

УДК 658.52.011.56

Шелковой А.Н., Клочко А.А., Набока Е.В.¹; Мироненко Е.В.², Кравцов А.Н.³
 НТУ «ХПИ»¹ г.Харьков, Украина, ДГМА², г.Краматорск, Украина,
 ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Б.Н.Ельцина»³ г.Екатеринбург, Россия

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

Введение

Общая имитационная модель формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом. Рассмотрим новый подход к прогнозированию погрешностей механической обработки зубчатых колес (ЗК), базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования методом Монте–Карло.

Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии реальных профилей от номинальных. Основными конечными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей, а также задачи управления, в том числе оптимального этими погрешностями.

Основная часть

В соответствии с действующим ГОСТ1643–81 погрешности изготовления зубчатых колес [1, 4] уровня обеспечения точности не ниже, чем требуемая, могут быть сформулированы в виде (1)

$$ES_i \leq EI_i \leq f\Delta i(\alpha) \quad (1)$$

где $f\Delta i(\alpha)$ – функция зависимости i – й погрешности зубчатого венца (ЗВ) от фазового угла реального профиля зубчатого колеса (α); ES_i – минимальное значение i – й погрешности; EI_i – максимальное значение i – й погрешности.

Таким образом, требования к точности изготовления ЗВ по обеспечению, к примеру, кинематической точности должны состоять из ограничений на радиальное биение и колебание длины общей нормали (согласно ГОСТ 1643–81) и двух функциональных зависимостей радиального биения и колебания длины общей нормали от фазового угла поворота ЗК (2) и (3)

$$EI_{Frr} \leq ES_{Frr} \leq f_{Frr}(\alpha), \quad (2)$$

$$EI_{Fwr} \leq ES_{Fwr} \leq f_{Fwr}(\alpha) \quad (3)$$

Таким образом, согласно изложенному выше, возникает потребность в получении функциональных зависимостей погрешностей от фазового угла поворота ЗК.

Анализ механизмов формирования погрешностей ЗВ свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности ЗК.

Так как исследуемые погрешности обработки возникают в результате воздействия ряда случайных факторов, характеристики которых, в зависимости от уровня сложности структурного строения погрешностей, являются величинами или функциями, носящими случайный характер проявления, их определение возможно с использованием методов теории вероятностей.

В соответствии с этим, для решения данной задачи, с целью повышения объективности получаемой информации, экономии временных и материальных затрат, наиболее целесообразным представляется применение методики статистического моделирования (метода Монте–Карло)[4].

Исходя из изложенного выше, разработана общая модель формирования ЗВ при меха-

нической обработке, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 1.

Согласно предложенной модели, профиль изделия при механической обработке есть результат пересечения пространственных множеств A и B (4)

$$C = A + B. \quad (4)$$

Пространственные же множества образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей.

Для построения расчетной схемы статистического моделирования стохастической модели элементарные технологические погрешности разбиваются на три вида: погрешности, сдвигающие ЗК в плоскости обработки и тем самым создающие геометрический эксцентриситет, перекашивающие погрешности, создающие перекося плоскости обработки ЗК и погрешности, проворачивающие плоскость обработки и создающие кинематический эксцентриситет.

Далее, согласно расчетной схеме (рис. 2), моделирование погрешности обработки ЗК выполняется на основе расчета кинематического эксцентриситета в 2 этапа:

1. Производится моделирование положения ЗК в станочной системе: а) моделируется скалярное значение вектора j -й технологической погрешности $m(E_j)$, который будет рассматриваться:

– по (5), если погрешность распределена в соответствии с законом равной вероятности

$$m(E_j) = R_{[0,1]} E_j. \quad (5)$$

где $m(E_j)$ – моделируемое значение элементарной составляющей погрешности;

$R_{[0,1]}$ – равномерно распределенная на интервале $[0,1]$ случайная величина;

E_j – величина элементарной составляющей погрешности

– по (6) при любом другом виде закона распределения E_j

$$\int_{-\infty}^{m(E_j)} f(E_j) dE = R_{[0,1]}, \quad (6)$$

где $f(E_j)$ – функция плотности вероятности распределения случайной величины элементарной составляющей погрешности.

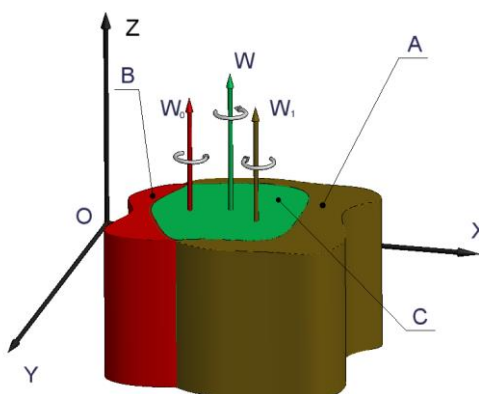


Рис. 1. Общая модель формирования ЗК при механической обработке: А – пространственный профиль обрабатывающего контура; В – пространственный профиль обрабатываемого контура; С – пространственный профиль образованного контура изделия; W_0 – ось концентрации обрабатываемого контура; W_1 – ось концентрации обрабатывающего контура; W – ось концентрации образованного контура изделия

При этом необходимо, чтобы смоделированная случайная величина $m(E_j)$ по вероятности (при $n \rightarrow \infty$) сходилась к искомой величине E_{jr} , т.е. для любого бесконечно малого $\varepsilon > 0$ должно выполняться соотношение (7)

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P \left[\sum_{i=1}^m (m(E_j) - E_{jr})_m < \varepsilon \right] = 1, \quad (7)$$

где P – соответствующая вероятность;

m – количество смоделированных значений;

E_{jr} – искомая (реальная) величина элементарной составляющей погрешности;

б) моделирование угловых положений векторов Q_j (рис. 3)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^\circ = R_{[0;360^\circ]}, \quad (8)$$

где $R_{[0;1]}$, $R_{[0;360^\circ]}$ – соответственно равномерно распределенная случайные величины на интервалах $[0, 360^\circ]$, $[0, 1]$;

$m(\gamma_j)$ – моделируемое значение угла поворота вектора j -й составляющей погрешности.

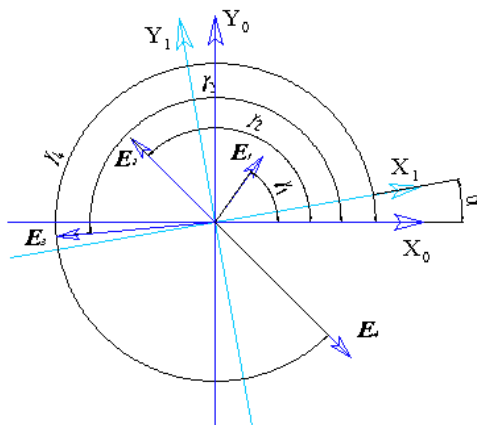


Рис. 2. Расчетная схема кинематического эксцентриситета погрешности обработки ЗК

2. Производится моделирование обработки ЗК:

Для этого выполняется поворот осей координат на угол α , и тем самым воспроизводится движение обката, возникающее при обработке ЗК. При этом эксцентриситет E (сдвиг плоскости обработки ЗК) равен сумме проекций всех эксцентриситетов на ось X (9):

$$E(\alpha) = \sum_{j=1}^m (E_j \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (9)$$

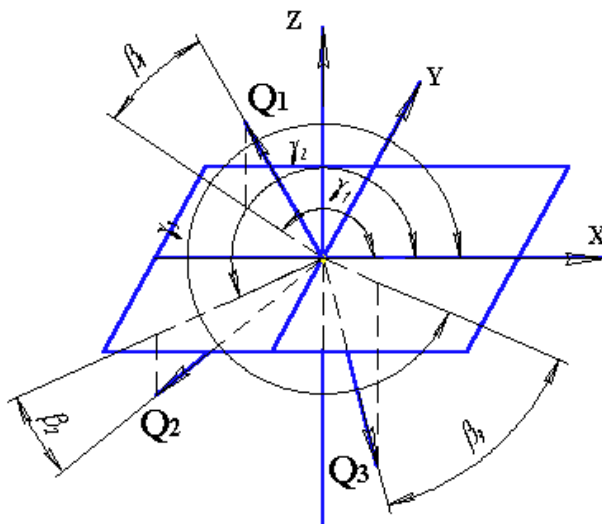


Рис. 3. Расчетная схема перекоса плоскости обработки: Q_j – нормальные вектора плоскостей перекоса; β_j углы, характеризующие их положение в пространстве относительно плоскости обработки ЗК

Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360° , получим функциональную зависимость эксцентриситета от фазового угла поворота зубчатого колеса $E(\alpha)$, (рис 4, а).

Расчет суммарного перекоса плоскости обработки Q производится по схеме, представленной на рис 3.

Суммарный перекос определяется аналогично моделированию эксцентриситета:

1. Производится моделирование положения ЗВ в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение нормального вектора j -й плоскости перекоса по аналогии с (5 ÷ 7);

б) моделируется угловое положение этих векторов $m(\gamma_j)$ и $m(\beta_j)$ по (10 и 11)

$$m(\gamma_j) = R_{[0,1]} 360^\circ, \quad (10)$$

$$m(\beta_j) = R_{[-90^\circ, 90^\circ]}, \quad (11)$$

где $R_{[0, 360^\circ]}$, $R_{[0,1]}$, $R_{[-90^\circ, 90^\circ]}$ — соответственно равномерно распределенная на интервалах $[0, 360^\circ]$, $[0, 1]$, $[-90^\circ, 90^\circ]$ случайные величины;

$m(\gamma_j)$, $m(\beta_j)$ — моделируемые значения характеристических углов j -го технологического перекоса.

2. Производится моделирование обработки ЗК:

Перекоос плоскости обработки приводит к возникновению вертикальной $Q_b(\alpha)$ и горизонтальной $Q_r(\alpha)$ составляющих погрешности профиля ЗВ (12 и 13)

$$Q_b(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \sin(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)), \quad (12)$$

$$Q_r(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \cos(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (13)$$

Если исследуемая погрешность носит только радиальный характер в качестве Q принимается Q_r . Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360° , получим функциональную зависимость перекоса Q от фазового угла поворота ЗК (рис 4, б).

Моделирование третьего типа погрешностей происходит следующим образом:

1. Выполняется моделирование значения погрешности P_j согласно (4 ÷ 6).

2. Выполняется моделирование начального фазового угла (14)

$$m(\varphi_j) = R_{[0,1]} \frac{\pi}{2} = R_{[0, \frac{\pi}{2}]}, \quad (14)$$

3. Выполняется моделирование обработки ЗК (15)

$$P(\alpha) = \sum_{j=1}^m (P_j \cos(\varphi_j + \alpha T)), \quad (15)$$

где T — период колебаний $T = 2\pi/z$; z — число зубьев исследуемого ЗК.

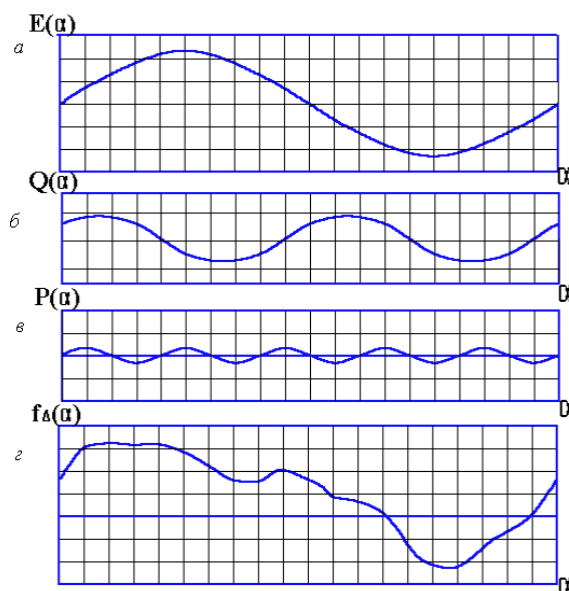


Рис. 4. Схема формирования функциональной зависимости погрешностей венца (E , Q , P , $f\Delta$) от фазового угла поворота ЗК (α)

Таким образом, произведя полный оборот координатных осей ЗК от 0° до 360° получим функциональную зависимость кинематического эксцентриситета P от фазового угла α поворота зубчатого колеса (рис 4, в).

Пользуясь принципом суперпозиции, получим функциональную зависимость погрешности венца от фазового угла поворота ЗК $f\Delta(\alpha)$ (16)

$$f\Delta(\alpha) = E(\alpha) + Q(\alpha) + P(\alpha). \quad (16)$$

Пример результатов моделирования представлен на (рис 4, г).

Проведенный анализ априорных представлений об объекте моделирования позволил выделить наиболее значимые информативные параметры процесса обработки.

Известно, что специфика червячного зубофрезерования [2, 3] состоит в том, что характер динамических параметров обработки в значительной степени обуславливается изменением во времени геометрических и кинематических характеристик (толщин срезаемых слоев и величин кинематических передних и задних углов для всех точек периметра режущих кромок всех работающих зубьев червячной фрезы), (17)

$$\bar{D}_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int \bar{D}(a_i, \alpha_i, \gamma_i) dl, \quad (17)$$

где \bar{D}_t – вектор динамических параметров процесса обработки;

z_0 – число реек червячной зуборезной фрезы;

z_i – число зубьев i -й рейки фрезы;

a_i – мгновенная толщина срезаемого слоя в рассматриваемой точке режущей кромки;

γ_i и α_i – мгновенные значения кинематических переднего и заднего углов для рассматриваемой точки;

L – параметр режущей кромки.

Задача структурной и параметрической идентификации моделей вида (17) по экспериментальным данным является задачей чрезвычайно большой размерности, не имеющей единственного решения. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (в частности, работы В.Н. Башкирова, K.Ziegler, G. Sulzera и др.) свидетельствуют о наличии значимой монотонной связи между площадью слоя, срезаемого зубьями фрезы, и динамическими параметрами процесса обработки.

В качестве интегральной характеристики состояния процесса обработки, как правило, используется мгновенная площадь слоя F_t , срезаемого каждым из зубьев фрезы. Тогда модель (17) может быть представлена в виде (18)

$$F_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int a_i dl. \tag{18}$$

Характер связи между параметрами \overline{D}_t и F_t позволяет предположить наличие аналогии между представлениями этих сигналов в частотной области. Кроме того, разработанные методы позволяют определить мгновенные значения α_i , γ_i и α_i для любой точки любого зуба фрезы.

В модели учтены особенности процесса обработки, обусловленные следующими факторами: фактической формой режущих кромок (схемой резания, типом червяка); углами установки фрезы, наклона стружечных канавок, подъема витков фрезы; числом заходов и реек фрезы; углом наклона и числом зубьев колеса и т.д. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования.

Метод и алгоритм построения математической модели червячной зуборезной фрезы.

Режущая кромка зуба фрезы представляется плоским «примитивом»– упорядоченным списком точек плоскости, заданных их координатами в системе координат (СК) $X_k Y_k$, связанной с зубом фрезы (рис. 5).

Количество типов примитивов зависит от схемы резания червячной фрезы, количество точек в каждом из примитивов определяется конструкцией фрезы и заданной точностью описания[2,4]. Червячная зуборезная фреза представляется «комплексом примитивов», количество и пространственное размещение которых в СК фрезы $X_0 Y_0 Z_0$ определяется типом и конструкцией фрезы (рис. 5). Размещение модели фрезы в СК $X_Z Y_Z Z_Z$, связанной с заготовкой (рис. 6), производится на основе метода первоначального позиционирования и заключается в назначении начальных координат центра СК $X_0 Y_0 Z_0$ в СК $X_Z Y_Z Z_Z$.

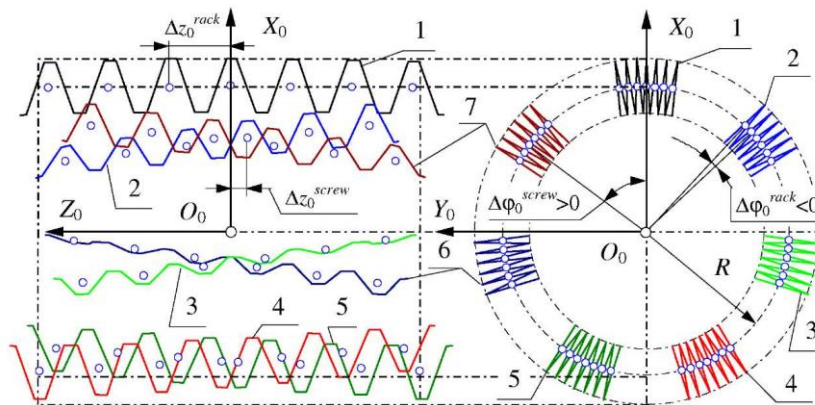


Рис. 5. Графическое представление математической модели двухзаходной правозаходной червячной зуборезной фрезы

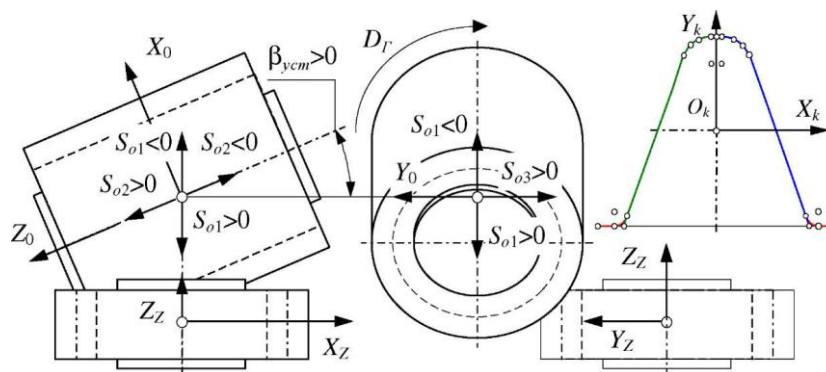


Рис. 6. Системы координат и соглашения о знаках движений подачи

Моделирование перемещения фрезы осуществляется посредством «алгоритма прямой

трассировки зубьев». Для этого введены понятия «передаточное отношение фреза – заготовка (i_{01})» и «квант перемещения фрезы в результате главного движения резания, движений обката и подач ($\Delta\varphi_0$)» (19)

$$\begin{cases} i_{01} = -\text{sign}(\gamma_{m0}) \left[\frac{z_1}{n_{z0}} - \frac{S_{02}}{2 \times \pi \times R \times \text{tg}(\gamma_{R0})} \right] \times \left[1 - \text{sign}(\gamma_{m0}) \times \frac{S_{01} \sin(\beta)}{z_1 \times \pi \times m} \right], \\ \Delta\varphi_0 = -\frac{2\pi}{n_{hob}}, \Delta\varphi_z = \frac{\Delta\varphi_0}{i_{01}}, \Delta S_{01} = S_{01} \left| \frac{\Delta\varphi_z}{2\pi} \right|, \Delta S_{02} = S_{02} \left| \frac{\Delta\varphi_z}{2\pi} \right|, \Delta S_{03} = S_{03} \left| \frac{\Delta\varphi_z}{2\pi} \right|. \end{cases} \quad (19)$$

где m – модуль;

i_{01} – передаточное отношение «фреза-заготовка»;

Z_1 – число зубьев колеса;

n_{z0} – число заходов фрезы;

R – радиус, на котором расположены центры примитивов (в частном случае $R=d_{m0}/2$,

d_{m0} – средний расчетный диаметр фрезы);

γ_{m0} – угол подъема витков фрезы на цилиндре радиуса R ;

β – угол наклона зубьев колеса;

S_{01} – подача фрезы в направлении оси заготовки (встречная/попутная);

S_{02} – осевая подача фрезы;

S_{03} – радиальная подача;

n_{hob} – число «тактов моделирования» на оборот фрезы.

Кванты перемещений $\Delta\varphi_0$, $\Delta\varphi_z$, ΔS_{01} , ΔS_{02} , ΔS_{03} в дальнейшем используются для определения положений зубьев фрезы в СК, связанной с заготовкой, на любом такте моделирования q .

Метод оценки мгновенного состояния процесса обработки основан на восстановлении формы поверхности, обрабатываемой каждым из зубьев фрезы в каждый из моментов времени. Для восстановления формы обрабатываемой поверхности используются функциональные зависимости (ФЗ), определяющие «траектории обратной трассировки» зубьев– гладкие пространственные кривые, по которым зубья, формировавшие обрабатываемую поверхность (« k_z – прошедшие» зубья), приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования (рис. 7).

ФЗ обратной трассировки представляют собой векторные функции вида $G_z^i(i, j, q, k_z, \tau)$, моделирования q , где $G_z^i(\cdot)$ – вектор координат центра k_z – прошедшего примитива в СК $X_Z Y_Z Z_Z$, q – индекс такта моделирования, τ – «глубина обратной трассировки».

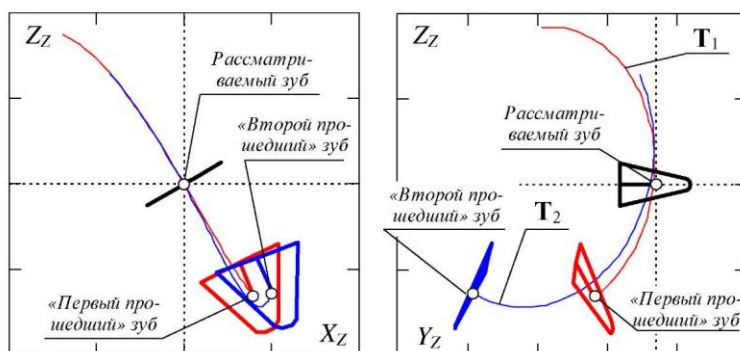


Рис. 7. Траектории обратной трассировки «прошедших» зубьев

Для выбора единственного положения каждого из k_z – прошедших примитивов, представляющих обрабатываемую поверхность, используется критерий минимизации евклидовой метрики (6.20) как функции глубины трассировки τ

$$R(i, j, q, k_z, \tau) = G_z(i, j, q, 0), G_z^i(i, j, q, k_z, \tau), \quad (20)$$

где $G_z(i, j, q, 0)$ – вектор координат в СК $X_Z Y_Z Z_Z$ центра рассматриваемого примитива на такте моделирования q ;

T_k – траектория обратной трассировки центра примитива k_z – прошедшего зуба.

Применение такого подхода позволяет построить операциональное определение срезаемого слоя рассматриваемым зубом фрезы $[S_{i,j}]_q$ на заданном такте моделирования q , в форме геометрического отношения, заданного на рассматриваемых «оттрассированных» примитивах $[P_{i,j}]_q$ (21)

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left[[P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left[\cup_{k_z=1}^{k_z=0} [T_{k_z} [P_{i-k_z,j}]_q] \right] \right], \quad (21)$$

где T – оператор обратной трассировки $[P_{i-k_z,j}]_q$ прошедшего примитива;

K_{z0} – цикл схемы резания;

D_{a1} – фигура, образованная рассечением тела заготовки плоскостью рассматриваемого примитива.

Т.е. ф-ла (15) – оценка мгновенной площади слоя, срезаемого любым зубом фрезы на заданном такте моделирования q . Для реализации метода расчета по (21), используются следующие алгоритмы (рис. 8)

1. Алгоритм определения глубины обратной трассировки τ , доставляющей минимум функции $R(i, j, q, k_z, \tau)$.
2. «Алгоритм отсечения», который используется для выделения и удаления участков примитивов, находящихся вне тела заготовки.
3. Алгоритм перевода оттрассированного примитива в систему координат рассматриваемого примитива.
4. Алгоритм построения пересечения и объединения плоских фигур, заданных списками точек.
5. Алгоритм определения площади плоской фигуры.

Метод, основанный на использовании ФЗ обратной трассировки, позволяет также восстанавливать форму поверхности, обработанной на обороте заготовки, предшествовавшем рассматриваемому переходу. Все разработанные алгоритмы объединены в общем алгоритме обратной трассировки зубьев и могут использоваться также (кроме алгоритма определения площади) для определения иных (помимо мгновенной площади срезаемого слоя) мгновенных геометрических параметров процесса обработки (a_1, γ, α).

Имитационная математическая модель (ИММ) процесса обработки представляет собой комплекс формальных методов и реализующих их алгоритмов. ИММ позволяет с любой степенью детализации анализировать процесс обработки с точки зрения его геометрических закономерностей, рис. 8.

Разработка алгоритмического обеспечения интеллектуальных средств измерительных систем (ИИС)

На рис. 9 представлена общая структура алгоритмического обеспечения ИИС. Она применяется для формирования динамической системы частотных фильтров $\{H(f)\}$, используемых для численного выделения системы информативных параметров процесса обработки $\left\{ [\phi(t_j)]_{\Delta t} \right\}$ на фоне шумов.



Рис. 8. Схема разработанных методов и алгоритмов моделирования обработки ЗК

Разработаны оптимальные конструкции червячных зуборезных фрез и выполнена оптимизация схемы резания по критерию разделения «П-образных» слоев зубьями фрезы, критичными с точки зрения износа.

Применение ИММ геометрических параметров процесса зубофрезерования является средством сокращения объемов длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований. На основе приведенных моделей выполнена оптимизация технологических операций зубофрезерования по критерию равномерной загрузки зубьев фрезы (оптимизация величины осевых перестановок, рациональное использование диагональной подачи).

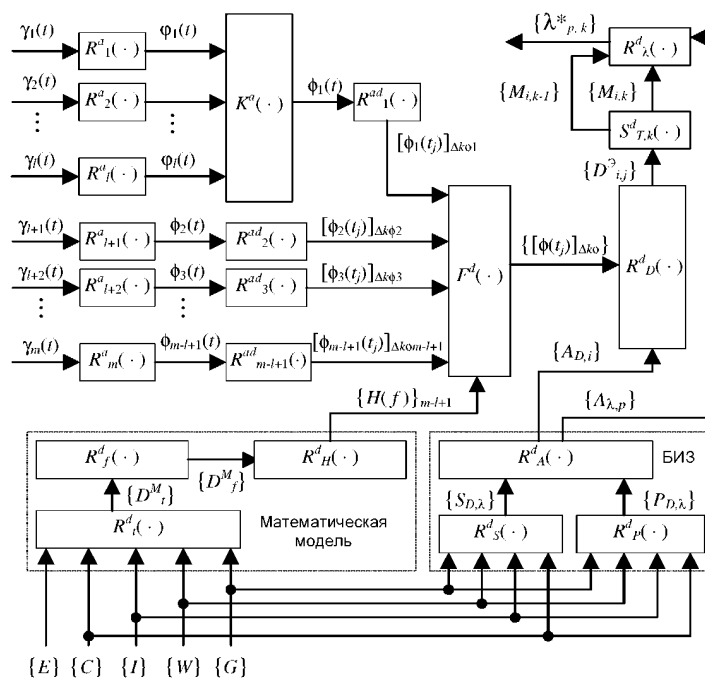


Рис. 9. Структура ИНИС косвенных измерений динамических параметров процесса червячного зубофрезерования

Проверка адекватности модели проводится путем анализа сигналов площади срезаемого слоя (рис. 10) и сигналов окружной силы резания, полученных экспериментальным путем и путем моделирования

Основные методы и алгоритмы моделирования реализованы в рамках программного комплекса «ФРЕЗА». Комплекс включает в себя модули расчета и моделирования эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций.

В то же время, модель обработки ЗК на основе ИММ не может быть непосредственно использована для исследования процесса внутреннего и конусного зубофрезерования, для моделирования обработки фрезами, имеющими заборный конус или криволинейную обрабатывающую.

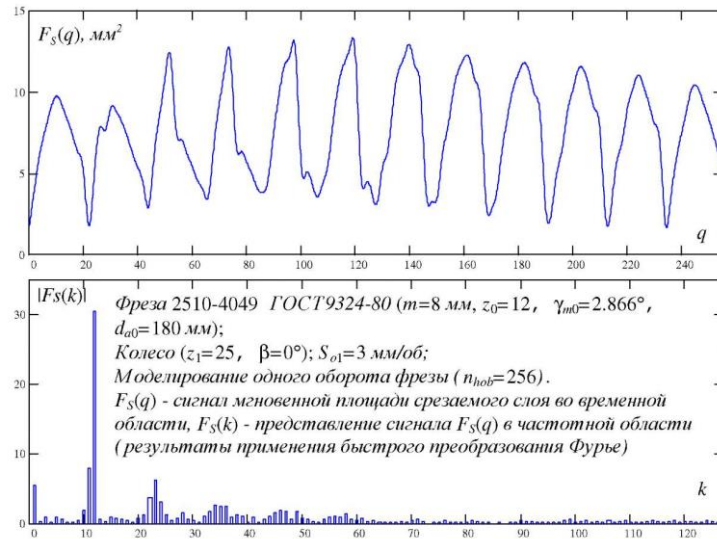


Рис. 10. Представление во временной и частотной области сигнала

Вынужденные колебания упругого перемещения $Y_{по}$ нормали к поверхности резания, вызываемые действием возмущающих воздействий $f(t)$, приводят к погрешности обработки. Система управления по результатам измерения Y_c помощью исполнительного устройства изменяет толщину срезаемого слоя (путем изменения подачи) на величину Y_u . Передаточные функции элементов упругой системы по управляющему $W_y^y(p)$ и возмущающему $W_y^f(p)$ воздействиям процесса формообразования $W_p(p)$ и исполнительного устройства $W_u(p)$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} W_y^y(p) &= Y_y^y(p) / P_y(p) = k_y / (T_{2y}p^2 + T_{1y}p + 1); \\ W_y^f(p) &= Y_y^f(p) / f(p) = k_f / (T_{2y}p^2 + T_{1y}p + 1); \\ W_p(p) &= P_y(p) / \delta(p) = k_p / (T_p p + 1); \\ W_u(p) &= Y_u(p) / \varepsilon(p) = k_u / (T_u p + 1); \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где $\varepsilon(p) = Y^0(p) - Y(p)$; $Y^0(p)$, $Y(p)$, $P_y(p)$, $f(p)$ – операторные изображения ошибки, управляющего воздействия, регулируемого параметра, составляющей силы резания и возмущающего воздействия; $k_f = k_{ly} / c_y$ – коэффициент передачи упругой системы по возмущению; T_u и k_u – постоянная времени и коэффициент передачи исполнительного устройства. Остальные параметры указаны в разъяснениях к зависимостям (7), (8).

Точность работы системы управления характеризуется ошибкой $\varepsilon = \varepsilon_y^0 + \varepsilon_f$, причем ε_y^0 – ошибка, вызванная управляющим воздействием $Y(t)$; ε_f – ошибка, вызванная возмущением $f(t)$:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y^0(p) &= [1 + W_p(p) W_y^y(p)] Y^0(p) / [1 + W_p(p) W_y^y(p) + W_p(p) W_y^y(p) W_u(p)]; \\ \varepsilon_f(p) &= W_y^f(p) f(p) / [1 + W_p(p) W_y^f(p) + W_p(p) W_y^y(p) W_u(p)]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

С учетом выражений (24) система уравнений (22) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{y0}(p) &= (b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) Y^0(p) / (d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ \varepsilon f(p) &= (c_2 p^2 + c_1 p + c_0) f(p) / (d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ d_0 &= 1 + k_p k_y + k_u k_p k_y; \quad b_0 = 1 + k_p k_y; \quad d_1 = b_1 = T_4 + T_p + T_{1y} \\ d_2 = b_2 &= T_p T_u + T_{1y} + T_{2y}; \quad d_3 = b_3 = T_p T_{1y} + T_{2y} T_u \\ d_4 = b_4 &= T_p T_{2y} T_u; \quad c_0 = k_f (T_p + T_u); \quad c_2 = k_f T_p T_u. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Установившиеся значения ошибок представляется в виде убывающего ряда

$$\begin{aligned} \varepsilon_{y0}(t) &= g_0 Y(t) + g_1 \frac{dY(t)}{dt} + \frac{g_2}{2!} \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + \dots; \\ \varepsilon_{y0}(t) &= h_0 f(t) + h_1 \frac{df(t)}{dt} + \frac{h_2}{2!} \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \dots; \end{aligned}$$

где $g_0, g_1, g_2, \dots; h_0, h_1, h_2, \dots$ – коэффициенты ошибок, характеризующие точность работы системы и зависящие от ее структуры. В структуре системы управления (рис. 2, а) значения коэффициентов ошибок определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= u_0 \cdot \varepsilon_0 \text{ ж } n_1 = (u_1 - \varepsilon_1 n_0) \cdot \varepsilon_0 \text{ ж } n_2 = (u_2 - \varepsilon_2 n_1 - \varepsilon_1 n_0) \cdot \varepsilon_0 \\ h_0 &= c_0 / d_0; \quad h_1 = (c_1 - d_1 h_0) / d_0; \quad h_2 / 2 = (c_2 - d_2 h_1 - d_1 h_0) / d_0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Для зубофрезерных станков повышенной точности основную погрешность составляют коэффициенты статических и кинематических ошибок g_0, h_0 и g_1, h_1 . Устранение этих ошибок позволит существенно повысить один из основных параметров эксплуатационной характеристики системы – технологические параметры зубофрезерования при обеспечении заданной точности с максимально достижимой производительностью.

Для решения поставленной задачи введем в систему управления упругими перемещениями ДТСС дополнительную положительную обратную связь по составляющей P_y силы резания с передаточной функцией W_{oc}^y . В этом случае ошибка ε_{y0} по управлению Y^0 .

$$\varepsilon_{y0}(p) = \frac{[1 - W_p(p)W_y(p)W_x^y(p) + W_c^y(p)W_p(p)]Y^0(p)}{1 - W_p(p)W_y(p)W_{oc}^y(p) + W_p(p)W_y^s(p) + W_y^y(p)W_p(p)W_u(p)} \quad (26)$$

Приравняв числитель выражения (26) к нулю, определим структуру и параметры передаточной функции W_{oc}^y , при которых устраняется ошибка $\varepsilon_{y0}(p)$:

$$W_{oc}^y(p) = [1 + W_y^y(p)W_p(p)] / [W_p(p)W_u(p)]. \quad (27)$$

Выражение (27) является условием полной инвариантности системы управления по управляющему воздействию $Y^0(t)$, и при его выполнении коэффициенты g_i , (где $i = 1, 2, 3, \dots$) равны нулю. Однако выполнение условия (27), как правило, приводит к физически нереализуемым системам. В то же время достаточная для практики точность обработки достигается при $g_0 = 0$ и $g_1 = 0$. Для этого достаточно, чтобы $b_0 = 0$ и $b_1 = 0$. Однако при $b_1 = 0$ и $d_1 = 0$, что приводит к потере устойчивости технологической системы. Поэтому для рассматриваемого класса систем достаточно устранить кинематическую ошибку $g_0 = b_0 / d_0 = 0$. Последнее достигается введением положительной обратной связи по силе резания P_y с передаточной функцией $W_{oc}^y(p) = k_{oc}$. При этом $b_0 = 1 + k_p k_y - k_p k_u k_{oc}$.

$$k_{o.c}=(1+k_p k_y)/(k_p k_u). \quad (28)$$

Определим ошибку, вносимую возмущающими воздействиями $f(p)$, с учетом $W_{o.c}^y(p)$:

$$\varepsilon f(p)=\frac{W_y^y(p)[1-W_p(p)W_y(p)W_{oc}^f(p)]/W(p)}{1-W_p(p)W_u(p)W_{oc}^f(p)+W_y^f(p)W_p(p)W_u(p)+W_y^y(p)W_p(p)} \quad (29)$$

Приравняв числитель выражения (29) нулю, найдем условие полной инвариантности по $f(t)$:

$$W_{oc}^f(p)=1/[W_p(p)W_u(p)]=(T_p p+1)/(k_p k_u). \quad (30)$$

Условие (30) выполняется, если структура передаточной функции обратной связи определяется выражением $W_{oc}^f(p)=k_{o.c}+T_{o.c}k_p k_u$, а параметры выбираются из условий $c_0=1-k_p k_u k_{o.c}=0$, $c_1=T_0+T_u-T_p p=0$, причем $k_{o.c}=1/k_u k_o$; $T_{o.c}=(T_p+T_u)/(k_p k_u)$.

Техническая реализация положительной обратной связи по силе резания P_y (P_z , P_x), компенсирует влияние кинематических ошибок, представлена на рис. 3, б. В качестве чувствительных и преобразующих элементов используются системы электронного адаптивного управления с датчиками обратной связи.

Блок 2 позволяет компенсировать воздействия температуры и колебания питающего напряжения. Выходной сигнал усилителя U_{py} поступает на вход дифференцирующей цепи 4 и делитель управления технологической системы 3. При изменении сигнала в цепи 4 регулируется значение T_{oc} , а в цепи 3 – k_{oc} . Сигналы $U_2=f(T_{oc}p)$ и $U_1=f(k_{oc})$ суммируются на входе сумматора.

Полученные зависимости (1) – (3), (10), (12), (15) – (22) и построенные в координатах t, S , области оптимальных технологических параметров зубофрезерования позволяют перейти к алгоритмизации оптимального управления технологических процессов зубообработки разработкой системы технологического оптимального управления, реализующие такие алгоритмы [1, 4].

Выводы

Рассмотрен новый подход к прогнозированию погрешностей механической обработки зубчатых колес базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования методом Монте–Карло.

Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии реальных профилей от номинальных. Основными конечными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей.

Анализ механизмов формирования погрешностей зубчатых колес свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности зубчатых колес.

Проведенный анализ априорных представлений об объекте моделирования позволил выделить наиболее значимые информативные параметры процесса зубообработки с учетом динамических параметров и в значительной степени обуславливается изменением во времени геометрических и кинематических характеристик для всех точек периметра режущих кромок всех работающих зубьев червячной фрезы.

Перечень источников литературы:1. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141.2. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А.Клочко [и др.]; Науч. Ред.. А.А.Пермяков; ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с.,ил., табл.; - (Серия:Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.3.Клочко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко // – Вестник Черниг. гос. технолог.ун-та. – 2011. – № 2(49). – С. 58–68. 4. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT AcademicPublishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0,ISBN-10: 3659691720,EAN:9783659691720

Рецензент: **Клименко Г.П.**, д.т.н., проф., ДГМА

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

Шелковой А.Н., Клочко А.А., Набока Е.В., Мироненко Е.В., Кравцов А.Н.

В статье рассмотрен новый подход к прогнозированию погрешностей механической обработки зубчатых колес базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования методом Монте– Карло. Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии реальных профилей от номинальных. Основными конечными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей. Анализ механизмов формирования погрешностей зубчатых колес свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности зубчатых колес.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ІМІТАЦІЙНОГО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

Шелковой О.М., Клочко О.О., Набока О.В., Мироненко Є.В., Кравцов О.М.

У статті розглянуто новий підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс базується на принципах суперпозиції, векторному характер складових похибки і методі статистичного математичного моделювання методом Монте – Карло. Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень геометрії реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими завданнями, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі прогнозування з заданою вірогідністю виникаючих похибок. Аналіз механізмів формування похибок зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки технологічних систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, що визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, в свою чергу, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки зубчастих коліс.

SOME ASPECTS OF MATHEMATICAL SIMULATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF MACHINING

SHELKOVY A.N., KLOCHKO A.A., Naboka E.V., Mironenko, E.V, Kravtsov A. N.

The article describes a new approach to forecasting errors in the machining of gears based on the principles of superposition, the vector nature of the components of error and statistical method of mathematical modeling by Monte Carlo. The difference between the real shaping of the nominal (ideal) is the presence of deviations of the geometry of the real profiles from the nominal. The major tasks that need to be solved in the study of real regularities of morphogenesis are forecasting problem with a given accuracy errors occur. Analysis of mechanisms of formation of the errors of the gears indicates that basic errors of process systems operations gears are characterized by a random numerical values, which determine the amount and nature of occurrences in the corresponding integrated components that, in turn, interact to determine the investigated error of gears.

Ключевые слова: имитационное математическое моделирование, зубофрезерование, прогнозирование погрешностей, зубчатые колеса, механическая обработка, принцип суперпозиции

Ключові слова: імітаційне математичне моделювання, зубофрезерування, прогнозування похибок, зубчасті колеса, механічна обробка, принцип суперпозиції

Keywords: simulation mathematical modeling, gear milling, forecasting errors, gears, machining, principle of superposition

Дата надходження статті: 24 квітня 2015 р.