

3. Орлов П. Соціально-відповідальний маркетинг в управлінні прибутком машинобудівного підприємства [Socially responsible marketing in the profit management of a machine-building enterprise] / П. Орлов, Д. Новіков. – *European journal of economics and management*. Volume 5, Issue 5. – Praha, 2019. – P. 39–47.

*Новиков Ф.В.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

## **ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ**

При механической обработке в технологической системе, как правило, возникают колебательные процессы, которые приводят к снижению качества и точности обрабатываемых поверхностей. Поэтому постоянно возникают проблемы поиска путей снижения интенсивности колебаний за счет применения более прогрессивных режущих инструментов, обладающих высокой режущей способностью и износостойкостью, новых технологических сред, повышения жесткости элементов технологической системы, выбора оптимальных режимов резания и т.д.

Основными причинами, вызывающими колебания сил резания и приводящими к возникновению вынужденных колебаний в технологической системе, являются: неравномерность снимаемого припуска по диаметру, неуравновешенность вращающихся масс станка и т. д. При этих условиях снижается точность обработки. Для управления точностью обработки необходимо в общем виде установить функциональную связь динамических параметров процесса резания с амплитудой колебаний режущей кромки инструмента [1].

Для определения статических и динамических характеристик упругой системы станка необходимо представить обрабатываемую деталь в виде одномассовой динамической модели (рис. 1,а) с изменяющейся по синусоидальному закону радиальной составляющей силы резания  $P_y$  (рис. 1,б).

Гармонические колебания одномассовой динамической модели можно описать дифференциальным уравнением вида:

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot y = P_{y_0} + \Delta P_{y_0} \cdot \sin \omega \tau, \quad (1)$$

где  $m$  и  $c$  – приведенные масса и жесткость системы;  $\ddot{y}$  – ускорение движения массы  $m$ ;  $P_{y_0}$  – статическая составляющая силы  $P_y$ ;  $\Delta P_{y_0}$  – амплитуда колебаний силы  $P_y$ ;  $\omega$  – частота колебаний.

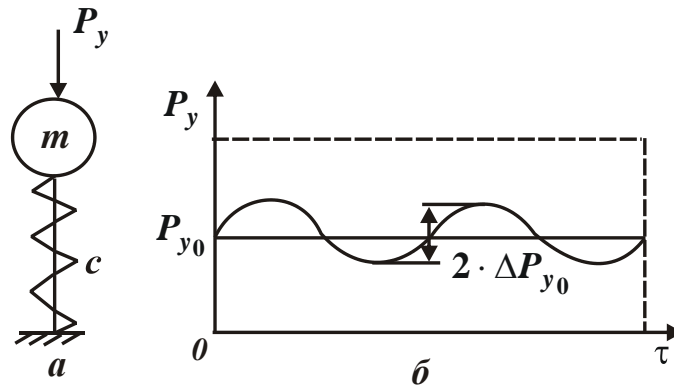


Рисунок 1 – Схема одномассовой динамической модели и ее гармонические колебания

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид:

$$y = \frac{P_{y_0}}{c} + \frac{\Delta P_{y_0}}{(k^2 - \omega^2) \cdot m} \cdot \sin \omega \psi, \quad (2)$$

где  $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$  – собственная частота колебаний системы.

Установлено, что при условии  $k > \omega$  роль динамики несущественна; при условии  $k \rightarrow \omega$  амплитуда колебаний неограниченно увеличивается за счет второго слагаемого зависимости (2), которое можно представить в виде:

$$\frac{y_{cm}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)} \cdot \sin \omega \psi, \text{ где } y_{cm} = \Delta P_{y_0} / c. \text{ Значения величины } \frac{y_{cm}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)}$$

рис. 2.

В работе [2] показано, что резонансные явления проявляются не сразу, а через определенный промежуток времени. Это вытекает из обобщенного интеграла при условии  $\omega = k$  (для второго слагаемого зависимости (2):

$$y = \frac{\Delta P_{y_0}}{m \cdot k} \cdot \int_0^\tau \sin kt_1 \cdot \sin k(\tau - t_1) \cdot dt_1 = y_{cm} (\sin k\tau - k\tau \cdot \cos k\tau), \quad (3)$$

где  $t_1$  – новая переменная ( $0 < t_1 < \tau$ ).

Как видно, амплитуда колебаний  $y$  с течением времени увеличивается по линейному закону и через определенное время обращается в бесконечность. Поэтому при непродолжительной обработке в резонансном режиме можно избежать возникновения погрешностей.

При условии  $\omega > k$  в резонансной области амплитуда колебаний уменьшается и при условии  $\omega > \sqrt{2} \cdot k$  второе слагаемое в зависимости (2) становится меньше единицы. В этом случае упругая система не успевает среагировать на высокочастотные изменения силы  $\Delta P_{y_0}$  и вызвать перемещение системы, равное статическому перемещению  $y_{cm}$ .

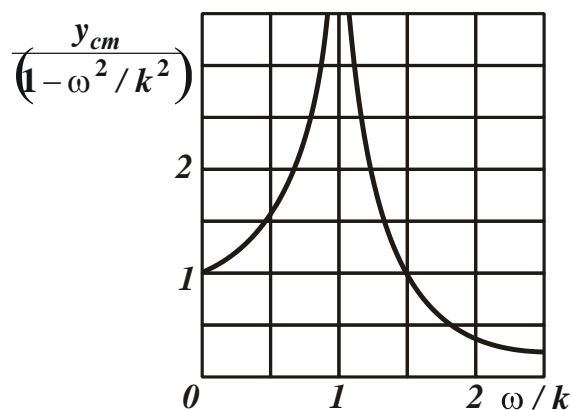


Рисунок 2 – Зависимость величины  $\frac{y_{cm}}{(1 - \omega^2 / k^2)}$  от отношения  $\omega / k$

При прерывистом шлифовании на массу  $m$  действует импульс силы  $P_{y_0}$  в течение короткого промежутка времени  $\tau$ . Амплитуда колебаний определяется из зависимости (3) с учетом силы  $P_y$ :

$$y = 2y_{cm} \cdot \sin \frac{k\tau_1}{2} \cdot \sin k \left( \tau - \frac{\tau}{2} \right), \quad (4)$$

где  $y_{cm} = \Delta P_{y_0} / c$ .

Максимальное значение амплитуды колебаний  $y_{max}$  равно:

$$y_{max} = 2y_{cm} \cdot \sin \frac{k\tau_1}{2}. \quad (5)$$

Отношение  $y_{max} / y_{cm}$  называется коэффициентом динамичности  $\mu$  и принимает значения [3], приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициента динамичности  $\mu$

$\tau_1 / T$	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,15	0,25	0,5
$\mu$	0	0,062	0,126	0,188	0,313	0,618	0,708	1,413	2,0

При малых значениях  $\tau_1 / T$  (меньше 0,15) коэффициент динамичности меньше единицы. Динамические перемещения в этой области меньше статических перемещений. С увеличением  $\tau_1 / T$  коэффициент динамичности увеличивается и при условии  $\tau_1 / T = 0,5$  достигает значения  $\mu = 2,0$ .

Динамика резания, как видно из приведенных данных, связана с временем контакта режущего инструмента с деталью.

Согласно зависимости (4) повысить точность можно за счет увеличения собственной частоты колебаний  $k$ , уменьшая значение  $\sin k\tau_1 / 2$ . С другой стороны, уменьшить  $\tau_1$  можно за счет увеличения скорости движения детали или инструмента (в зависимости от вида обработки). Эффект снижения амплитуды колебаний (ниже статического значения) при условии  $\tau_1 / T < 0,15$  аналогичен эффекту снижения амплитуды колебаний в резонансной области  $\omega > \sqrt{2} \cdot k$ .

Заслуживает внимания динамическая модель процесса прерывистого шлифования, которую можно представить в виде одномассовой системы  $m$ , связанной с неподвижной опорой посредством пружины жесткостью  $c$  [4].

На массу  $m$  в течение времени  $\tau_1$  действует импульсивная нагрузка  $P(\tau)$ , равная радиальной составляющей силы резания (рис. 3), где  $\tau_1$  – период контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемой деталью, с;  $\tau_2$  – период прерывания процесса шлифования при прохождении впадины круга над зоной контакта, с.

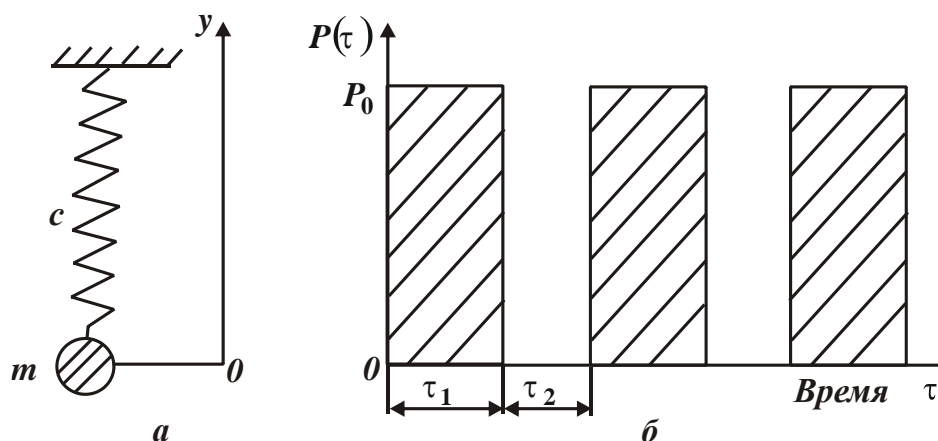


Рисунок 3 – Одномассовая колебательная система (а) и периодическое силовое воздействие шпиндельного узла (б)

Колебательное движение массы  $m$  на участке  $(0, \tau_1)$  описывается дифференциальным уравнением:

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot y = P_0, \quad (6)$$

на участке  $(\tau_1, \tau_2)$  – дифференциальным уравнением:

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot y = 0, \quad (7)$$

где  $y$  – упругое перемещение массы  $m$  под действием импульсивной нагрузки  $P(\tau)$  в радиальном к кругу направлении, м.

Решение дифференциального уравнения (6) имеет вид:

$$y_1 = A \cdot \sin k\tau + B \cdot \cos k\tau + y_{cm}, \quad (8)$$

где  $k = \sqrt{c/m}$  – собственная частота системы, Гц;  $y_{cm} = P_0/c$  – статическое перемещение массы  $m$  под действием силы  $P_0$ , м.

Решая дифференциальное уравнение (7), получено:

$$y_2 = C \cdot \sin k\tau + D \cdot \cos k\tau. \quad (9)$$

Неизвестные постоянные интегрирования  $A, B, C, D$ , входящие в зависимости (8) и (9), определяются из четырех начальных условий:

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(\tau_2); & y_1(\tau_1) = y_2(\tau_1); \\ \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(\tau_2); & \dot{y}_1(\tau_1) = \dot{y}_2(\tau_1). \end{cases} \quad (10)$$

Подчиняя решения (8) и (9) начальным условиям (10), получена система уравнений для определения постоянных  $A, B, C, D$ :

$$\begin{cases} y_{cm} + B = C \cdot \sin k\tau_2 + D \cdot \cos k\tau_2; \\ A \cdot k = C \cdot k \cdot \cos k\tau_2 - D \cdot k \cdot \sin k\tau_2; \\ y_{cm} + A \cdot \sin k\tau_1 + B \cdot \cos k\tau_1 = C \cdot \sin k\tau_1 + D \cdot \cos k\tau_1; \\ A \cdot k \cdot \cos k\tau_1 - B \cdot k \cdot \sin k\tau_1 = C \cdot k \cdot \cos k\tau_1 - D \cdot k \cdot \sin k\tau_1. \end{cases} \quad (11)$$

Разрешая первое и второе уравнения системы (11) относительно постоянных  $A$ ,  $B$ , и подставляя полученные выражения для определения  $A$  и  $B$  в третье и четвертое уравнения системы (11), установлена система уравнений для определения постоянных  $C$  и  $D$ :

$$C \cdot [\sin k(\tau_1 + \tau_2) - \sin k\tau_1] + D \cdot [\cos k(\tau_1 + \tau_2) - \cos k\tau_1] = y_{cm} \cdot \cos k\tau_1 - y_{cm}; \quad (12)$$

$$C \cdot [\cos k(\tau_1 + \tau_2) - \cos k\tau_1] - D \cdot [\sin k(\tau_1 + \tau_2) - \sin k\tau_1] = -y_{cm} \cdot \sin k\tau_1. \quad (13)$$

После преобразований получено:

$$C = y_{cm} \cdot \frac{\sin k \frac{\tau_1}{2} \cdot \sin k \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{2}}{\sin k \frac{\tau_2}{2}}; \quad (14)$$

$$D = y_{cm} \cdot \frac{\sin k \frac{\tau_1}{2}}{\cos k \frac{(2\tau_1 + \tau_2)}{2} \cdot \sin k \frac{\tau_2}{2}} \left[ \cos k \frac{\tau_1}{2} - \sin k \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{2} \cdot \sin k \frac{(2\tau_1 + \tau_2)}{2} \right]. \quad (15)$$

Постоянные интегрирования  $A$  и  $B$  определяются из уравнений:

$$A = C \cdot \cos k\tau_2 + D \cdot \sin k\tau_2; \quad (16)$$

$$B = C \cdot \sin k\tau_2 + D \cdot \cos k\tau_2 - y_{cm}. \quad (17)$$

Таким образом, получено полное решение дифференциальных уравнений (6) и (7).

Из зависимостей (14) и (15) следует, что при условиях

$$\sin k \frac{\tau_2}{2} = 0 \quad \text{и} \quad \cos k \frac{(2\tau_1 + \tau_2)}{2} = 0$$

постоянные  $C$  и  $D$ , а, следовательно, постоянные  $A$  и  $B$  стремятся к бесконечности, т. е. при этих условиях в системе наступает ударный резонанс (параметры  $y_1 \rightarrow \infty$ ,  $y_2 \rightarrow \infty$ ). Исходя из этого, следует определить условия ударного резонанса:

1. Условие  $\sin k \frac{\tau_2}{2} = 0$  выполняется при значениях  $k \frac{\tau_2}{2} = \pi \cdot n$ , где  $n = 1, 2, \dots, \infty$ , откуда:

$$\tau_2 = \frac{2\pi \cdot n}{k}. \quad (18)$$

2. Условие  $\cos k \frac{(2\tau_1 + \tau_2)}{2} = 0$  соответственно выполняется при значениях  $k \frac{(2\tau_1 + \tau_2)}{2} = \frac{\pi}{2} + \pi \cdot n$ , откуда

$$2\tau_1 + \tau_2 = \frac{\pi \cdot (1 + 2n)}{k}. \quad (19)$$

Из полученных зависимостей (18) и (19) следует, что существует бесконечное множество резонансных состояний системы, которые определяются параметрами  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , т.е. зависят от продолжительности контакта режущего выступа круга и времени прерывания процесса шлифования за период прохождения впадины прерывистого круга над зоной контакта.

Это указывает на то, что процесс прерывистого шлифования имеет множество неустойчивых областей и требует правильного выбора параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , определяемых из условия обеспечения оптимальной амплитуды колебаний. Регулировать устойчивостью процесса прерывистого шлифования можно также за счет параметра  $k = \sqrt{c/m}$  путем изменения конструкции шпиндельного узла [5, 6].

Следует отметить, что приведенное решение получено без учета диссипативных сил. Поэтому значения параметров  $A, B, C, D$ , а также параметров  $y_1$  и  $y_2$  одинаковы для всех значений  $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ . В действительности, за счет диссипативных сил значения указанных параметров с увеличением  $n$  будут уменьшаться. Следовательно, с увеличением  $n$  амплитуда колебаний в резонансном режиме будет небольшой, и процесс шлифования будет протекать в достаточно устойчивом режиме. Опасными с точки зрения интенсивных колебаний будут режимы, характеризующиеся небольшими значениями  $n$ . Исходя из этого, наиболее эффективным средством снижения колебаний в неустойчивых зонах при прерывистом шлифовании следует рассматривать увеличение диссипативных сил с помощью различных гасителей колебаний, например, предложенных в работах профессора Якимова А. В. [7, 8].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы технологии машиностроения: учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетнев. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.
2. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – 4-е изд. – Ленинград: Политехника, 1990. – 272 с.
3. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учебное пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.
5. Алмазная обработка: учебное пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Киев: ІЗМН, 1996. – 168 с.

6. Високопродуктивне шліфування: навчальний посібник / О.В. Якимов, Ф.В. Новіков, Г.В. Новіков, О.О. Якимов. – Київ : ІСДО, 1995. – 180 с.

7. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий: монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, А.А. Андилахай, Д.Ф. Новиков, В.И. Полянский. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.

8. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.

9. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – К.; О.: Вища школа, 1986. – 175 с.

*Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

*Полянский В.И.*

ООО «Империя металлов», Харьков, Украина

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ**

Снижение трудоемкости и себестоимости изготовления деталей и машин, а также повышение их качества является важнейшей задачей [1]. Многочисленными исследованиями установлено, что определяющую роль в обеспечении эксплуатационных характеристик играет состояние поверхностного слоя, который окончательно формируется на финишных операциях. Известно [1, 2], что эффективность и производительность абразивной обработки зависят от технологической среды, которая включает полировальник, абразивную и неабразивную составляющую технологического состава и материал заготовки. Традиционные подходы [1, 2], обладая развитым аппаратом, не позволяют в явном виде учитывать особенности динамики процесса полирования по отношению к шлифованию. Все это снижает эффективность принятия технологических решений и делает их мало пригодными в практике.

В настоящее время в рекомендациях по применению абразивных материалов для полирования недостаточно информации по времени обработки для достижения наибольшего сглаживания поверхностного слоя. Поэтому задачей исследования является анализ литературных источников, имеющих рекомендации по снижению времени полирования для достижения заданного сглаживания поверхностного слоя, и разработка модели инструмента для абразивного полирования и практических рекомендаций по повышению эффективности абразивного полирования.