

МОДЕЛЬ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ ЧЕРВЯЧНОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ

*С.П. АНДРОСОВ, канд. техн. наук, доцент
(ОмГТУ, г. Омск)*

Статья поступила 26 марта 2012 года

644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11,
Омский государственный технический университет, e-mail: asp57@list.ru

Рассматриваются вопросы моделирования червячной модульной фрезы для нарезания зубчатых колес. Определены уравнения винтовых поверхностей стружечной канавки фрезы, выраженные параметрическими векторными функциями. Разработана компьютерная программа для расчета и построения модели стружечных канавок фрезы.

Ключевые слова: червячная модульная фреза, поверхность стружечной канавки, векторная функция, моделирование.

Фрезерование зубьев червячными модульными фрезами за счет своей универсальности, позволяющей нарезать с высокой точностью зубчатые колеса одного модуля с различным числом зубьев и углом наклона зуба одним и тем же инструментом, получило наибольшее распространение. Простота наладки зубофрезерных станков, высокая производительность и экономичность процесса, а также технологическая надежность червячных фрез дают возможность использовать этот способ зубонарезания практически во всех видах производства.

Червячная фреза является многолезвийным инструментом со сложным профилем. Проектирование и моделирование таких инструментов представляет собой достаточно трудоемкий процесс, решение которого без применения современных вычислительных средств и методов расчета является сложной задачей.

В настоящее время с целью повышения качества и производительности проектирования широко внедряется автоматизированная система технологической подготовки производства, частью которой является система проектирования металлорежущих инструментов (СПРИ), учитывающая требования машинного проектирования. На данный момент СПРИ несколько

отстает от темпов развития САПР технологического назначения, так как пока не все этапы проектирования инструментов формализованы на математическом уровне. В работе [1] отмечается, что для практического осуществления полного автоматизированного процесса проектирования режущего инструмента необходимо исследовать возможности и, где это целесообразно, реализовывать численные методы решения задач проектирования инструмента, как наиболее эффективные при машинном проектировании. В частности, относительно зуборезных фрез необходимо обобщить и развивать материал по обоснованию габаритных размеров, числа зубьев, формы и размеров зубьев и стружечных канавок.

Размеры режущих зубьев и стружечных канавок влияют на правильную работу любого инструмента, в том числе червячной фрезы. Несоответствие стружечного пространства объему снимаемой стружки приводит к плохой работе инструмента, а часто к его поломке. Форму и размеры зуба и стружечной канавки определяют исходя из необходимости получения прочного зуба, стружечного пространства, обеспечивающего свободное размещение стружки, достаточного числа переточек и технологичности изготовления. В настоящее вре-

Для расчета размеров стружечной канавки червячной фрезы применяют графоаналитические и аналитические методы. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Расчет стружечной канавки обычно ограничивается определением ее параметров в торцевом сечении фрезы [1, 2], т. е. рассматривается плоская задача, которая не описывает винтовые поверхности стружечной канавки. Процесс зубофрезерования методом обката – это объемный процесс, поэтому проектирование и моделирование червячных фрез необходимо производить в пространственном отображении.

Основным вопросом при расчете и моделировании червячных модульных фрез, применяемых для нарезания зубчатых колес, отмечается в работе [3], является определение профиля их зубьев. Для определения профиля зубьев фрезы необходимо решить ряд задач в той последовательности, в которой формиру-

ется фреза как инструмент: записать уравнения поверхностей основного червяка; определить уравнения поверхностей винтовой стружечной канавки, образующей пространство для размещения стружки и переднюю поверхность зубьев; выразить уравнение режущих кромок зубьев; определить уравнение боковых заточенных поверхностей зубьев; найти уравнение профиля в соответствующем сечении и определить его характеристики.

Данная работа является одним из этапов создания аналитической модели червячной модульной фрезы. Ее цель заключается в определении уравнений винтовых поверхностей стружечной канавки червячной фрезы в матрично-векторной форме и разработке компьютерной модели стружечных канавок фрезы.

Рассмотрим червячную фрезу, имеющую правозаходный основной червяк. Стружечная канавка у такой фрезы является левозаходной,

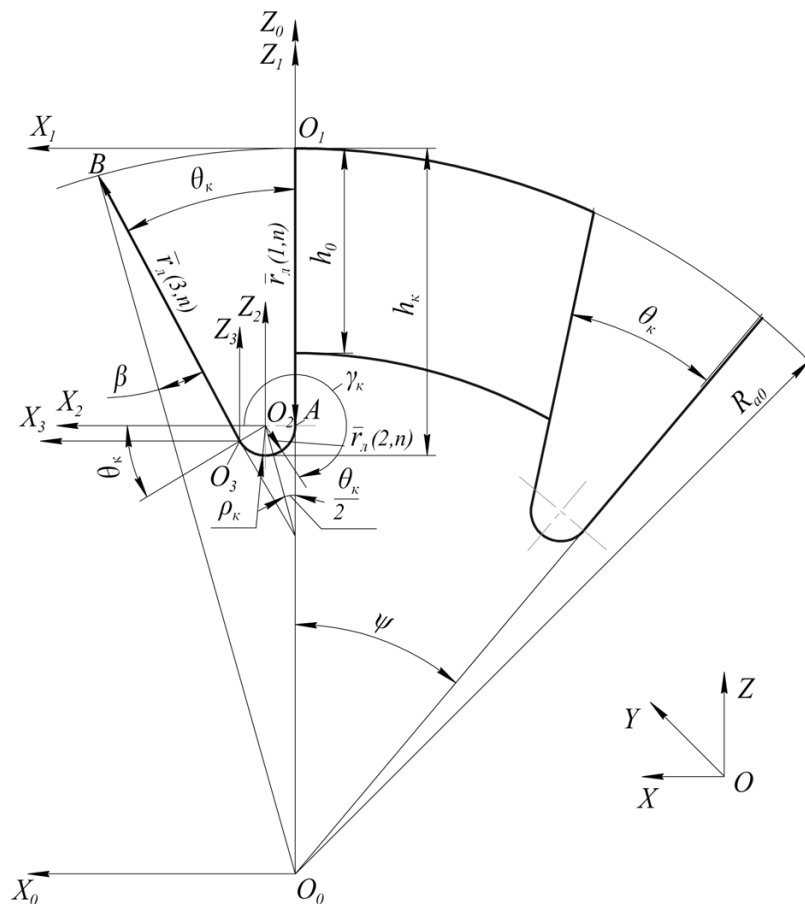


Рис. 1. Профиль стружечной канавки червячной фрезы:

R_{a0} – радиус наружного цилиндра; ρ_k – радиус закругления основания канавки; γ_k – параметрический угол дуги окружности; h_k – глубина канавки; h_0 – высота зуба; θ_k – угол между зубьями; ψ – угловой шаг между зубьями



причем она располагается перпендикулярно направлению винтовых поверхностей основного червяка фрезы. Профиль канавки в торцевом сечении фрезы (рис. 1) имеет три участка. Участок O_1A принадлежит передней поверхности зуба, участок AO_3 – поверхности закругления основания канавки, а участок O_3B – задней тыльной поверхности зуба. Следует отметить, что в модели не рассматривается затылование зуба. Указанные участки в своих локальных системах координат $X_1O_1Y_1Z_1$, $X_2O_2Y_2Z_2$ и $X_3O_3Y_3Z_3$ описываются векторами

$$\bar{r}_l(i, n) = \begin{bmatrix} x(i, n) \\ 0 \\ z(i, n) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где i – номер вектора, $i = 1, 2, 3$; n – количество точек на векторе; $0 \leq n \leq p$, p – любое целое число.

Координаты точек на участках профиля определяются выражениями

$$x(i, n) = l(i, n)\bar{e}_x(\bar{r}_l(i, n)),$$

$$z(i, n) = l(i, n)\bar{e}_z(\bar{r}_l(i, n)),$$

где $\bar{e}_x(\bar{r}_l(i, n))$ и $\bar{e}_z(\bar{r}_l(i, n))$ – орты векторов $\bar{r}_l(i, n)$; $l(i, n)$ – выбранное значение длины векторов $\bar{r}_l(i, n)$, $0 \leq l(i, n) \leq |\bar{r}_l(i, n)|$.

Участок закругления профиля AO_3 описывается вектором

$$\bar{r}_l(2, n) = \begin{bmatrix} \rho_k \cos \gamma_k \\ 0 \\ \rho_k \sin \gamma_k \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $180^\circ \leq \gamma_k \leq 360^\circ - \theta_k$.

Модуль вектора $\bar{r}_l(2, n)$ равен радиусу закругления основания стружечной канавки ρ_k . Глубина стружечной канавки вычисляется по формуле

$$h_k = h_0 + \kappa + \rho_k,$$

где κ – величина затылования зуба.

Значение κ определяется зависимостью [4]

$$\kappa = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_{a0},$$

где d_{a0} – наружный диаметр фрезы; z_0 – число зубьев фрезы; α_{a0} – задний угол периферийной режущей кромки.

Модули векторов $\bar{r}_l(1, n)$ и $\bar{r}_l(3, n)$ имеют значения:

$$|\bar{r}_l(1, n)| = h_0 + \kappa;$$

$$|\bar{r}_l(3, n)| = R_{a0} \frac{\sin(\theta_k - \beta)}{\sin(180^\circ - \theta_k)} - h_1,$$

где $h_1 = \frac{\rho_k}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta_k}{2}\right)}$. Угол β (рис. 1) определяется

выражением

$$\beta = \arcsin\left(\frac{[R_{a0} - h_0 - \kappa - h_1] \sin(180^\circ - \theta_k)}{R_{a0}}\right).$$

В глобальной системе координат $X_0O_0Y_0Z_0$ фрезы векторы (1) запишутся:

$$\begin{aligned} \bar{r}_0(1, n) &= [M_{10}] \bar{r}_l(1, n) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{a0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z(i, n) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_{a0} + z(i, n) \\ 1 \end{bmatrix}; \\ \bar{r}_0(2, n) &= [M_{20}] \bar{r}_l(2, n) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho_k \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{a0} - (h_0 + \kappa) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(2, n) \\ 0 \\ z(2, n) \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \rho_k(1 + \cos \gamma_k) \\ 0 \\ C + \rho_k \sin \gamma_k \\ 1 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\bar{r}_0(3,n) = [M_{30}] \bar{r}_l(3,n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho_k(1 + \cos \theta_k) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & C - \rho_k \sin \theta_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} x(3,n) \\ 0 \\ z(3,n) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_k(1 + \cos \theta_k) + x(3,n) \\ 0 \\ C - \rho_k \sin \theta_k + z(3,n) \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $[M_{i0}]$ – матрица параллельного переноса локальных систем координат $X_1O_1Y_1Z_1$, $X_2O_2Y_2Z_2$ и $X_3O_3Y_3Z_3$ соответственно; $C = R_{a0} - (h_0 + k)$.

Как известно, в производстве зубчатых колес наибольшее распространение получили червячные модульные фрезы с винтовыми стружечными канавками [5]. В этой связи рассмотрим описание винтовой поверхности стружечной канавки.

Для образования винтового движения необходимо повернуть профиль стружечной канавки на некоторый угол вокруг оси фрезы O_0Y_0 (рис. 2) и переместить его поступательно в направлении, параллельном этой оси. Поверхность стружечной канавки состоит из трех частей: $O_1AA'O_1'$ – передняя поверхность зуба; $ABB'A'$ – поверх-

ность основания канавки; $O_3BB'O_3'$ – задняя тыльная поверхность зуба.

Произвольная точка M передней поверхности зуба описывается векторной функцией

$$\bar{r}(1,n) = [M] \bar{r}_0(1,n), \quad (3)$$

где $[M]$ – матрица преобразования поворотных движений по часовой стрелке вокруг оси O_0Y_0 (рис. 2) и поступательных движений вдоль этой оси:

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \varphi_k & 0 & \sin \varphi_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_k \varphi_k \\ -\sin \varphi_k & 0 & \cos \varphi_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В формуле (4) угол φ_k является параметрическим углом поворота винтовой поверхности относительно начального положения. Выражение $a_k \varphi_k$ определяет проекцию вектора перемещения вдоль оси O_0Y_0 . Величина a_k является винтовым параметром стружечной канавки. Значение винтового параметра a_k определяется выражением

$$a_k = \frac{P_k}{2\pi},$$

где P_k – шаг винтовой стружечной канавки.

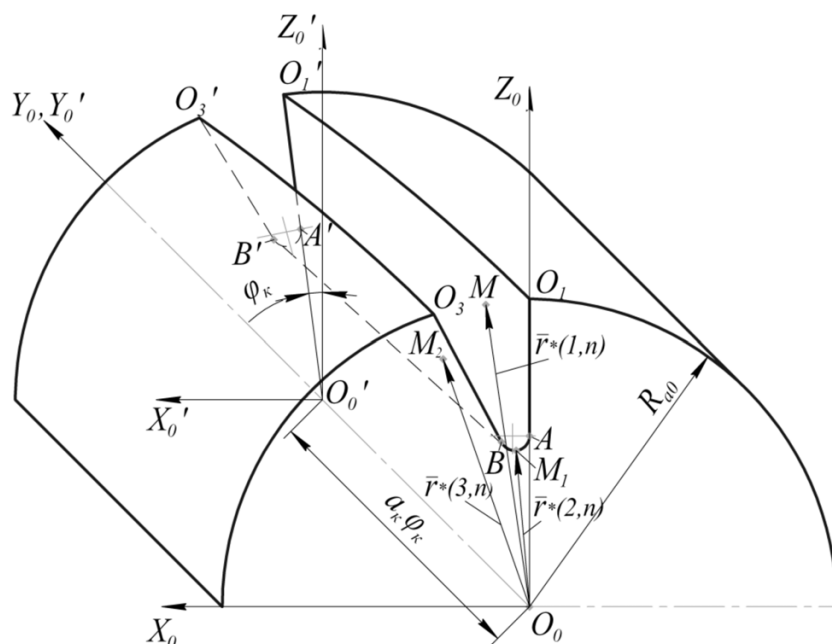


Рис. 2. Образование винтовой поверхности стружечной канавки



По делительному цилиндру фрезы диаметра d_{m0} шаг P_k вычисляется по формуле

$$P_k = \frac{\pi d_{m0}}{\operatorname{tg} \lambda_{m0}},$$

где λ_{m0} – угол наклона канавки к оси на делительном цилиндре.

Максимальное значение угла $\varphi_{k\max}$ определяется зависимостью

$$\varphi_{k\max} = \frac{L_p 2\pi}{P_k},$$

где L_p – длина рабочего участка фрезы.

После перемножения матрицы $[M]$ и вектора $\bar{r}_0(1, n)$ формула (3) принимает вид:

$$\bar{r}(1, n) = \begin{bmatrix} (R_{a0} + z(1, n)) \sin \varphi_k \\ a_k \varphi_k \\ (R_{a0} + z(1, n)) \cos \varphi_k \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Произвольные точки M_1 и M_2 (рис. 2) поверхности основания канавки и задней тыльной поверхности зуба соответственно описываются векторными функциями:

$$\bar{r}(2, n) = [M] \bar{r}_0(2, n); \quad \bar{r}(3, n) = [M] \bar{r}_0(3, n). \quad (6)$$

После подстановки выражений (2) и (4) в (6) и преобразований получаем

$$\bar{r}(2, n) = \begin{bmatrix} \rho_k [\cos \varphi_k + \cos(\varphi_k - \gamma_k)] + C \sin \varphi_k \\ a_k \varphi_k \\ -\rho_k [\sin \varphi_k + \sin(\varphi_k - \gamma_k)] + C \cos \varphi_k \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\bar{r}(3, n) = \begin{bmatrix} [\rho_k + x(3, n)] \cos \varphi_k + \\ -[\rho_k + x(3, n)] \sin \varphi_k - \\ +\rho_k \cos(\varphi_k + \theta_k) + [C + z(3, n)] \sin \varphi_k \\ a_k \varphi_k \\ -\rho_k \sin(\varphi_k + \theta_k) + [C + z(3, n)] \cos \varphi_k \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Векторные функции (5) и (7) описывают винтовые поверхности одной стружечной канавки фрезы. Остальные канавки описываются следующим образом. Номер канавки k изменяется от единицы до числа зубьев фрезы z_0 . Канавки поворачиваются на угол $\xi(k) = (k - 1)\psi$, где

$$\psi = \frac{2\pi}{z_0}.$$

В результате в общем виде векторные функции для каждой стружечной канавки определяются зависимостью

$$\bar{r}^*(i, n) = [M_1] \bar{r}(i, n),$$

где $[M_1]$ – матрица поворота вокруг оси O_0Y_0 против часовой стрелки:

$$[M_1] = \begin{bmatrix} \cos(\xi(k)) & 0 & -\sin(\xi(k)) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\xi(k)) & 0 & \cos(\xi(k)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Окончательно после необходимых преобразований векторные функции, описывающие поверхности всех стружечных канавок червячной фрезы, принимают вид

$$\bar{r}^*(1, n) = \begin{bmatrix} (R_{a0} + z(1, n)) \sin(\varphi_k - \xi(k)) \\ a_k \varphi_k \\ (R_{a0} + z(1, n)) \cos(\varphi_k - \xi(k)) \end{bmatrix};$$

$$\bar{r}^*(2, n) = \begin{bmatrix} \rho_k [\cos(\varphi_k - \xi(k)) + \cos(\varphi_k - \gamma_k - \xi(k))] + \\ a_k \varphi_k \\ -\rho_k [\sin(\varphi_k - \xi(k)) + \sin(\varphi_k - \gamma_k - \xi(k))] + \\ + C \sin(\varphi_k - \xi(k)) \\ + C \cos(\varphi_k - \xi(k)) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\bar{r}^*(3, n) = \begin{bmatrix} [\rho_k + x(3, n)] \cos(\varphi_k - \xi(k)) + \\ -[\rho_k + x(3, n)] \sin(\varphi_k - \xi(k)) - \\ +\rho_k \cos(\varphi_k + \theta_k - \xi(k)) + [C + z(3, n)] \sin(\varphi_k - \xi(k)) \\ a_k \varphi_k \\ -\rho_k \sin(\varphi_k + \theta_k - \xi(k)) + [C + z(3, n)] \cos(\varphi_k - \xi(k)) \end{bmatrix}.$$

Для расчета и построения трехмерной модели стружечной канавки червячной модульной фрезы разработана компьютерная программа с использованием средств объектно-ориентированного языка *Achion script 3*. Блок-схема расчета и построения модели стружечных канавок червячной фрезы приведена на рис. 3. Главное окно компьютерной программы представлено на рис. 4.

Расчет и построение модели стружечных канавок выполнялись по параметрам червячной фрезы 2510-4344, регламентируемым ГОСТ 9324-80. Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Исходные данные имеют значения: $m_0 = 8$ мм; $d_{a0} = 125$ мм; $\alpha_{a0} = 11^\circ$; $\theta_k = 28^\circ$; $\lambda_{m0} = \gamma_{m0} = 4^\circ 26'$; $\gamma_{кбит} = 180^\circ$; $\gamma_{кmax} = 332^\circ$;

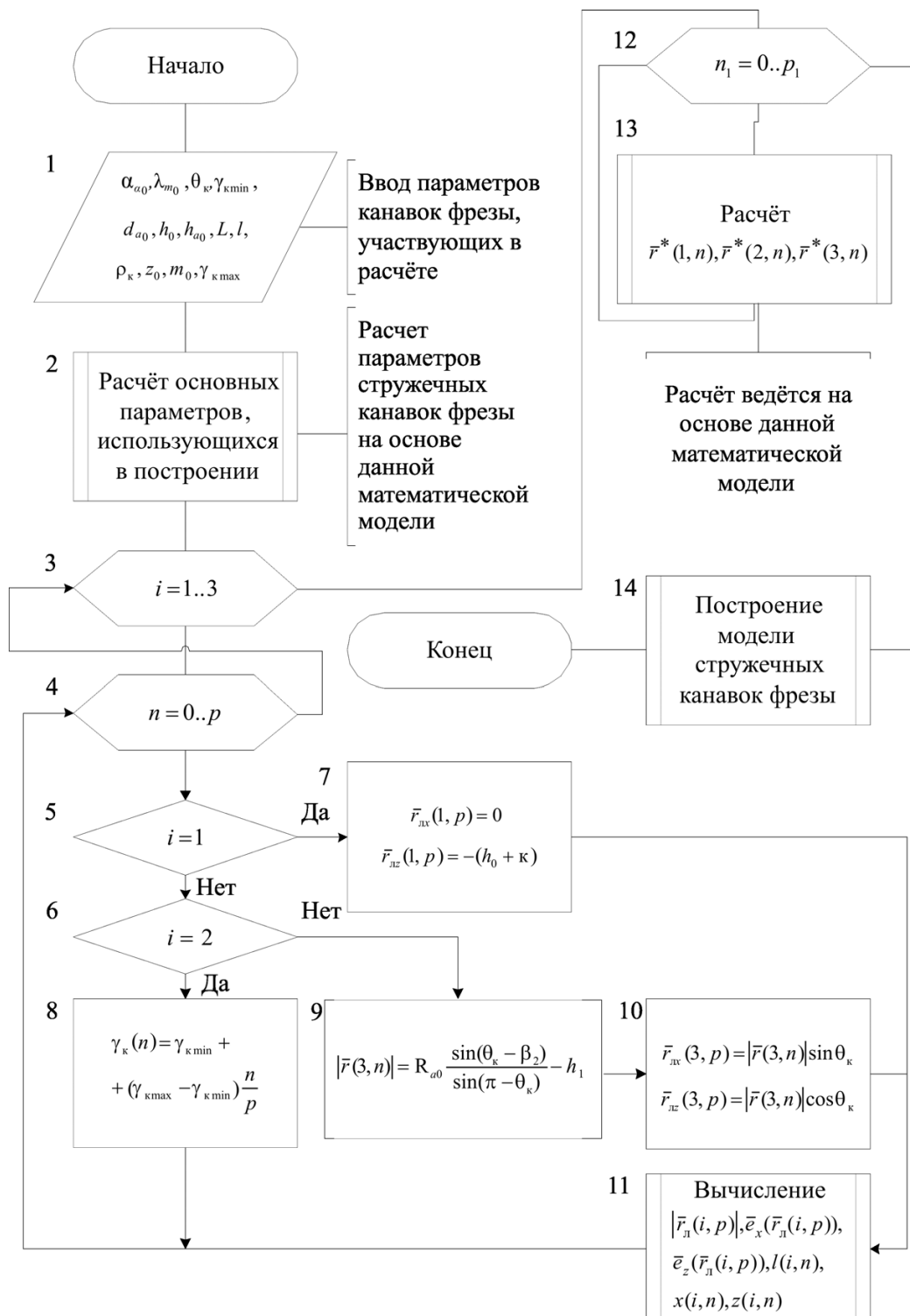


Рис. 3. Блок-схема расчета и построения модели стружечных канавок червячной фрезы

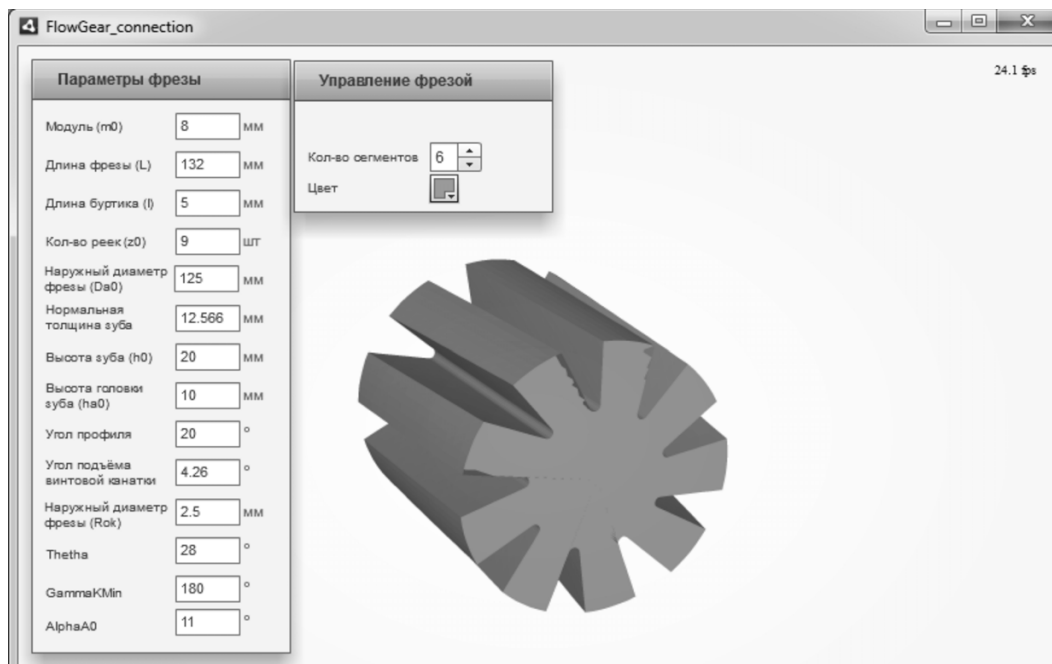


Рис. 4. Главное окно компьютерной модели стружечных канавок червячной фрезы

длина фрезы $L = 132$ мм; длина буртика $l = 5$ мм; $h_0 = 20$ мм; высота головки зуба $h_{a0} = 10$ мм; $z_0 = 9$; $\rho_k = 2,5$ мм.

Разработанная модель имеет существенные отличия от известных 3D моделей стружечных канавок червячной фрезы [6], которые реализуются в графических редакторах с использованием инструментальных средств в виде эскиза и последующим его перемещением и поворотом. Особенность предложенной модели заключается в том, что она является аналитической. С помощью уравнений (8) с высокой точностью вычисляются длина участков профиля, площадь поверхностей и объем стружечной канавки. Совместное решение уравнения передней поверхности канавки и уравнений основного червяка определяет уравнения режущих кромок зубьев, необходимых для разработки аналитической модели червячной модульной фрезы и моделирования процесса резания и формообразования при зубообработке цилиндрических зубчатых колес.

The model of chip groove of the worm module milling cutter

S.P. Androsov

The problems of modeling worm module milling cutter for machining gears are considered. The equations of screw surfaces of chip groove of the cutter expressed by the parametric vector functions are defined. The computer program is developed for the calculation of the model construction of chip groove of the cutter.

Key words: worm module milling cutter, chip groove surface, vector function, modeling.

Список литературы

1. Лапшев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
2. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ: учеб. пособие для вузов / под ред. О.В. Таратынова. – М.: МГИУ, 2006. – 380 с.
3. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
4. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа: справочник / под ред. Г.А. Харламова. – М.: Машиностроение, 2007. – 240 с.
5. Фингер М.Л. Цилиндрические зубчатые колеса. Теория и практика изготовления. – М.: Научная книга, 2005. – 368 с.
6. Тахман С.И., Рохин Л.В., Тюкалов О.Ф. Создание 3D модели процесса зубофрезерования // Вестник Курганского государственного университета. 2010. – № 1. – С. 118–120.