

УДК 621.923.7

А.Н. ШЕЛКОВОЙ, А.А. КЛОЧКО, М.И. ГАСАНОВ, Д.А. КРАВЧЕНКО, О.А. АНЦЫФЕРОВА

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

У статті викладені функціональні аспекти імітаційної моделі формування похибок при зубообробці лезвий інструментом. Розглянуто підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс (ЗК), що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання методом Монте-Карло. Розроблено загальну модель формування ЗК при механічній обробці, геометрична інтерпретація якої є результат перетину просторових множин, які утворюються за принципом суперпозиції в результаті імітаційного підсумовування векторів елементарних складових технологічних похибок. Формування моделі у вигляді комплексу формальних методів і алгоритмів дозволяє автоматизувати процес дослідження. Розроблено алгоритм забезпечення інтелектуальних засобів вимірювальних систем. (Ініс) і методика визначення конструкції черв'ячних зуборізних фрез.

Ключові слова: імітаційна математична модель, зубофрезерування, похибки, принцип суперпозиції, векторному метод Монте-Карло, просторові безлічі, принцип суперпозиції, комплекс формальних методів, інтелектуальні засоби, вимірювальні системи, визначення конструкції черв'ячних зуборізних фрез.

В статье изложены функциональные аспекты имитационной модели формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом. Рассмотрен 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. Разработана общая модель формирования ЗК при механической обработке, геометрическая интерпретация которой есть результат пересечения пространственных множеств, которые образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования. Разработан алгоритм обеспечения интеллектуальных средств измерительных систем. (ИНИС) и методика определения конструкции червячных зуборезных фрез.

Ключевые слова: имитационная математическая модель, зубофрезерование, погрешности, принцип суперпозиции, векторном метод Монте-Карло, пространственные множества, принцип суперпозиции, комплекс формальных методов, интеллектуальные средства, измерительные системы.

The article describes the functional aspects of the simulation model for the formation of errors in the machining of a blade tool. The approach to the prediction of errors in the machining of gears (ZK) based on the principles of superposition, the vector nature of the components of the error, and the method of statistical mathematical modeling by the Monte Carlo method is considered. A general model for the formation of ZA during machining is developed, the geometric interpretation of which is the result of intersection of spatial sets that are formed on the principle of superposition as a result of the simulation summation of the vectors of the elementary components of technological errors. The model takes into account the processing features due to the following factors: the actual shape of the cutting edges (cutting scheme, type of worm); Angles of installation of the milling cutter, tilting of the flute grooves, lifting of the milling cutters; Number of cutters and rods; The angle of inclination and the number of teeth of the wheel, etc. Formation of the model in the form of a complex of formal methods and algorithms allows to automate the research process. An algorithm for providing intelligent means of measuring systems has been developed. (InIS) and a technique for determining the design of worm gear cutters.

Key words: Imitation mathematical model, hobbing, errors, superposition principle, vector Monte Carlo method, spatial sets, superposition principle, complex of formal methods, intellectual tools, measuring systems for determining the design of worm gear cutters.

Постановка проблеми. 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 [1, 2].

Анализ последних исследований. Рассмотрим 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, основанном на получении значительного числа реализаций стохастического процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи

В соответствии с действующим ГОСТ1643-81 погрешности зубчатых колес для обеспечения уровня точности должны быть не ниже, чем требуемая и могут быть сформулированы в виде (1)

$$Eli \leq f\Delta i(\alpha) \leq ESi, \quad (1)$$

где $f\Delta i(\alpha)$ - функция зависимости i -ой погрешности зубчатого колеса (ЗК) от фазового угла реального профиля зубчатого колеса (α);

ESi - минимальное значение i -ой погрешности;

Eli - максимальное значение i -ой погрешности.

Таким образом, требования к точности изготовления зубчатого венца по обеспечению, к примеру, кинематической точности должны состоять из ограничений на радиальное биение и колебание длины общей нормали (согласно ГОСТ 1683-81) и двух функциональных зависимостей радиального биения и колебания длины общей нормали от фазового угла поворота ЗК (2) и (3)

$$EIFrr \leq fFrr(\alpha) \leq ESFrr, \quad (2)$$

$$EIFwr \leq fFwr(\alpha) \leq ESFwr. \quad (3)$$

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

Анализ механизмов формирования погрешностей ЗВ свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми

© А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Д.А. Кравченко, О.А. Анцыферова, 2017

характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности ЗК.

Основной материал. 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).

Исходя из изложенного выше разработана общая модель формирования ЗВ при механической обработке, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 1.

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

$$C = A + B. \tag{4}$$

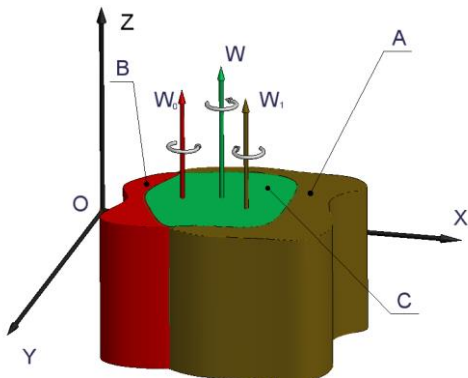


Рис. 1 – Общая модель формирования ЗК при механической обработке: А – пространственный профиль обрабатываемого контура; В – пространственный профиль обрабатываемого контура; С – пространственный профиль образованного контура изделия; W0 – ось концентрации обрабатываемого контура; W1 – ось концентрации обрабатываемого контура; W – ось концентрации образованного контура изделия

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 перекос плоскости обработки ЗК и погрешности, проворачивающие плоскость обработки и создающие кинематический эксцентриситет [2, 3, 4].

Далее, согласно расчетной схеме (рис. 2) моде-

лирование погрешности обработки ЗК выполняется на основе расчета кинематического эксцентриситета происходит в 2 этапа:

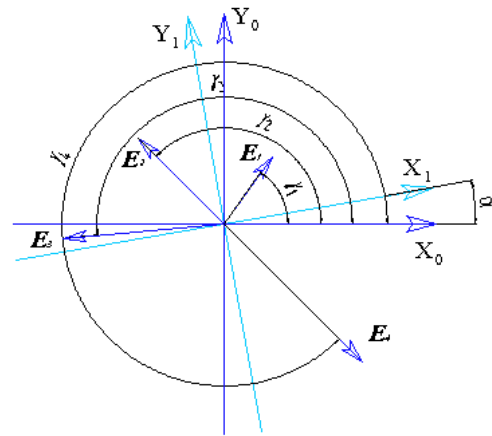


Рис. 2 – Расчетная схема кинематического эксцентриситета погрешности обработки ЗК

1. Производится моделирование положения ЗК в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение вектора j-ой технологической погрешности $m(E_j)$, который будет рассчитываться по (5), если погрешность распределена в соответствии с законом равной вероятности

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

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

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

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

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

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

где P – соответствующая вероятность;
 m – количество смоделированных значений;
 $E_j r$ – искомая (реальная) величина элементарной составляющей погрешности;

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

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

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

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

Для моделирования обработки ЗК: 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)

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

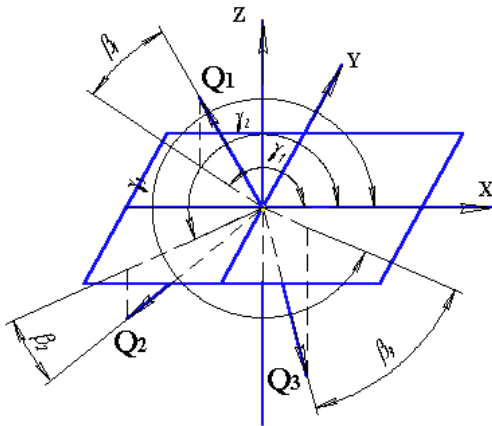


Рис. 3 – Расчетная схема перекоса плоскости обработки ЗК: Q_j нормальные вектора плоскостей перекоса; β и γ углы, характеризующие их положение в пространстве относительно плоскости обработки ЗК.

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 перекокс определяется аналогично моделированию эксцентриситета:

1. Производится моделирование положения ЗК в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение нормально-го 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 $R[0, 360^\circ]$, $R[0,1]$, $R[-900, 900]$ – соответственно равномерно распределенная на интервалах $[0,360^\circ]$, $[0,1]$, $[-900,900]$ случайные величины;

$m(\gamma_j)$, $m(\beta_j)$ – моделируемые значения характери-

стических углов j -го технологического перекокса.

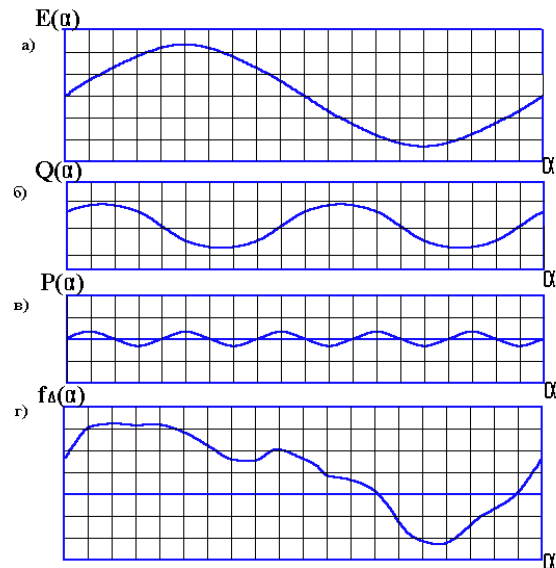


Рис. 4 – Схема формирования функциональной зависимости погрешностей венца (E , Q , P , fA) от фазового угла поворота ЗК

Перекокс плоскости обработки приводит к возникновению вертикальной $Q_b(\alpha)$ и горизонтальной $Q_r(\alpha)$ составляющих погрешности профиля ЗК (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 радиальный характер, тогда Q равна Q_r .

Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360° получим функциональную зависимость перекокса Q от фазового угла поворота зубчатого колеса, (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.

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 (16).

$$fA(a) = E(a) + Q(a) + P(a). \quad (16)$$

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

Проведенный анализ априорных представлений об объекте моделирования позволил выделить наиболее значимые информативные параметры процесса обработки [3, 5, 6].

Известно, что специфика червячного зубофрезерования 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 Dt – 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, К. 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 Ft , срезаемого каждым из зубьев фрезы. Тогда модель (17) представляется в виде (18)

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

Характер связи между параметрами \bar{D}_t и Ft позволяет предположить наличие аналогии между представлениями этих сигналов в частотной области. Кроме того, разработанные методы позволяют определить мгновенные значения α_i , γ_i и αl 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 [3, 5, 6]. Червячная зуборезная фреза представляется «комплексом примитивов», количество и пространственное размещение, которых в СК фрезы $X_q Y_q Z_q$ определяется типом и конструкцией фрезы (рис. 5). Размещение модели фрезы в СК $XZYZZZ$, связанной с заготовкой (рис. 6), производится на основе метода первоначального позиционирования и заключается в назначении начальных координат центра СК $X_q Y_q Z_q$ в СК $XZYZZZ$.

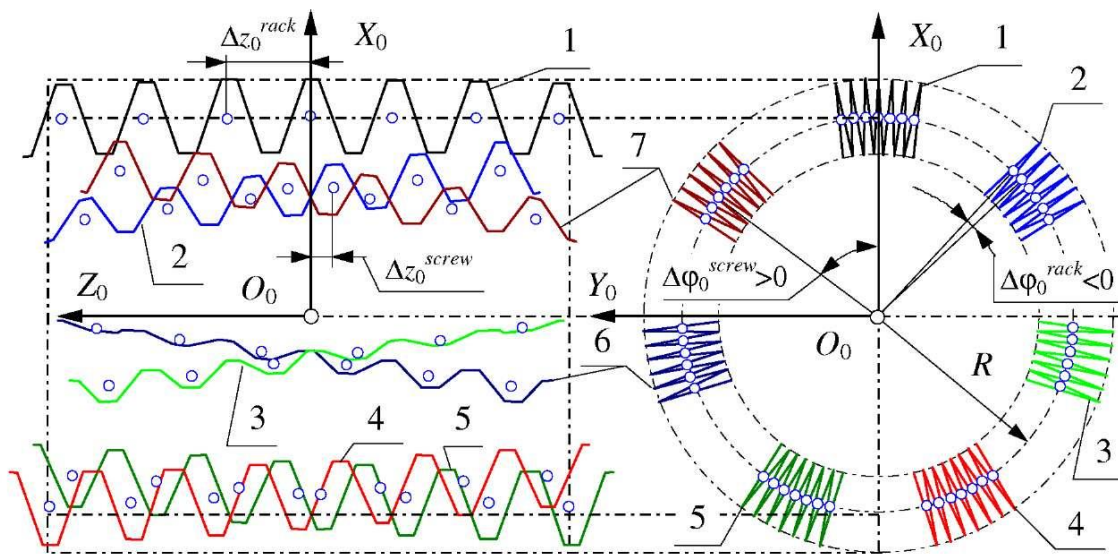


Рис. 5 – Графическое представление математической модели двухзаходной правозаходной червячной зуборезной фрезы

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)

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

- где m – модуль;
- i_{01} – передаточное отношение «фреза-заготовка»;
- $Z1$ – число зубьев колеса; n_{z0} – число заходов фрезы;
- R – радиус, на котором расположены центры примитивов (в частном случае $R=dm0/2$, $dm0$ – 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.

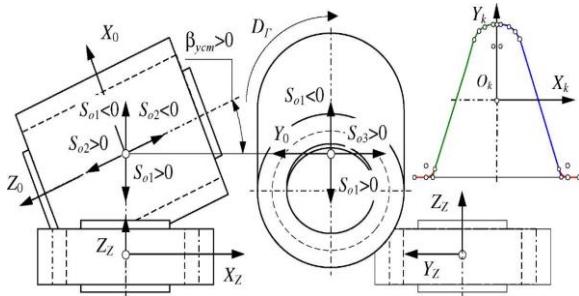


Рис. 6 – Системы координат и соглашения о знаках движений подачи

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 .

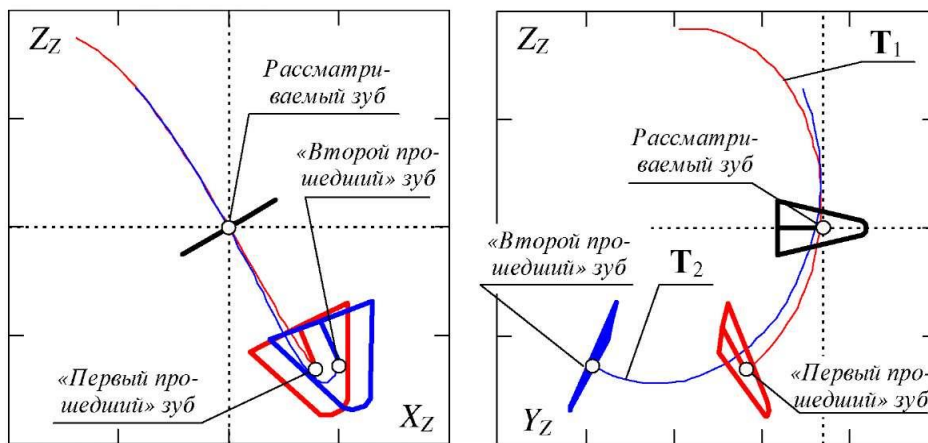


Рис. 7 – Траектории обратной трассировки «прошедших» зубьев

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 («kz - прошедшие» зубья), приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования (рис. 7).

ФЗ обратной трассировки представляю 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 XZYZZZ, q – индекс такта моделирования, τ – «глубина обратной трассировки».

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 .

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

где $G_z(i, j, q, 0)$ - вектор координат в СК XZYZZZ центра рассматриваемого примитива на такте моделирования q ;

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

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

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left[[P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left[\bigcup_{k=1}^{k_{z0}} T_{k=1} [P_{i-k,j}]_q \right] \right], \quad (21)$$

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

K_{z0} - цикл схемы резания;

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

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

Алгоритм определения глубины обратной трассировки τ , доставляющей минимум функции $R(i, j, q, k, \tau)$.

«Алгоритм отсечения», который используется для выделения и удаления участков примитивов, находящихся вне тела заготовки.

Алгоритм перевода оттрассированного примитива в систему координат рассматриваемого примитива.

Алгоритм построения пересечения и объединения плоских фигур, заданных списками точек.

Алгоритм определения площади плоской фигуры. Метод, основанный на использовании ФЗ обратной трассировки, позволяет также восстанавливать форму поверхности, обработанной на обороте заготовки, предшествовавшем рассматриваемому. 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 (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 $\{H(f)\}$, использующихся для численного выделения системы информативных параметров процесса обработки $\{[\phi(t_i)]_{\text{эф}}\}$ на фоне шумов.

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 [4, 5].

На основе приведенных моделей выполнена оптимизация технологических операций зубофрезерования по критерию равномерной загрузки зубьев фрезы (оптимизация величины осевых перестановок, рациональное использование диагональной подачи). 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, который включает в себя модули расчета и моделирования эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций.



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

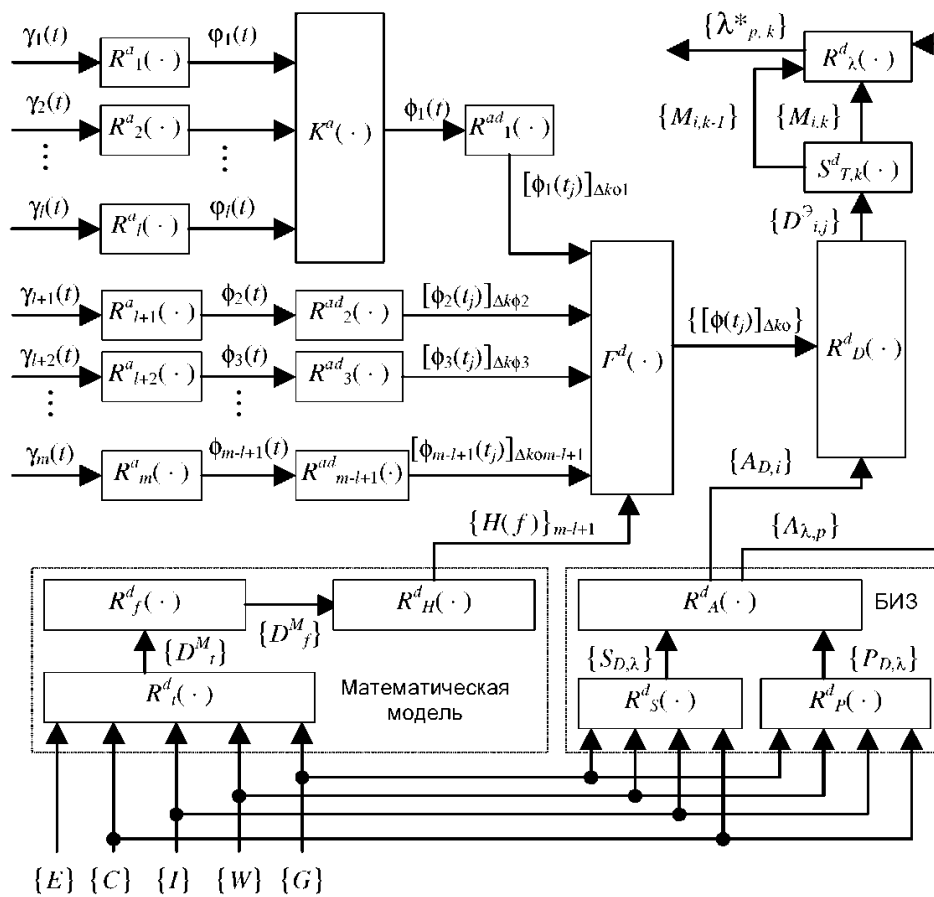


Рис. 9 – Структура ИнИС косвенных измерений динамических параметров процесса червячного зубофрезерования

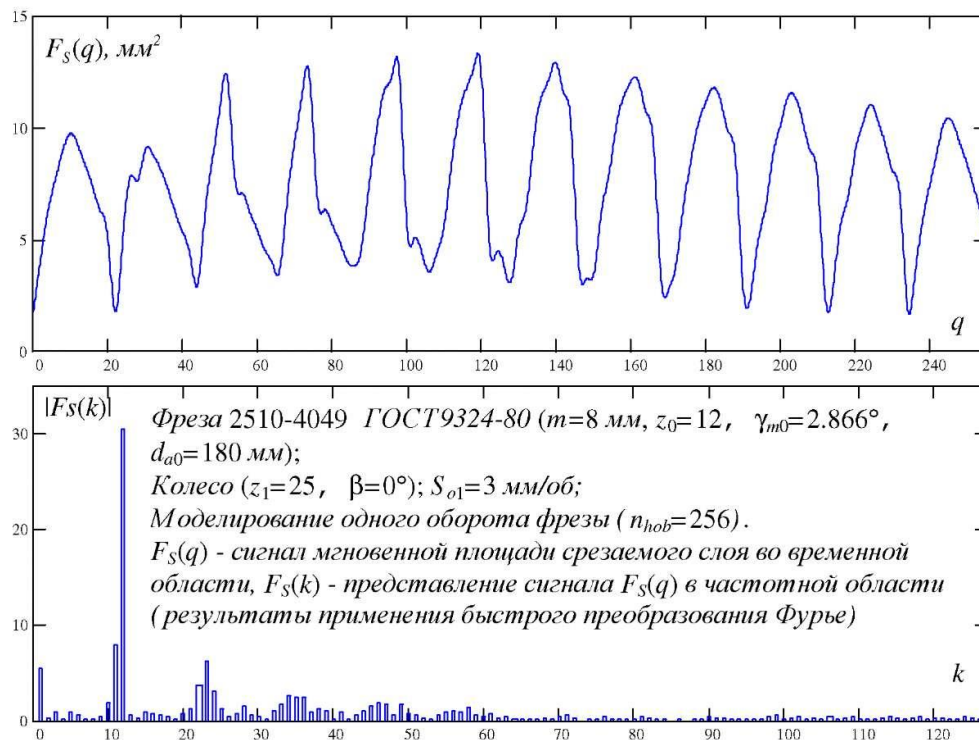


Рис. 10 – Представление во временной и частотной области сигнала мгновенной площади срезаемого слоя

В то же время, модель обработки ЗК на основе ИММ не может быть непосредственно использована для исследования процесса зубофрезерования, для моделирования обработки фрезами, имеющими за-

борный конус или криволинейную образующую.

Выводы. Разработана общая модель формирования ЗК при механической обработке, геометрическая интерпретация которой есть результат пересечения пространственных множеств, которые образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей.

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 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, приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования.

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.

Разработан алгоритм обеспечения интеллектуальных средств измерительных систем (ИИС).

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).

Список літератури

1. *Равская Н.С.* Основы формообразования поверхонь при механічній обробці / *Н.С. Равская, О.А. Охріменко, П.П. Мельничук, О.В., Т.П. Ніколаєнко* // Навчальний посібник з грифом МОН України (лист №1/11-5203 від 12.03.2013), К.: Вид. СКД-Друк 2013. – 126 с.
2. *Шелковой А.* Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства / *А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока* // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
3. *Ю. В. Тимофеев.* 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.
4. *Клочко А.А.* Применение высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых цилиндрических передач / *А.А.Клочко* // Научный Вестник ДГМА. – 2014. – № 2 (14Е). – С. 42–55. Режим доступа [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2\(14E\)_2014/nomer_2\(14E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(14E)_2014/nomer_2(14E)_2014.html)
5. *Шелковий О.М.* Логіко-лінгвістичне моделювання взаємозв'язку функціональних характеристик системи дрібносерійного виробництва з параметрами процесу складання / *О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Л.Б. Шрон, А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк* // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – Вып.67. – С. 94-100.
6. *Шелковой, А. Н.* Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки / *А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, Д. В. Ефремов, А. А. Клиновский* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 157–173.

Bibliography (transliterated)

1. *Ravskaya N.S., Okhrimenko O.A., Melnichuk P.P., Nykolayenko T.P.* *Osnovy formoutvorenniya poverkhon' pry mekhanichnyi obrobtsi* / [Basis of formutverovronya verhon in the case of mekhanichnyi obrobtsi.] / Navchalny posliobnik with the stamp of the Ministry of Education and Science of Ukraine (sheet No. 1 / 11-5203 dated 12.03.2013), K.: View. SKD-Druk 2013. - 126 p.
2. *Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E.* *Imitacionnoe modelirovanie v zadachah mehanosborochного proizvodstva* [Simulation modeling in the tasks of mechanoassembly production].- Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 p., Ill. In Russian. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720.
3. *Timofeev Yu. V., Mironenko E. V., Klochko AA, Shapovalov VF, Mironenko OE.* *Tehnologicheskie sposoby povysheniya tochnosti zubofrezerovaniya universal'nymi chervyachnymi frezami* [Technological ways of increasing the accuracy of gear milling with universal worm mills] News of the National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute". - Khar'kov: NTU KhPI, 2010. - No. 25. – pp. 134-141 ..
4. *Klochko A.A.* *Primenenie vysokoskorostnyh tzhelonaagruzhenykh zubchatykh cilindricheskikh peredach* [Application of high-speed heavy-duty gear-type cylindrical gears]. Scientific Herald of the DSEA. - 2014. - No. 2 (14E). - pp. 42-55. The access mode is [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2\(14E\)_2014/nomer_2\(14E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(14E)_2014/nomer_2(14E)_2014.html)
5. *Shelkovy O.M. Klochko O.O., Shron L.B., Skorkin A.O., Kondratyuk O.L.* *Lohiko-linhvistichne modelyuvannya vzayemozv'yazku funktsional'nykh kharakterystyk systemy dribnoseriynogo vyrobnystva z parametramy protsesu skladannya* [Logic-lingvistichnee modulyuvannya vzaimozvvyuku funktsionalnykh characteristics sistemi dribnoseriynogo virobnystva in the parameters of the storage process].Open information and computer integrated technologies: Sat. Sci. Tr. - H.: Nats. Aerospace. Univ., "KhAI", 2015. - Issue 67. - pp. 94-100.
6. *Shelkovoy A.N., Mironenko E.V., Klochko A.A., Efmremov D.V., Klinovsky A.A.* *Metodika rascheta parametrov sostojaniya poverhnostnogo sloja zakalennykh krupnomodul'nykh zubchatykh koles v zavisimosti ot uslovij ih obrabotki* [Method of calculating the parameters of the state of the surface layer of hardened coarse-grained gears, depending on the conditions of their processing]. Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - pp. 157-173.

Поступила (received) 02.07.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шовковой, О.О. Клочко, М.И. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Д.А. Кравченко, О.А. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Functional aspects of simulation mathematical modeling of geometric parameters of the process of gear milling / A. Shelkovoy, A. Klochko, M. Gasanov, D. Kravchenko, O. Antsiferova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.66–74. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковой Александр Николаевич – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків;

Шелковой Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков;

Шелковой Александр Николаевич - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty Institute " Kharkiv;

Клочко Александр Александрович – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru .

Клочко Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru;

Klochko Alexander Alexandrovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty Institute " Kharkiv; tel. : (067) 936-36-64; e mail: klochko21@rambler.ru;

Гасанов Магамедэмын Исагамедович – к.т.н., професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків;

Гасанов Магамедэмин Исагамедович – к.т.н., профессор, проректор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков;

Hasanov Magamedemin Isamagamedovich - Ph.D., professor, pro-rector of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov;

Кравченко Дмитро Александрович – аспірант кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ;

Кравченко Дмитрий Александрович – аспірант кафедры компьютеризированных мехатронных систем, инструмент и технологии Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск;

Kravchenko Dmitry Alexandrovich - postgraduate student of the department of computerized mechatronic systems, tools and technologies of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk;

Анциферова Олеся Александрівна - аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків;

Анциферова Олеся Александровна – аспірант кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков;

Antsyferova Olesya Aleksandrovna - post-graduate student of the department of engineering technology and metal cutting machines of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov.