

## Алгоритм минимизации холостых перемещений инструментов при фрезеровании сложных поверхностей на трёхкоординатных станках с ЧПУ

д.т.н. проф. Пономарёв Б.Б., Нгуен Ван Нам

Иркутский государственный технический университет

8(395)240-50-20, pusw@istu.edu, 8(924)606-86-68, namng85@gmail.com

**Аннотация.** В статье представлен один из методов оптимизации вспомогательного времени перемещений инструментов при фрезеровании деталей сложной формы на многоцелевых станках, в частности, описан алгоритм минимизации холостых перемещений сфероцилиндрических и конических фрез. Выполнены расчеты на тестовой детали со сложными поверхностями.

**Ключевые слова:** холостое перемещение, вспомогательные перемещение, сфероцилиндрическая фреза, коническая фреза, сложная поверхность.

Представленная в рамках данной статьи работа проводилась при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

В статье представлен фрагмент исследования, направленный на повышение эффективности использования трёхкоординатных станков с ЧПУ при фрезеровании деталей, имеющих сложные поверхности. При формообразовании таких поверхностей используют концевые, сфероцилиндрические и конические фрезы. При многоинструментальной обработке время, затрачиваемое на смену инструментов и переходы от одной зоны обработки к другой, соизмеримо со временем резания. Задача минимизации холостых перемещений при фрезеровании деталей сложной формы на многоцелевых станках – весьма актуальна, так как решение её позволяет повысить производительность дорогостоящего технологического оборудования.

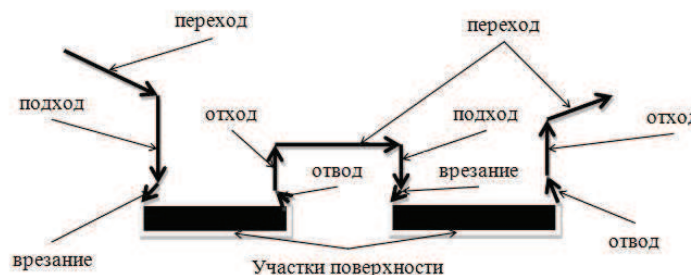
Как известно, оперативное время обработки детали определяется следующим выражением [4]:

$$t_{op} = \sum_{k=1}^p t_{ok} + \sum_{i=1}^q t_{vi}, \quad (1)$$

где:  $t_{ok}$  – основное время  $k$ -ого технологического перехода;  $p$  – число технологических переходов;  $t_{vi}$  – вспомогательное время (время выполнения  $i$ -ого вспомогательного перехода);  $q$  – число вспомогательных переходов.

Вспомогательное время  $t_{vi}$  определяется с учетом времени, затрачиваемого на смену инструментов в ходе обработки, выход инструмента в безопасное положение, переход от одного участка обработки к последующему [1].

Схематично перемещения инструмента без его смены представлено на рисунке 1.



**Рисунок 1. Схема перемещения инструмента при обработке сложных поверхностей без его смены**

В этом случае вспомогательное время  $t_{vi}$  определяется отношением:

$$t_{vi} = \frac{l_i}{v_i}, \quad (2)$$

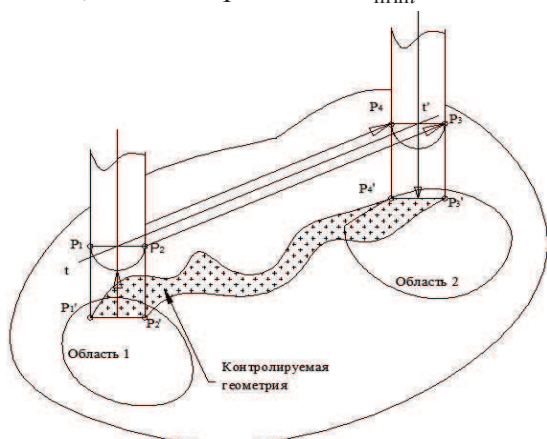
где:  $v_i$  – скорость холостых перемещений;  $l_i$  – длина  $i$ -ого перемещения инструмента от конечной точки обработки  $i$ -ого участка с координатами  $x_i, y_i, z_i$  до точки врезания инструмента в заготовку на  $i+1$ -ом участке фрезерования с координатами  $x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$ .

При этом  $l_i$  рассчитывается по формуле:

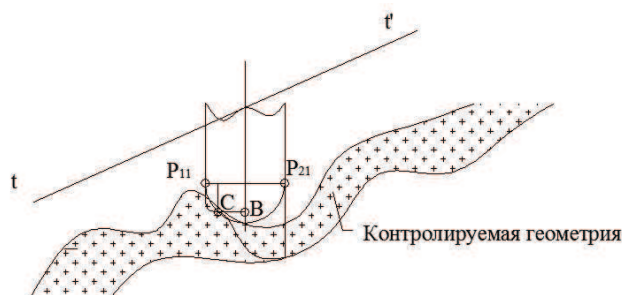
$$l_i = z_{\min i} + H - z_i + \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} + z_{\min i} + H - z_{i+1}, \quad (3)$$

где:  $H$  – расстояние до плоскости безопасности;  $z_{\min i}$  – минимально допустимая высота подъема сфероцилиндрических и конических инструментов над поверхностью стола фрезерного станка, обеспечивающая их холостое перемещение без столкновения с заготовкой при переходе «от реза до реза».

В данном случае задача минимизации затрат времени на холостые перемещения состоит в том, чтобы определить  $z_{\min i}$ .



**Рисунок 2. Схема образования границ контролируемой геометрии**



**Рисунок 3. Схема контакта сфероцилиндрической фрезы с точкой контролируемой геометрии**

Схема на рисунке 2 поясняет предлагаемый способ определения  $z_{\min i}$  при перемещении фрезы по направлению  $tt'$  от конечной до начальной точки обрабатываемых областей («от реза до реза»).

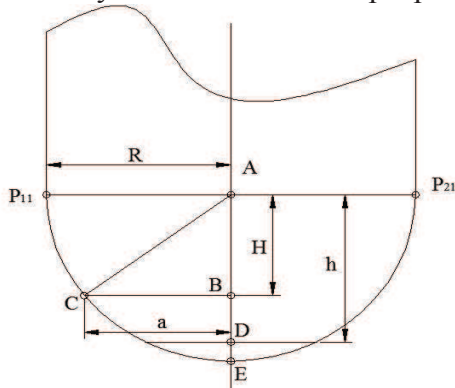
При холостом перемещении фрезы по направлению  $tt'$  прямоугольник  $P_1P_2P_3P_4$  представляет проекцию «следа» конической или сфероцилиндрической фрезы на плоскость, параллельную столу станка. Этому «следу» соответствует на электронной модели часть поверхности с контролируемой геометрией.

При решении поставленной задачи предполагаем, что фреза опускается или поднимается по вертикали и перемещается в горизонтальном направлении  $tt'$  с некоторой дискретностью так, чтобы образуемая её режущей кромкой поверхность условно сталкивалась с каждой точкой контролируемой геометрии (рисунок 3).

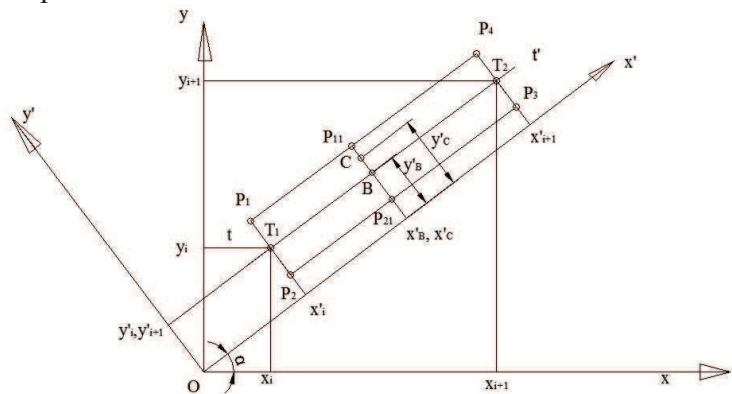
Рассматривая случай условного столкновения фрезы с точкой  $C$ , расположенной на контролируемой геометрии, следует учитывать, что при фрезеровании скорость вершины полусферы при вращении инструмента равна нулю, поэтому часть полусферы сфероцилиндрической фрезы работает неэффективно и исключается из образующей инструмента. Для перехода фрезы в безопасную зону при её смене или при переходе от одной области обработки к другой необходимо знать координату точки  $D$ , а не точки  $E$  (вершины фрезы) (рису-

нок 4). Здесь:  $R$  – радиус цилиндрической части фрезы;  $H$  – расстояние от плоскости, в которой перемещается точка  $C$  (точка контакта) до центра полусферы;  $h$  – расстояние от торцевой плоскости, образуемой режущей частью фрезы, до центра полусферы ( $h < R$ );  $a$  – расстояние от точки  $C$  до оси вращения фрезы.

Алгоритм определения положения точек условного касания инструмента с поверхностью заготовки основан на разбиении сечений поверхности с дискретностью  $\Delta$ . При этом координаты точек условного касания инструментальной и обрабатываемой поверхности могут быть получены с помощью программных средств CAD-системы.



**Рисунок 4. Схема определения расчетной высоты вершины сфероцилиндрической фрезы при столкновении с контролируемой поверхностью**



**Рисунок 5. Преобразование системы координат**

Для упрощения расчетов используется математический аппарат преобразования координат [2]. При этом осуществляется переход от системы координат  $Oxyz$  к системе координат  $Ox'y'z$ , в которой ось  $Ox'$  параллельна направлению  $tt'$  холостого перехода от начальной точки  $T_i(x_i, y_i, z_i)$  к конечной точке  $T_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$  (рисунок 5). Где:  $C(x_C, y_C, z_C)$ ,  $B(x_B, y_B, z_B)$  – координаты точек  $C$  и  $B$  в системе координат  $Oxyz$ ;  $C'(x'_C, y'_C, z'_C)$ ,  $B'(x'_B, y'_B, z'_B)$  – координаты точек  $C, B$  в системе координат  $Ox'y'z$ .

Угол  $\alpha$  определяется как:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}. \quad (4)$$

Координаты точек в системе  $Ox'y'z$  определяются как:

$$\begin{aligned} x' &= x * \cos \alpha + y * \sin \alpha \\ y' &= -x * \sin \alpha + y * \cos \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

Область «следа» прямоугольника  $P_1P_2P_3P_4$  определится как:  $x'_i \leq x' \leq x'_{i+1}$  и  $y'_i - R \leq y' \leq y'_{i+1} + R$ .

При этом  $a$  и  $H$  рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a &= y'_C - y'_B \\ H &= \sqrt{R^2 - a^2} \end{aligned} \quad (6)$$

При решении рассматриваются два случая:

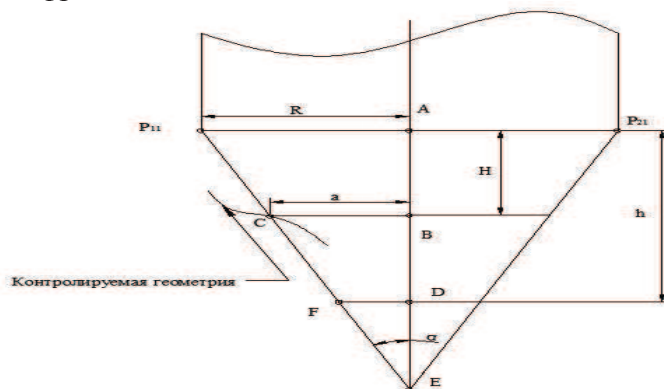
- $H > h$ , когда точка  $C$  принадлежит отброшенной части полусферы фрезы:

$$z_D = z_C, \quad (7)$$

- $H < h$ , когда точка  $C$  не принадлежит отброшенной части полусферы фрезы:

$$z_D = z_C + AB - AD = z_C + H - h. \quad (8)$$

При использовании сфероконических и конических фрез ход решения задачи минимизации затрат времени на осуществление холостых перемещений строится аналогичным образом, что и для сфероцилиндрических фрез. Решение заключается в поиске точки  $D$  с максимальным значением  $z_{\min i}$  (рисунок 6). Где:  $R$  – радиус цилиндрической части фрезы;  $H$  – расстояние от плоскости, в которой перемещается точка  $C$ , до основания конуса фрезы;  $h$  – высота усеченного конуса от торцевой плоскости, образуемой режущей частью фрезы, до основания её конической части ( $h < R$ );  $a$  – расстояние от точки  $C$  до оси вращения фрезы;  $\alpha$  – угол конической части фрезы.



**Рисунок 6. Схема определения расчетной высоты вершины конической фрезы при столкновении с контролируемой поверхностью**

При этом  $a$  и  $H$  рассчитываются по формулам:

$$a = y'_C - y'_B,$$

$$H = AE - BE = \frac{R}{\tan \alpha} - \frac{a}{\tan \alpha} = \frac{R - a}{\tan \alpha}. \quad (9)$$

Аналогично предыдущему решению возможны два случая:

- $H > h$ , когда точка  $C$  принадлежит отброшенной части конуса фрезы:

$$z_D = z_C, \quad (10)$$

- $H < h$ , когда точка  $C$  не принадлежит отброшенной части конуса фрезы:

$$z_D = z_C + AB - AD = z_C + H - h. \quad (11)$$

В результате расчетов могут быть получены координаты  $z_D$  всех точек контролируемой геометрии для сфероцилиндрических и конических фрез, что позволяет выбрать координату  $z_D$  с наибольшим значением, определяющую минимально допустимую высоту  $z_{\min i}$ , на которую должна выходить вершина фрезы  $D$  для выполнения условий перехода фрезы от одной зоны обработки к другой без столкновения с заготовкой.

Обоснованное определение минимально допустимой высоты подъема сфероцилиндрических и конических инструментов для осуществления холостых движений инструмента при фрезеровании сложных поверхностей на трёхкоординатных станках с ЧПУ позволяет сократить вспомогательное время на 30%. Алгоритм оптимизации вспомогательных перемещений инструментов при фрезеровании сложных поверхностей представлен в работе [3].

### Литература

1. Бердников Л.Н. Работа на фрезерных станках. Л.: Лениздат, 1987. 206 с.
2. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. М.: Физматлит, 2002. 472 с.
3. Пономарёв Б.Б., Нгуен Ван Нам. Алгоритм оптимизации вспомогательных перемещений инструментов при фрезеровании сложных поверхностей // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2013. №1. С. 33-37.
4. Технология машиностроения: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского. М.: МГТУ, 2001. 564 с.