

**КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССА  
ХОНИНГОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ****ÈINEMATICS CHARACTERISTICS OF THE PROCESS  
OF HONING BLIND HOLES**

*Проанализирован процес хонингования глухих отверстий инструментом, компенсирующим размерный износ режущих элементов с учетом неравномерного износа по длине обрабатываемого отверстия. На основе анализа определены возможности модернизации определенного инструмента с целью повышения эффективности процесса хонингования .*

*Ключевые слова: кинематика, процесс хонингования, гидропривод, обобщенные функции, реверс.*

**Введение**

В современных хонинговальных станках скорость при обработке отверстий обеспечивается двумя независимыми приводами: электромеханическим приводом вращательного и гидравлическим приводом возвратно-поступательного перемещений инструмента относительно детали.

При этом в цикле обработки присутствуют два режима перемещения: установившийся и переходной.

В установившемся режиме чередования согласованного вращательного перемещения с поступательным и вращательного с возвратным обуславливают движение режущих зёрен по винтовым траекториям, соответственно, с положительным и отрицательным углами подъёма траекторий. Это формирует на обрабатываемой поверхности регулярный маслосудерживающий рельеф в виде скрещивающихся рисок.

В переходном режиме, включающем время торможения, реверса и ускорения шпиндельной бабки с инструментом (далее инструмента), оптимальное сочетание вращательного и осевого перемещений нарушается и, соответственно, имеет место формирование рельефа, отличного от оптимального. Таким образом ранее сформированный регулярный рельеф искажается, поскольку имеет место съём припуска в основном за счет вращательного перемещения. Очевидно, что за время перебегов, включающих время переходного режима, меняются также характер съёма припуска, условия силового взаимодействия режущих элементов с обрабатываемой поверхностью и др. Все это отражается на законе износа режущих элементов по их длине и, соответственно, на формировании геометрических погрешностей обрабатываемых отверстий в продольном сечении и т.д.

В связи с этим, необходимо изначально более детальное рассмотрение закона изменения возвратно-поступательного перемещения инструмента с позиций влияния на динамику процессов формирования регулярного рельефа, съёма припуска, износа режу-

щих элементов, формирования геометрических погрешностей обрабатываемых отверстий в продольном сечении и т.д.

В технической литературе [1] кинематика процесса хонингования рассматривается как совокупность трех перемещений: возвратно-поступательного, вращательного и радиального перемещений режущих элементов инструмента относительно хонингуемого отверстия. При этом скорость возвратно-поступательного перемещения рассматривается только в периоды установившегося режима движения и принимается постоянной величиной. При таком рассмотрении, в самом общем виде, схематично, упрощенный график скорости возвратно-поступательного перемещения инструмента относительно детали, будет иметь вид, изображенный на рисунке 1, а. Более точный график закона изменения скорости возвратно-поступательного перемещения инструмента относительно детали, учитывающий время реверса, приведен в [2]. Вид этого графика представляет собой ломаную линию и в данной работе изображен на рисунке 1б. Очевидно (если исключить из рассмотрения стохастическую составляющую инерционных процессов в моменты реверса [3]), что прямолинейный участок между точками М и N (участок времени реверса) на рисунке 1, б может быть скорректирован и представлен в виде нелинейного участка (рисунок 1, в). В таком виде, график на рисунке 1, в по отношению к графикам на рисунке 1, а и 1, б является более точным.

На основе рассуждений приведенных выше, получено формальное графическое изображение, которое является достаточно близким к реальному закону изменения скорости возвратно-поступательного перемещения шпиндельной бабки, реализуемого гидроприводом. Однако для проведения теоретических исследований одного графического изображения недостаточно. Необходима тождественная математическая формула, которая описывала бы указанное графическое изображение.

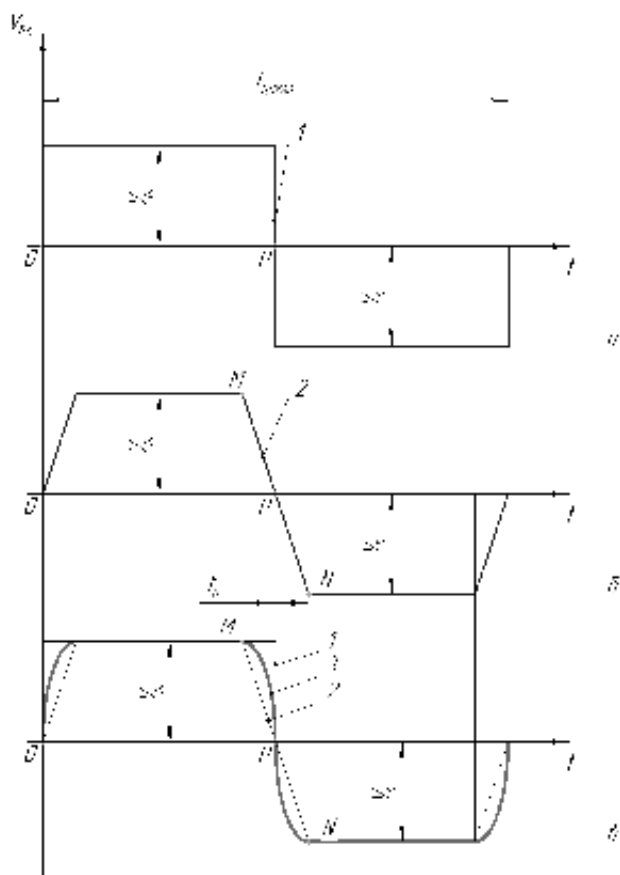


Рисунок 1 — График скорости возвратно поступательного перемещения: а) в общем виде; б) с учетом времени реверса; в) с учетом времени реверса и без учета стохастических процессов

Закон изменения скорости возвратно-поступательного перемещения в самом общем случае зависит от множества параметров: сил резания, сил трения, параметров гидросистемы, характера инерционных процессов, состояния технологической системы и т.д. В подавляющем большинстве случаев влияние каждого из этих параметров и, соответственно, их суммарное влияние на закон изменения кривизны по длине нелинейного участка в каждом конкретном случае будет иной.

Кроме того, законы изменения некоторых из перечисленных выше параметров носят либо случайный характер либо неизвестны.

Поэтому нахождение математической зависимости, отражающей закон изменения кривизны по длине, как для единичного нелинейного участка и тем более для множества таких участков с учетом каждого из перечисленных выше параметров является задачей труднорешаемой.

**Целью работы** является поиск аналитического уравнения, которое было бы инвариантным по отношению к законам изменения перечисленных выше параметров и достаточно точно описывало скорость

возвратно-поступательного перемещения исполнительных органов станков с гидравлическим приводом.

Если исходить из вида графиков на рисунке 1, то для достижения поставленной цели, целесообразно воспользоваться одним из приемов методологии теории обобщенных функций [4].

Перечень известных классов элементарных функций (простых, либо сложных) записывают в виде предельного перехода с устремлением к пределу соответствующих параметров этих функций. Сама запись каждого класса функции в таком виде является аналитическим обобщенным уравнением. Если построить графики этих обобщенных уравнений, то получим семейство "нестандартных" графиков, представляющих собой либо графики в виде ломаных линий, либо графики в виде линий с разрывами и т.д. Из этого семейства всегда можно выбрать какой-то один график, который по форме соответствует искомому.

Для случая возвратно-поступательного перемещения наиболее подходящим математическим выражением является предел элементарной синусоидальной функции в степени  $\frac{1}{2n-1}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) при  $n \rightarrow k$

$$\lim_{n \rightarrow k} y = \lim_{n \rightarrow k} A \cdot (\sin \omega t)^{\frac{1}{2n-1}}, \quad (1)$$

Очевидно, что при возрастании  $n$  до бесконечности ( $n = k = +\infty$ ), показатель степени в выражении (1) стремится к нулю, а любое значение функции  $\sin \omega t$  в нулевой степени равно единице, то есть график выражения (1) примет вид графика, изображенного на рисунке 2, а.

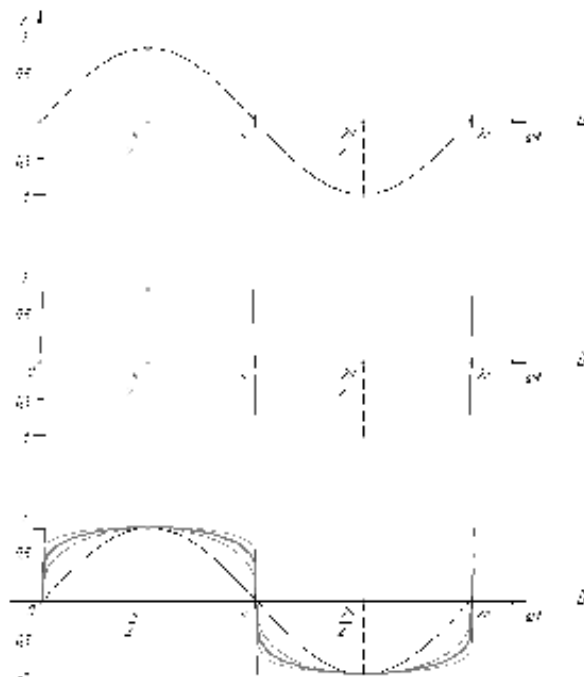


Рисунок 2 — График функции (1): а) при  $n = 1$ ; б)  $n \rightarrow \infty$ ; в)  $n = 1, 2, 3, 5$

Если принять

$$A = V_{\epsilon}^{мaбл.} = V_{n.}^{мaбл.} = V_{n.}^{мaбл.} = 1, T\omega = \omega t_0 = 2\pi, \omega = 1; T\omega = t_0 = 2\pi, \quad (2)$$

то график, изображенный на рисунке 1, а, совпадет с графиком, изображенным на рисунке 2, б как по форме, так и по амплитуде и периоду. В этом случае все дальнейшие математические преобразования выражения (1) будут одинаково справедливы для графиков, приведенных на обоих рисунках.

Очевидно так же, что графиком функции (1) при  $n = k = 1$  является синусоида (рисунок 2, а).

Далее, непосредственной подстановкой возрастающих значений  $n$  в выражение (1), можно убедиться, что синусоидальный график (рисунок 2, а) будет видоизменяться, соответственно, графики рисунка 2, в  $2(n=2)$ ,  $3(n=3)$  и  $4(n=5)$ , приближаются к виду графика 3 на рисунке 1, в.

Естественно также утверждать, что при возрастании  $n$ , величина площади, ограниченной осью абсцисс и положительной ветвью видоизменяющейся синусоиды, будет возрастать, приближаясь к величине площади под положительной ветвью графика 3 на рисунке 1, в, и при каком-то значении  $n$  величины этих площадей максимально приблизятся и практически станут равными. В этом случае эти графики станут взаимозаменяемыми. Это утверждение правомочно в том случае, если множество графиков 3 на рисунке 1, в конкретизировать, например, условием равенства площади под положительной ветвью графика 3 на рисунке 1, в половине суммы площадей соответственно под положительными ветвями графиков на рисунке 2, а и 2, б, тогда

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \omega t)^{\frac{1}{2n-1}} d\omega t = \frac{[\pi] + [\pi + (\pi - t_r \omega)]/2}{4} = \frac{4\pi - t_r \omega}{8}. \quad (3)$$

Произведя замену переменной и пределов интегрирования

$$(\sin(\omega t) = z, dz = \cos(\omega t) \cdot d(\omega t), z_n = 0; z_\epsilon = 1)$$

с учетом равенства

$$d(\omega t) = \frac{dz}{\cos(\omega t)} = \frac{dz}{\sqrt{1-\sin^2(\omega t)}} = \frac{dz}{\sqrt{1-z^2}},$$

перепишем (3) следующим образом

$$\int_0^1 z^{2n-1} \frac{dz}{\sqrt{1-z^2}} = \frac{4\pi - t_r \omega}{8}. \quad (4)$$

Заменим выражение  $\frac{1}{\sqrt{1-z^2}}$  в (4) его разложением в ряд Маклорена

$$\int_0^1 z^{2n-1} \left( 1 + \frac{1}{2} z^2 + \frac{1 \cdot 3}{1 \cdot 2} z^4 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3} z^6 + \dots \right) dz =$$

$$\int_0^1 z^{2n-1} \left( 1 + \frac{1}{2^1 \cdot 1!} z^2 + \frac{1 \cdot 3}{2^2 \cdot 2!} z^4 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 \cdot 3!} z^6 + \dots \right) dz$$

$$= \int_0^1 z^{2n-1} \left( 1 + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot z^{2i} \right) dz =$$

$$\int_0^1 z^{2n-1} dz + \int_0^1 \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot z^{2i+\frac{1}{2n-1}} dz =$$

$$\frac{2n-1}{2n} + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot \frac{2n-1}{4in-2i+2n} = \frac{4\pi - t_r \cdot \omega}{8},$$

или

$$\frac{2n-1}{n} + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot \frac{2n-1}{i(2n-1)+n} = \frac{4\pi - t_r \cdot \omega}{4}, \quad (5)$$

где:  $k$  — принятое конечное число слагаемых рассматриваемого ряда.

Из записи  $(2i-1)!!$  следует, что из каждого слагаемого произведений ряда натуральных целых чисел исключаются четные числа, т.е. операция умножения реализуется только для ряда целых нечетных чисел. Для удобства вычислений запишем уравнение, эквивалентное уравнению (5), в котором отсутствует двойной факториал:

$$\frac{2n-1}{n} + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)! \cdot i}{2^{2i-1} \cdot (i!)^2} \cdot \frac{2n-1}{i(2n-1)+n} = \quad (6)$$

Корень выражения (6) является искомым значением  $n$ , точность определения которого функционально зависит от значения  $k$  и  $t_r \cdot \omega \cdot 4\pi - t_r \cdot \omega$

Чем больше значение  $k$ , тем точнее искомое значение  $n$ .

Значение  $\omega$ , применительно к процессу хонингования, численно равно числу двойных ходов инструмента в единицу времени и может быть определено из равенства

$$\omega = \frac{V_{\epsilon.n.}^{cp.}}{L} = \frac{V_{\epsilon.n.}^{cp.}}{L_\delta - L_\epsilon + l_1 + l_2}, \quad (7)$$

где  $V_{\epsilon.n.}^{cp.}$  и  $L$  — соответственно средняя скорость и амплитуда возвратно-поступательного перемещения инструмента относительно детали,  $L_\delta$  и  $L_\epsilon$  — соответственно длина хонингуемого отверстия и режущих элементов (брусков),  $l_1$  и  $l_2$  — соответственно длина верхнего и нижнего перебега инструмента.

Для определения приближенного значения  $V_{\epsilon.n.}^{cp.}$  воспользуемся условием аналогичным условию, принятому при написании выражения (3). Примем  $V_{\epsilon.n.}^{cp.}$

равным произведению  $V_{\epsilon.n.}^{мaбл.}$  на коэффициент, значение которого определим, как отношение усредненного значения площадей под графиками 1, 2 (рису-

нок 1, в.) к значению площади под графиком 1, или, иначе, как отношение площади под графиком 3 к площади под графиком 1 (рисунок 1, в.).

$$V_{\text{в.н.}}^{\text{ср.}} = V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot t_r}{4\pi}\right). \quad (8)$$

Подставляя значение  $V_{\text{в.н.}}^{\text{ср.}}$  из (8) в (7) и решая относительно  $\omega$ , получим

$$\omega = \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}}}{4\pi \cdot L + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r} \quad (9)$$

или

$$\omega = \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}}}{4\pi \cdot (L_\delta - L_\sigma + l_1 + l_2) + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r}$$

Подставляя значение  $\omega$  из (9) в (1) с учетом фиксированного значения  $n$ , определенного, как корень уравнения (6), получим

$$V_{\text{в.н.}} = V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot \left(\sin \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t}{4\pi \cdot L + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r}\right)^{\frac{1}{2n-1}} \quad (10)$$

или

$$V_{\text{в.н.}} = V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot \left(\sin \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t}{4\pi \cdot (L_\delta - L_\sigma + l_1 + l_2) + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r}\right)^{\frac{1}{2n-1}} \quad (11)$$

Полная скорость при хонинговании

$$V = \sqrt{V_{\text{в.н.}}^2 + V_{\text{вр.}}^2}, \quad (12)$$

где:  $V_{\text{вр.}}$  — окружная скорость инструмента относительно детали. В данной работе математическое выражение для окружной скорости не рассматривается.

### Выводы

1. Получено математическое выражение закона изменения скорости возвратно-поступательного перемещения исполнительных органов станков с гидравлическим приводом.

2. Это математическое выражение необходимо для исследования условий протекания процессов обработки (например, динамики процессов формирования регулярного рельефа, качества поверхности, износа инструмента, формирования погрешности обработки и т.д.).

### Литература

1. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х кн., кн. 2/Под ред. Г. Шпура, Т. Штеферле; Пер. с нем. под ред. Ю.М. Соломенцева. — М.: Машиностроение, 1985. — 688 с.

2. Сафронов В. Г. Исследование процесса алмазного хонингования отверстий в стальных закаленных деталях. Автореферат диссертации. М., МВТУ им. Баумана, 1965.

3. Стохастичні процеси у гіддроприводах верстатів: [монографія] / В.Б. Струтинский, В.М. Тіхенко. — Одеса: Астропринт, 2009. — 456 с.

4. Зельмандович, Я.Б., Яглом, И.М. Высшая математика для физиков и техников. М.: Наука, 1982. 512с.

5. Сверлильные и хонинговальные станки / С.И. Куликов, В.П. Волоценко, Ф.Ф. Ризванов, А.Л. Воронов. — М., Машиностроение, 1977.

### References

1. Spravochnik po tekhnologii rezaniya materialov/ pod red. G.Shpura, T.Shtefelerle.— M.: Mashinostroyeniye, 1985. — 688 s.

2. Safronov V. G. Issledovaniye protsessaalmaznogo khoningovaniya otverstiy v stal'nykh zakalennykh detalyakh. Avtoreferat dissertatsii. — M., MVTU im. Baumana , 1965 .

3. Stokhasticheskiye protsessy v giddroprivodakh stankov : [ monografiya ] / V.B. Strutinskiy , V. Tikhenko. — Odessa : Astroprint, 2009 . — 456 s.

4. Zel'mandovich YA.B. , Yaglom I.M. Vysshaya matematika dlya fizikov i tekhnikov . — M.: Nauka , 1982. — 512s .

5. Sverlil'nyie i khoningoval'nyie stanki /Kulikov S.I., Volotsenko V.P. , Rizvanof F.F., Voronov A.L. —M.: Mashinostroyeniye, 1977 .

УДК 621.923.5

### КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРОЦЕСУ ХОНІНГУВАННЯ ОТВОРІВ

**И.М. Буюкли, В.М. Колесник**

Виконано аналіз процесу хонінгування глухих отворів інструментом, який реалізує компенсацію розмірного зносу ріжучих елементів з урахуванням нерівномірного зносу по довжині отвору, що обробляється. На основі аналізу визначені можливості модернізації відомого інструменту з метою підвищення ефективності процесу хонінгування.

*Ключові слова: кінематика, хонінгування, гідропривод, узагальнені функції, реверс.*

UDC 621.923.5

### KINEMATICS CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF HONING BLIND HOLES

**I.M. Buyukli, V.M. Kolesnik**

The analysis of the process of honing blind holes instrument to provide compensation of dimensional wear of cutting elements, taking into account the uneven wear on their length. Based on the analysis the possibility of upgrading the known tool to improve the efficiency of the process of honing.

*Keywords: kinematics, honing, hydraulic, generalized functions in reverse.*