, а расстояние между ними равно периоду T воздействия на заготовку.

Рассмотрим закономерность данного положения. Обычно, при круглом наружном шлифовании, глубина шлифования невелика и составляет для типичных режимов величину порядка 0,02 мм.

Длину дуги контакта можно рассчитать по формуле Маслова Е.Н. [5]:

$$l_k = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot r \cdot h}{R + r}}, \quad (1)$$

или Островского В.И. [6]:

$$l_k = \sqrt{2 \cdot R_e \cdot h}, \quad (2)$$

где R – радиус круга, м; r – радиус заготовки, м; R_e – эквивалентный радиус, м.

$$R_e = \frac{R}{1 + \frac{R}{r}},$$

Формулы (1) и (2) полностью идентичны. Так, например, применительно к станку 3М152ВФ–20–2 с кругом диаметром 600 мм, и заготовкой диаметром 100 мм, при $h = 0,02$ мм получаем $l_k = 1,328$ мм. Время, в течение которого глубина шлифования возрастает от нуля до значения $h_{\phi \max}$ или уменьшается от $h_{\phi \max}$ до нуля, будет равно времени перемещения переднего или заднего фронта выступа круга на расстояние равное длине дуги контакта 1,328 мм:

$$t_1 = \frac{l_k}{V_{кр}}, \quad (3)$$

Приняв $V_{кр} = 50$ м/с, получим $t_1 = 0,26 \cdot 10^{-4}$ с.

Если принять, что на круге будет 20 выступов и впадин, то шаг между выступами будет:

$$l_1 + l_2 = \frac{\pi \cdot D_{кр}}{20} = \frac{3,14 \cdot 60}{20} = 94 \text{ мм},$$

где l_1 – длина впадины; l_2 – длина выступа.

При $l_1/l_2 = 0,6$ [7] и $l_1 + l_2 = 94$ мм, получим $l_1 = 35$ мм, $l_2 = 59$ мм.

Соответственно время возрастания и убывания глубины шлифования t_1 будет в $l_2/l_k = 59/1,328 \approx 45$ раз меньше, чем время шлифования выступом.

Примем в первом приближении, что переходный процесс от нулевой глубины до максимальной $h_{\phi \max}$ очень мал, по сравнению с контактом выступа с заготовкой, и этим временем можно пренебречь.

Покажем зависимость $h(t)$ графически на рисунке 3. Зависимость $h(t)$ в интервале времени $t_1 < t < t_2$ и $t_3 < t < t_4$ нелинейная, однако, монотонная и может быть заменена линейной.

Таким образом, входной сигнал $h_{\text{вх}}$ будем моделировать прямоугольными периодически повторяющимися сигналами.

Математическая модель входного сигнала $h_{\text{вх}}$ в пакете VisSim с исходными данными и выводом входного сигнала на Plot приведена на рисунке 4.

Процесс шлифования согласно рисунку 2 преобразует глубину резания в радиальную составляющую P_y силы шлифования.

Согласно [5] P_y вычисляются эмпирической формулой вида:

$$P_y = 2,5 \cdot C_p \cdot V_3^x \cdot h^y \cdot S^z \cdot V_{кр}^\alpha \cdot B^\beta \quad (4)$$

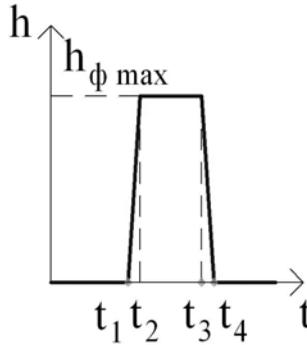


Рис. 3 – Изменение глубины резания с течением времени
 где V_s – скорость вращения заготовки, м/с; h – глубина, мм; S – подача, м/мин; $V_{кр}$ – скорость вращения круга, м/с; B – высота круга, мм.

При моделировании приняты следующие рекомендуемые значения показателей степени [5]: $x = 0,4$, $y = 0,2$, $z = 0,7$, $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,8$.

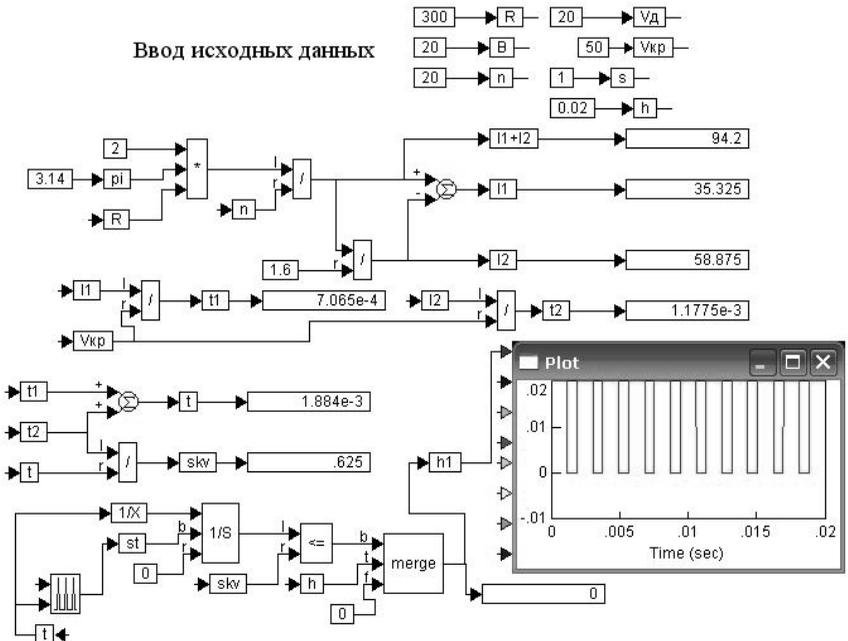


Рис. 4 – Моделирование входного сигнала

Линеаризуем зависимость (4), разложив ее в ряд Тейлора и отбросив члены высшего порядка малости:

$$P_y \approx (P_y)_0 + \left(\frac{\partial P_y}{\partial h} \right)_0 \cdot \Delta h,$$

где $(P_y)_0$ – значение P_y при условиях шлифования в равновесном установившемся режиме; $\left(\frac{\partial P_y}{\partial h}\right)_0$ – производная P_y по h в равновесном состоянии.

Подставим P_y из (4) и получим:

$$\Delta P_y = P_y - (P_y)_0 = 2,5 \cdot C_p \cdot V_3^x \cdot y \cdot h^{y-1} \cdot S^z \cdot V_{кр}^\alpha \cdot B^\beta \cdot \Delta h = C \cdot \Delta h, \quad (5)$$

где C – коэффициент пропорциональности между глубиной шлифования и радиальной составляющей силы резания, Н/мм.

$$C = 2,5 \cdot C_p \cdot V_3^x \cdot y \cdot h^{y-1} \cdot S^z \cdot V_{кр}^\alpha \cdot B^\beta.$$

По аналогии с жесткостью упругой системы имеющей такую же размерность, коэффициент C называют жесткостью процесса шлифования или жесткостью контакта круга с обрабатываемой поверхностью. На рисунке 5 приведены исходные данные и модель расчета коэффициента C в пакете VisSim.

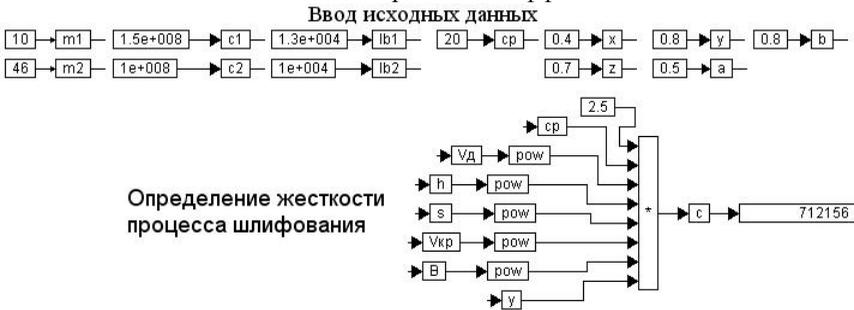


Рис. 5 – Исходные данные и коэффициент жесткости процесса шлифования

Упругая система круглошлифовального станка представляет собой параллельное соединение упругих систем шлифовального круга и заготовки. Уравнение, описывающее движение шлифовального круга в радиальном направлении, т.е. по координате x_2 , представляет собой равенство сил, действующих на круг в радиальном направлении.

Если положительное направление координаты x_2 считать от заготовки к кругу, то сила резания P_y будет с плюсом, а прочие силы инерции $m_2 \cdot \ddot{x}_2$, демпфирования $\lambda_2 \cdot \dot{x}_2$ и упругой связи круга со шпиндельной бабкой $c_2 \cdot x_2$ необходимо взять с минусом, т.е. в противоположном направлении оси x_2 :

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + \lambda_2 \cdot \dot{x}_2 + c_2 \cdot x_2 = P_y. \quad (5)$$

По аналогии получим дифференциальное уравнение движения заготовки в радиальном направлении, направив координаты такого движения x_1 от круга к заготовке:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + \lambda_1 \cdot \dot{x}_1 + c_1 \cdot x_1 = P_y. \quad (6)$$

В пакете VisSim выполняем решение уравнений (5) и (6), математическая модель которого приведена на рисунке 6.

Отклонение глубины шлифования x_3 за счет перемещения круга x_2 и заготовки x_1 под действием силы P_y : $x_3 = x_1 + x_2$.

Это отклонение x_3 вычитается из h_{ex} и фактическая глубина шлифования h_ϕ умножением на коэффициент C преобразуется в фактическую силу P_y .

На рисунке 7 приведены данные расчета сигналов x_1 (а), x_2 (б), x_3 (в) и h_ϕ (г), выведенные на графопостроитель Plot.

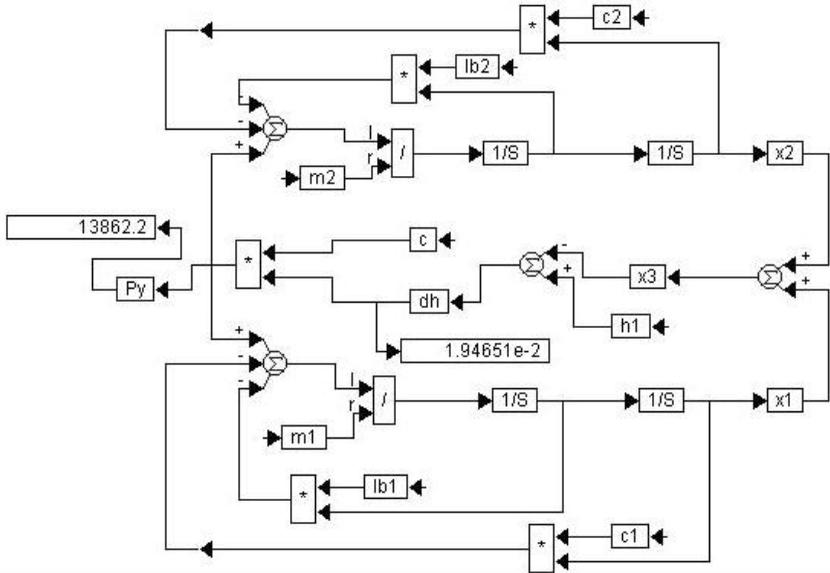


Рис. 6 – Математическое моделирование процесса прерывистого шлифования

Кроме этого на графике рисунок 8 в увеличенном масштабе по оси времени выведен выходной сигнал x_3 в установившемся режиме, из которого хорошо видна амплитуда установившихся параметрических колебаний. Из этого графика видно, что амплитуда гармонического изменения глубины шлифования равна $\pm 0,14$ мкм.

Выполнен анализ системы с помощью частотных характеристик. На рисунке 9 приведена амплитудная (АЧХ) и фазовая (ФЧХ) частотные характеристики. На рисунке видны два пика максимума АЧХ, которые соответствую-

ют круговым частотам $\omega_1 = 1466 \text{ рад/с}$ и $\omega_2 = 3857 \text{ рад/с}$, т.е. условиям резонанса.

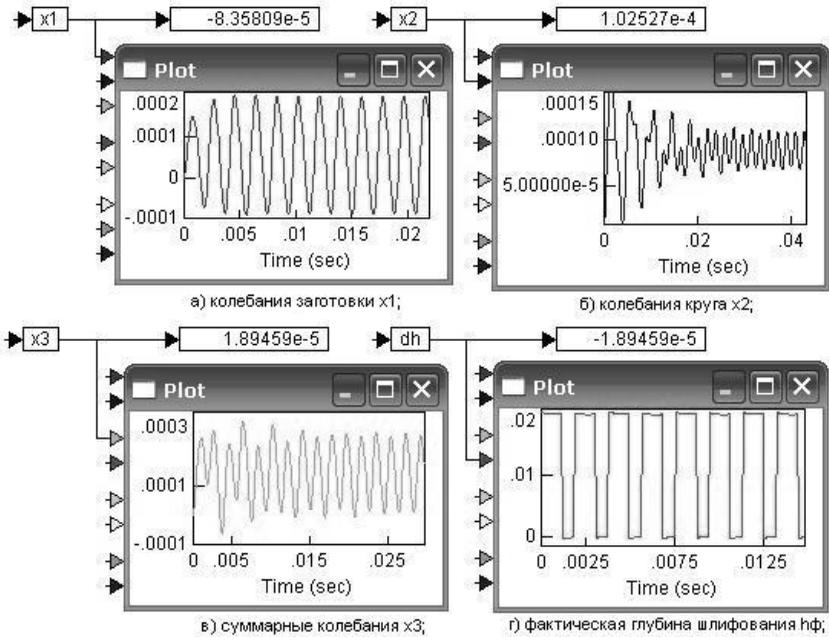


Рис. 7 – Результаты моделирования

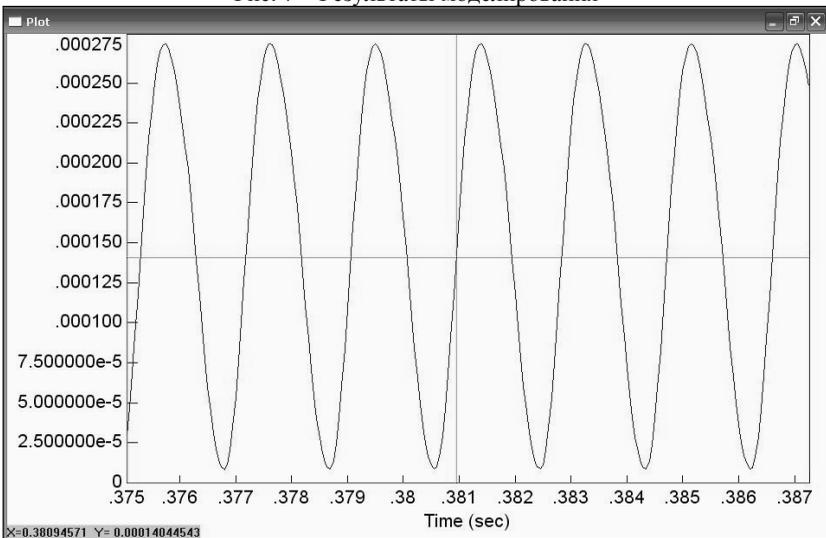


Рис. 8 – Выходной сигнал x_3 в установившемся режиме

Эти частоты также можно рассчитать по формулам:

$$\omega_1 = \sqrt{c_1 / m_1} \text{ И } \omega_2 = \sqrt{c_2 / m_2} ,$$

где ω_1, ω_2 – собственные частоты заготовки и круга соответственно, $\text{рад} / \text{с}$.

$$\omega_1 = \sqrt{1,5 \cdot 10^8 / 10} = 3873 \text{ рад} / \text{с} ,$$

$$\omega_2 = \sqrt{1 \cdot 10^8 / 46} = 1475 \text{ рад} / \text{с} .$$

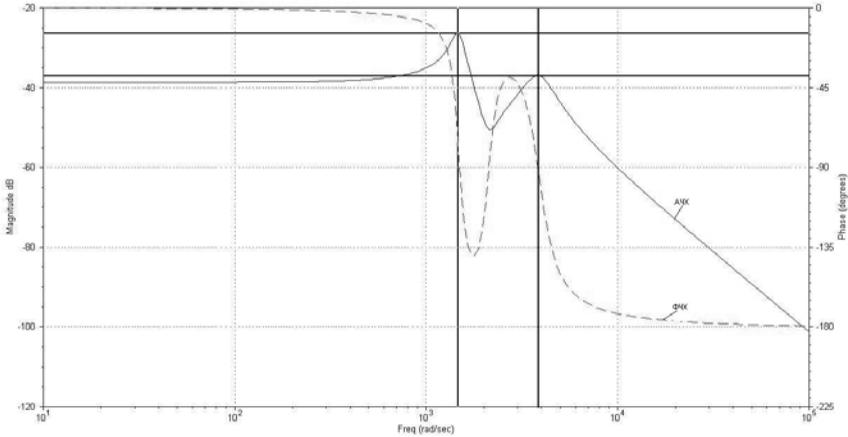


Рис. 9 – Амплитудные и фазовые характеристики технологической системы

В то же время частота воздействия выступами круга на обрабатываемую поверхность:

$$\omega = f \cdot 2\pi ,$$

где f – циклическая частота системы, с^{-1} .

$$f = 1/T ,$$

где T – период воздействия, с .

$$T = (l_1 + l_2) / V_{\text{кр}} .$$

Получаем:
$$\omega = \frac{1}{T} \cdot 2\pi = \frac{1}{0,00188} \cdot 2 \cdot 3,14 = 3340 \text{ рад} / \text{с} .$$

Полученная частота воздействия выступами круга на обрабатываемую поверхность близка к собственной частоте колебаний системы ω_1 . Поэтому желательно уйти от этой частоты в сторону возрастания. Этого можно достичь изменением размеров выступов и впадин периферии круга и изменением частоты его вращения.

На рисунке 10 представлена амплитудно–фазовая частотная характеристика разомкнутой системы, по которой можно судить об устойчивости замкнутой системы. Из графика видно, что данная АФЧХ не охватывает точку с координатами $(-1; i \cdot 0)$, т.е. замкнутая система устойчива.

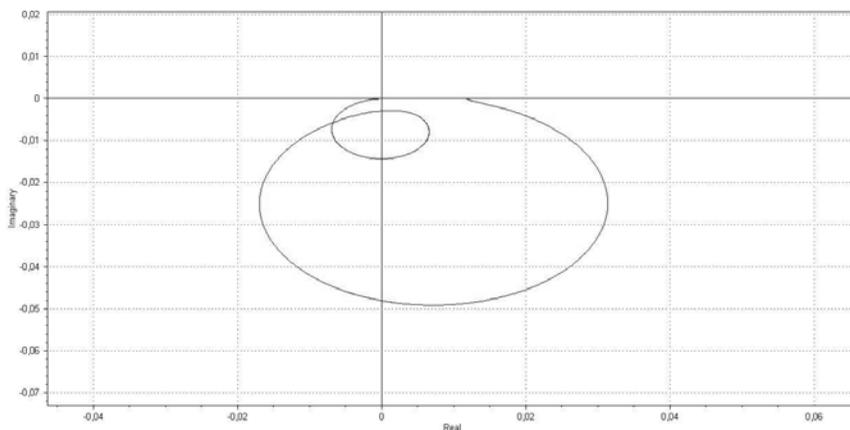


Рис. 10 – Амплитудно–фазовая частотная характеристика разомкнутой системы

Таким образом, разработанная модель, позволяет рассчитывать амплитуду параметрических колебаний, сопровождающих прерывистое шлифование, и использовать эти расчеты для выбора конструкции круга и режимов шлифования. Дальнейшие исследования позволят учесть влияние других параметров таких, как: температура в зоне резания, охлаждение с применением смазочно-охлаждающих жидкостей.

Список литературы: 1.Новиков Ф.В., Якимов А.А. К вопросу о сущности прерывистого шлифования // Высокие технологии в машиностроении. Сборник научных трудов НТУ «ХПИ». – Харьков. – Вып. 1 (4). – 2001. 2.Сизый Ю.А., Пономарев Л.С., Чайка Э.Г. Динамика прерывистого обдирочного шлифования торцом // Известия ВУЗов. – М.: Машиностроение. – 1988. – №12. – 131. – 135 с. 3.Сталинский Д.В., Сизый Ю.А. Оптимальное проектирование динамических систем обдирочно–шлифовального станка. – Харьков.: ХГПУ, 2000. – 113 с. 4.Ушаков А.Н. Структурно–параметрический синтез процесса круглого наружного врезного шлифования с адаптивным управлением. Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Харьков, 1998. – 176 с. 5.Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 6.Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Ленинградский госуд. университет, 1981. – 144 с. 7.Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с. 8.Якимов А.В., Паршаков Н.А. и др. Управление процессом шлифования. – Киев: Техніка, 1983. – 182 с. 9.Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.

Поступила в редколлегию: 13.04.2010.