

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ

При обработке на металлорежущих станках выходные параметры технологической системы (точность формообразования, производительность и т.д.) зависят от множества входных параметров и возмущающих факторов. Моделирование процессов формообразования при обработке на станках позволяет оценить степень влияния входных параметров на выходную точность.

Образование погрешностей обработки можно представить как пространственные перемещения и повороты координатных систем, построенных на деталях, размеры которых являются составляющими звеньями пространственных размерных цепей. Замыкающим звеном размерной цепи является относительное положение координатных систем, построенных на рабочих поверхностях инструмента и технологических базах обрабатываемой детали при установке, статической и динамической настройке [1, 3].

Блок-схема моделирования процесса обработки на ГПМ приведена на рис. 1. Параметры технологической системы берутся из паспортных данных станка, справочно-нормативной документации или определяются экспериментально. Связав с инструментом, станком и деталью системы координат и используя преобразования  $A_{4 \times 4}$  записывают уравнение режущей кромки инструмента в системе координат детали, построенной на технологической базе. Системы координат приведены на рис. 2.

Данный переход описывает идеальную технологическую систему. Далее учитывается погрешность установки, статической и динамической настройки, описывается последовательный переход из системы координат инструмента в систему координат детали в реальной технологической системе. Разница радиусов – векторов реальной и идеальной систем определяют погрешность. Особенно актуален этот вопрос для станков со сложными движениями формообразования, например, зубообрабатывающих станков, работающих по методу обката.

Математическое описание процесса формообразования при зацеплении двух винтовых колес со скрещивающимися осями позволяет описать наиболее распространенные виды зубообработки по методу обката:

- зубофрезерование червячными фрезами. Фрезу можно рассматривать как однозубое колесо;
- шевингование;
- зубошлифование. Шлифовальный круг воспроизводит зуб или впадину инструментальной рейки.

В частном случае, когда инструмент выполнен на базе теоретически точного основного эвольвентного червяка, координатные системы деталей и узлов технологической системы приведены на рис. 2.

Уравнение эвольвентной винтовой поверхности инструмента имеет вид [3].

$$r_1 = (r_{b_1} \cdot \cos V + U \cdot \cos \gamma_{b_1} \sin V) \cdot i + (r_{b_1} \cdot \sin V - U \cdot \cos \gamma_{b_1} \cos V) \cdot j + (PV - U \cdot \sin \gamma_{b_1})R$$

где  $r_{b_1}$  – радиус основной окружности шевера;  $\gamma_{b_1}$  – угол подъема винтовой линии на основном цилиндре;  $P$  – винтовой параметр,  $P = r_{b_1} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{b_1}$ ;  $U, V$  – криволинейные координаты.

Уравнение поверхности, сопряженной заданной, при идеальном переходе от системы S1 к системе S2:

$$\overline{r_2} = M_{2,1} \cdot \overline{r_1}$$

где  $M_{2,1}$  – матрица перехода от системы S1 к системе S2.

$$M_{2,1} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \Sigma \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 & -\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \Sigma \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 & -\sin \Sigma \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \Sigma \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 & \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \Sigma \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 & -\sin \Sigma \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ \sin \Sigma \cdot \sin \varphi_1 & \sin \Sigma \cdot \cos \varphi_1 & \cos \Sigma & \psi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Пусть система S2 повернулась вокруг осей на малые углы  $\Delta A, \Delta B, \Delta C$

Тогда матрица перехода от системы S1 к системе S2':

$$M'_{2,1} = D_{2m} \cdot M_{2,1} + \delta M_{2,1}$$

где  $D_{2m} = D_{2a} \cdot D_{2b} \cdot D_{2c}$

$D_{2a}, D_{2b}, D_{2c}$  – матрицы бесконечно малых углов поворота вокруг осей X, Y, Z.

$$D_{2m} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta c_2 & -\Delta B_2 & 0 \\ -\Delta c_2 & 1 & \Delta A_2 & 0 \\ \Delta B_2 & -\Delta A_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Пусть  $X = X_1 + \Delta X_2$ ;  $Y = Y_1 + \Delta Y_2$ ;  $Z = Z_1 + \Delta Z_2$ .

Теперь начало повернутой системы S2 сместилось в точку  $O_2'(\Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2)$ . Матрица перехода S'2 к S2'' будет иметь вид:

$$M_{2''2} = \begin{vmatrix} 1 & \Delta c_2 & -\Delta B_2 & \Delta x_2 \\ -\Delta c_2 & 1 & \Delta A_2 & \Delta y_2 \\ \Delta B_2 & -\Delta A_2 & 1 & \Delta z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Матрица перехода от S1 к S2'':  $M_{2''1} = M_{2''2} \cdot M_{21}$

Уравнение поверхности, сопряженной с заданной, с учетом погрешностей перемещения по осям  $\Delta X$ ;  $\Delta Y$ ;  $\Delta Z$  и поворотов вокруг осей  $\Delta A$ ;  $\Delta B$ ;  $\Delta C$ :

$$\bar{r}_2' = M_{2''1} \cdot \bar{r}_1 = M_{21} \cdot \bar{r}_1 + \delta M_{21} \cdot \bar{r}_1 = \bar{r}_2 + \Delta r_2$$

где  $\delta M_{21} = M_{2''1} - M_{21}$

Чем меньше вектор  $\Delta \bar{r}_2 = \delta M_{21} \cdot \bar{r}_1$ , тем точнее будет обработана поверхность. После выполнения соответствующих преобразований координаты вектора  $\Delta r_2$  примут вид:

$$\delta X_2 = a \cdot \Delta C_2 - b \cdot \Delta B_2 + \Delta X_2;$$

$$\delta Y_2 = -c \cdot \Delta C_2 + b \cdot \Delta A_2 + \Delta Y_2;$$

$$\delta Z_2 = -a \cdot \Delta A_2 + c \cdot \Delta B_2 + \Delta Z_2;$$

где

$$a = r_1 \cos \sum \cos \varphi_2 \cdot \sin(\varphi_1 + V) - r_1 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos(\varphi_1 + V) - U \cdot \cos \gamma_{b1} \cdot \cos \varphi_2 \cdot$$

$$\cos \sum \sin(\varphi_1 + V) - U \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \gamma_{b1} \cdot \sin(\varphi_1 + V) - \sin \sum \cos \varphi_2 \cdot (PV - U \cdot \sin \gamma_{b1}) - a_\omega \cdot \sin \varphi_2$$

$$b = f_2(r_{b1}, \sum, \varphi_1, \gamma_{b1}, P, V, U, \psi);$$

$$c = f_3(r_{b1}, \sum, \varphi_1, \gamma_{b1}, P, V, U, a_\omega).$$

Для улучшения условий эксплуатации осуществляют модификацию профиля зуба колеса. Во многих случаях требуется осуществить и технологическую модификацию. В общем случае в качестве производящей инструментальной поверхности необходимо рассматривать поверхность фасонного основного червяка, профиль которого рассчитан, как сопряженный с профилем модифицированного зуба колеса.

Анализ математической модели образования погрешностей при обработке осуществляют методом многофакторного планирования эксперимента.

Технологические факторы разбивают на группы: станок; приспособление; деталь; процесс резания. Каждую из них характеризуют соответствующие параметры. При расчете погрешностей динамической настройки необходимо учитывать значения  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  сил резания, поскольку они значительно отличаются от рассчитанных по эмпирическим формулам усредненных сил резания.

Полученные формулы связывают в явном виде выходную точность технологической системы с первичными погрешностями на входе. Это позволяет оценить степень влияния технологических факторов на точность обработки и выявить доминирующие факторы.

На рис. 2 представлены системы координат многооперационного станка с фрагментом стола с установленной на нем деталью.

Достоинством данной методики является ее универсальность. Она может быть использована как для анализа отдельных механизмов, например, шпиндельного узла, редуктора, так и для анализа сложных технологических систем, ГПС.



Рис 1. Блок-схема моделирования процесса обработки

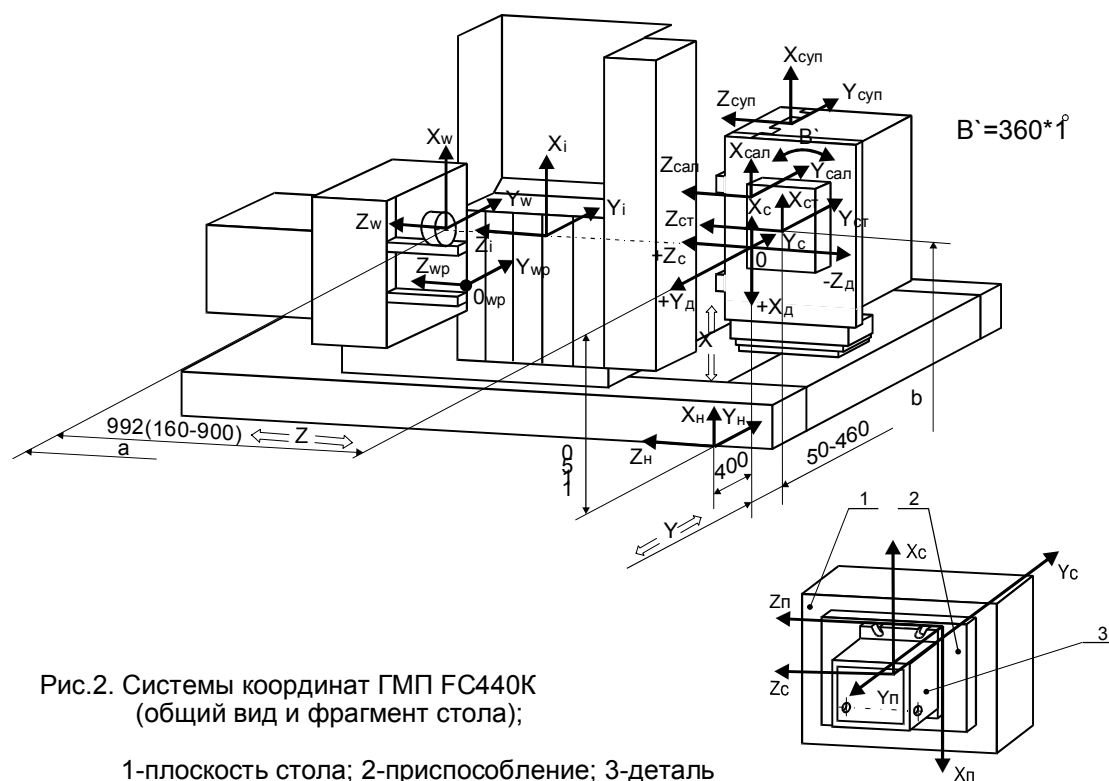


Рис.2. Системы координат ГМП FC440K  
(общий вид и фрагмент стола);

1-плоскость стола; 2-приспособление; 3-деталь

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Базров Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975.
2. Решетов Д. Н. Портман В. Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

И.Г. ЕРШОВА

## ПОСТРОЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В качестве сравнительной оценки технических систем наиболее часто используется соответствующий показатель эффективности. Так при проектировании систем мы стремимся, с одной стороны, увеличить производительность, надежность, универсальность системы, а с другой, снизить удельные энергозатраты, металлоемкость, себестоимость и др. Здесь перечислены несколько частных показателей эффективности, которые могут быть измерены, рассчитаны или получены как итоговые результаты моделирования. Их общее свойство в том, что уровень их общности находится в обратном отношении к их прагматичности. Вместе с тем, это скалярные функции, которые непосредственно устанавливают однозначное соответствие между отношением “ $\geq$ ” и линейным порядком на множестве однородных систем, а экстремальному значению показателя соответствует “наилучшая” система.

Объединение частных показателей эффективности в векторный показатель в первую очередь требует решения проблемы конструирования правила сравнения технических систем, то есть задания отношения. Известны приемы сведения векторного показателя к общему скалярному, например, введением весовых коэффициентов, с которыми суммируются частные показатели или составлением дробных показателей, в которых числитель содержит показатели, требующие их увеличения, а в знаменателе – показатели, требующие уменьшения; при этом недостаток по одному из них может быть скомпенсирован за счет другого. В общем случае