



005016332

На правах рукописи

**СКРЯБИН ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
СБОРНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ С ЭВОЛЬВЕНТНОЙ  
ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**3 МАЙ 2012**

**Курск 2012**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» на кафедре технологии машиностроения

Научный руководитель -

доктор технических наук, доцент  
Феофилов Николай Дмитриевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Степанов Юрий Сергеевич,  
кандидат технических наук, доцент  
Яцун Елена Ивановна

Ведущая организация

ОАО «АК«Туламашзавод»

Защита состоится 28 мая 2012 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.105.09 при ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50-летия Октября, 94

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет».

Автореферат разослан 27 апреля 2012 г.

Ученый секретарь совета, по защите  
докторских и кандидатских диссертаций  
Д 212.105.09  
кандидат технических наук, доцент



Куц Вадим Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Зубофрезерование является наиболее производительным способом зубообработки колес в диапазоне модулей от 0,1 до 40 мм. Для цилиндрических колес оно обеспечивает точность в пределах 5-9-ой степени по ГОСТ 1643-81 и применяется на черновых и чистовых операциях обработки венца.

При массовом изготовлении зубчатых колес, когда количество инструментов на годовую программу запуска является значительным, применение специальных червячных фрез с модифицированным профилем и удлиненных является экономически необходимым. В серийном производстве колес средних и крупных модулей с большим количеством зубьев, подвергаемых термообработке и последующему чистовому зубофрезерованию, долблению или шлифованию решение задачи обеспечения минимума трудоемкости и экономичности зубообработки требует дополнительной технологической проработки.

Так как добиться значительного улучшения характеристик быстрорежущих сталей трудно, а резервы повышения стойкости инструментов за счет применения износостойких пленочных покрытий достигли своего предела, дальнейшее повышение эффективности зубообработки обеспечивается совершенствованием конструктивных параметров и технологии изготовления фрез, а также путем расширения технологических возможностей зубофрезерных станков за счет программного управления циклом обработки.

Несмотря на значительное количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных проектированию червячных фрез и инструментальных наладок, нерешенных вопросов, особенно для сборных модифицированных инструментов, достаточно много, как в теории проектирования, профилирования, так и в рациональной эксплуатации инструментов.

В связи с этим обоснование конструкторско-технологических решений, повышающих эксплуатационные возможности червячных фрез является актуальной научной задачей.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами: № 06-05 «Прогрессивная технология механической обработки и сборки» и № 15-10 «Инновационно-перспективные технологии механической обработки и сборки».

**Объект исследования.** Процесс проектирования сборных червячных фрез на основе геометрической теории формирования поверхностей режущими инструментами.

**Предмет исследования.** Метод расчета геометрических размеров сборных червячных фрез и их наладки на станке на основе аналитического и пространственного моделирования на примере фрезы с эвольвентной производящей поверхностью.

**Цель работы** заключается в повышении точностных и эксплуатационных характеристик сборных червячных фрез за счет использования эвольвентной производящей поверхности, рациональных геометрических параметров фрезы и оптимального сочетания передвижек и подналадок фрезы в рабочей зоне станка.

**Методы исследования.** Теоретические исследования выполнены с использованием основных положений теории зубчатых зацеплений, геометрической теории формообразования поверхностей резанием, математической статистики. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных и производственных условиях на действующем технологическом оборудовании и с последующей обработкой результатов на ЭВМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) аналитическое обоснование и практическую реализацию взаимного расположения левых и правых профилей производящих поверхностей инструментов на операции зубофрезерования и ее технологической подготовки, обеспечивающих единство конструкторских и технологических подсистем;

2) результаты аналитического и графического моделирования эвольвентных винтовых производящих и технологических поверхностей сборных червячных фрез, позволяющие учесть влияние переточек фрезы на ее геометрическую точность;

3) рациональные геометрические параметры конструкции фрезы, полученные на основе учета условий загрузки вершинных и боковых режущих кромок фрезы по толщинам срезаемых слоев в произвольном диапазоне чисел зубьев нарезаемых колес и продольных подач;

4) результаты экспериментальных исследований влияния параметров сборных червячных фрез на точность обработанных колес.

**Научная новизна** работы заключается в решении задачи проектирования сборной червячной фрезы с эвольвентной производящей поверхностью и инструментальной наладки на основе комплекса аналитических и графических моделей, позволяющих:

1) установить зависимость угловой ширины впадины винтовой поверхности на цилиндре произвольного радиуса от координат предельных точек эвольвенты и исключить интерференцию боковых эвольвентных поверхностей;

2) учесть влияние жесткости инструментальной оправки и зоны контакта фрезы с обрабатываемым колесом на геометрические параметры базирующих поверхностей фрезы и длину режущей части при зубофрезеровании на экономической скорости резания и при оптимальном сочетании передвижек и подналадок фрезы в рабочей зоне станка;

3) определить диапазон чисел зубьев колес для фрезы с модификацией производящего контура путем нанесения на режущие зубья чередующихся стружкоразделительных фасок или чередующегося уменьшения толщины зубьев.

**Практическая ценность** работы заключается:

1) в рекомендациях по проектированию инструментальных наладок и сборных червячных фрез и рациональному их использованию на зубофрезерных станках с электромеханической системой управления и с ЧПУ;

2) в разработке комплекса вопросов по исследованию винтовых поверхностей: производящей, технологической и рабочей - инструментальной;

3) в использовании результатов исследований при проектировании инструментальных наладок зубофрезерных станков в учебном процессе.

**Область исследований.** Содержание диссертации соответствует п. 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки» паспорта специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований, в обработке результатов и формулировке выводов. Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско - преподавательского состава ТулГУ (2009-2012 гг.), ежегодных научно-технических семинарах Тульского государственного технического колледжа, на Международной научно-технической конференции «АПИР-16» (г. Тула, 2011 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 5 научно-технических статей. Из них три в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и списка использованных источников из 83 наименований. Общий объем диссертации составляет 145 страниц, включая 50 рисунков и 16 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность решенной в диссертации задачи, сформулирована цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна, кратко раскрыто содержание глав.

**В первой главе** проведен анализ конструкций сборных червячных фрез, рассмотрены способы их профилирования инструментами, работающими по методу огибания. Установлено, что сборные червячные фрезы обладают более высокой режущей способностью по сравнению с монолитными фрезами и могут изготавливаться в два и более раза длиннее по сравнению с последними за счет замены зытылованных по спирали задних поверхностей на цилиндрические винтовые поверхности. Наиболее значимыми для сборных червячных фрез являются работы Г. Г. Иноземцева.

Необходимым моментом проектирования червячных фрез является расчет производящей винтовой поверхности. Существенные научные результаты получены Борискиным О. И., Лашневым С. И., Литвиным Ф. Л., Семенченко Д. И., Феофиловым Н. Д., Фрайфельдом И. А., Цвисом Ю. В. и другими. При этом установлена целесообразность проектирования производящих поверхностей сборных червячных фрез на основе эвольвентного производящего червяка, обеспечивающая минимум органических погрешностей фрезы.

В станочном зацеплении режущие зубья, расположенные вдоль витка червячной фрезы, в соответствии с кинематикой процесса обкатки срезают бо-

ковыми и вершинными кромками слои различной толщины. Большая часть слоев имеет Г и П – образные формы.

Известные варианты улучшения схемы резания разработаны и применяются в отечественном машиностроении для монолитных червячных фрез в крупносерийном и массовом производствах и сводятся к изменению формы режущих кромок по отношению к исходному производящему контуру. Наиболее распространены и эффективны схемы резания с попеременно нагруженными боковыми сторонами зубьев, прогрессивная и со стружкоразделительными фасками чередующимися у четных и нечетных зубьев фрезы вдоль винтовой линии. В отечественной зубообработке для фрез с поворотными рейками эти схемы не используются по двум причинам:

- 1) незначительна номенклатура сборных фрез и отсутствие их серийного производства;
- 2) отсутствие технологических решений для отдельного шлифования профилей четных и нечетных реек.

В связи с этим поставлена задача проектирования эвольвентной винтовой поверхности сборного инструмента, обеспечивающей расположение на ней необходимого количества режущих элементов с рациональными геометрическими параметрами при выполнении условий экономичности процесса зубофрезерования или максимума производительности станка.

**Во второй** главе проведен анализ производящих и технологических винтовых поверхностей сборных червячных фрез с поворотными зубчатыми рейками, а также изучены вопросы анализа срезаемых слоев в зависимости от конструкции фрезы и параметров процесса резания.

При червячном зубофрезеровании скорости вращения фрезы и заготовки кинематически связаны, а скорость продольной подачи изменяется независимо от них в диапазоне, определяемом продольной шероховатостью боковой зубчатой поверхности. В станочном зацеплении фреза и обрабатываемая зубчатая деталь образуют пару винтовых колес со скрещивающимися осями. Расположение инструмента и заготовки определяется в пяти координатных системах: неподвижной системе станка; системе координат заготовки; промежуточной системе, повернутой на угол подъема винтовой линии на среднем диаметре фрезы; системе координат фрезы; системе координат режущего зуба.

Взаимосвязь параметров производящей поверхности, производящих контура червячной фрезы и резца, для предварительного точения винтовой технологической поверхности, а также шлифовального круга обеспечиваются исходным положением левой  $L$  и правой  $R$  сторон контуров зубчатого колеса и инструментов в станочном зацеплении (рисунок 1).

Исходные данные необходимые для построения торцевого сечения производящей поверхности фрезы включают: модуль  $m$ , диаметр вершин зубьев  $d_{a0}$ , число заходов  $z_0$ , угол профиля исходного контура  $\alpha = \alpha_n$ .

Геометрический расчет винтовой производящей поверхности сборной червячной фрезы учитывает:

- 1) размещение в рабочем и технологическом корпусах комплекта реек;

2) размеры посадочного отверстия в корпусе фрезы и шпоночного паза должны соответствующие модулю фрезы и модели станка;

3) размещение шлифовального круга между рейками для переточки фрезы по передней поверхности.

Эвольвентные винтовые поверхности формируются при винтовом движении эвольвентных торцовых профилей  $L$  и  $R$  по основному цилиндру с винтовым параметром, определяемом осевым ходом  $p_{z\alpha 0}$  за  $2\pi$  (рисунок 2). Радиус основного цилиндра  $r_{b0} = r_0 (\operatorname{tg} \gamma_{m0}) / \operatorname{tg} \gamma_{b0}$ , где  $\gamma_{m0}$  - угол подъема витка червяка на среднем цилиндре;  $\gamma_{b0}$  - основной угол подъема витка. Боковые стороны винтовой канавки (рисунок 3) вдоль оси винтовой поверхности смещены на делительную окружности на угловую ширину впадины  $\psi_e = 2\pi(p_{x0} - s_{x0}) / p_{x0}$ , где  $s_{x0}$  - делительная толщина витка эвольвентной винтовой поверхности.

В торцовом сечении общее уравнение эвольвенты имеет вид

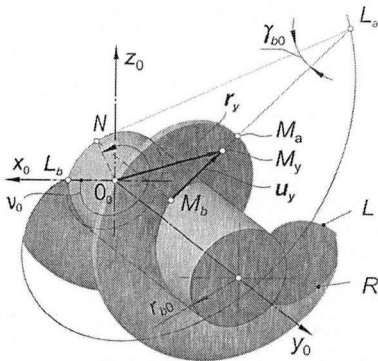


Рисунок 2 – Геометрическая модель винтовой поверхности

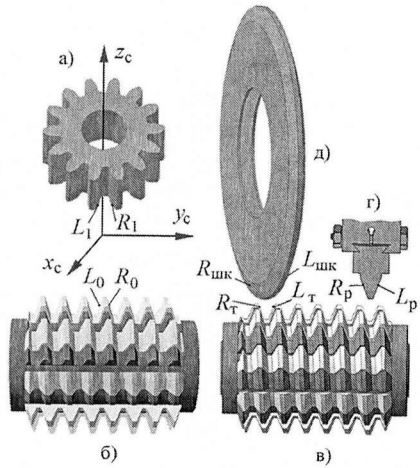


Рисунок 1 – Расположение левых и правых сторон профилей элементов станочных наладок по отношению к базовой системе координат:

а - зубчатое колесо; б - червячная фреза; в - технологический червяк; г - токарный резец для винтовой технологической поверхности фрезы; д - шлифовальный круг для винтовой технологической поверхности фрезы

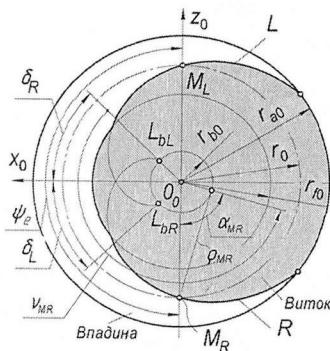


Рисунок 3 – Расположение предельных точек эвольвент

$$\left. \begin{aligned} x_{RLy_0} &= r_{b0} [\cos(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}) + \nu_{RLy_0} \sin(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL})], \\ z_{RLy_0} &= r_{b0} [\sin(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}) - \nu_{RLy_0} \cos(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL})], \end{aligned} \right\} (1)$$

где знак «-» - для точек правой эвольвенты, знак «+» - для точек левой эвольвенты;  $\delta_{RL}$  - угол, определяющий положение предельных точек  $L_{bR}$  и  $L_{bL}$ .

Кроме эвольвенты для задания винтовой производящей поверхности использован отрезок образующей прямой, ограниченный точками пересечения с цилиндрами вершин и впадин. При фиксации угла  $\nu_{y0}$  и изменении переменной  $u_{y0}$  точка винтовой поверхности перемещается по прямой линии в касательной плоскости к основному цилиндру. При изменении  $\nu_{y0}$  и фиксации  $u_{y0}$ , точка совершает движение по винтовой линии. Пересечение двух линий определяет произвольную точку  $M_y$  между точками  $M_b$  и  $M_a$  на винтовой поверхности.

Уравнения правой и левой сторон эвольвентной винтовой производящей поверхности имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x_{RLy_0} &= r_{b0} \cos(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}) + u_{RLy_0} \cos \gamma_{b0} \sin(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}), \\ y_{RLy_0} &= P_{zx0} (\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}) - u_{RLy_0} \sin \gamma_{b0}, \\ z_{RLy_0} &= r_{b0} \sin(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}) - u_{RLy_0} \cos \gamma_{b0} \cos(\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}). \end{aligned} \right\} (2)$$

Для торцового сечения эвольвентной винтовой поверхности, т. е. при  $y_0 = 0$

$$P_{zx0} (\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}) - u_{RLy_0} \sin \gamma_{b0} = 0,$$

$$u_{RLy_0} = \frac{r_{b0}}{\cos \gamma_{b0}} (\nu_{RLy_0} + \delta_{RL}), \quad r_{y0} = r_{b0} \sqrt{1 - (\nu_{RLy_0} + \delta_{RL})^2}.$$

Уравнения осевого профиля получены из уравнения (2) при  $z_{x0} = 0$ . Тогда для правой винтовой поверхности:

$$x_{Rxy_0} = \frac{r_{b0}}{\cos(\nu_{Ry_0} - \delta_R)}, \quad y_{Rxy_0} = -P_{zx0} \cdot \text{inv}(\nu_{Ry_0} - \delta_R), \quad u_{Ry_0} = \frac{r_{b0} \cdot \text{tg}(\nu_{Ry_0} - \delta_R)}{\cos \gamma_{b0}},$$

для левой винтовой поверхности

$$x_{Lxy_0} = \frac{r_{b0}}{\cos(\delta_L - \nu_{Ly_0})}, \quad y_{Lxy_0} = -P_{zx0} \cdot \text{inv}(\delta_L - \nu_{Ly_0}), \quad u_{Ly_0} = \frac{r_{b0} \cdot \text{tg}(\delta_L - \nu_{Ly_0})}{\cos \gamma_{b0}}.$$

Винтовая технологическая поверхность определяется в последовательности:

- 1) задание переднего угла  $\gamma_{a0}$  на диаметре цилиндра вершин зубьев;
- 2) задание количества расчетных точек на правой и левой сторонах осевого профиля производящей винтовой поверхности;
- 3) выбор конструкции фрезы: с единым технологическим и рабочим корпусом (рисунок 4, а) или с отдельными корпусами (рисунок 4, б);

4) пересчет координаты точек осевого профиля производящей винтовой поверхности в координаты точек профиля в передней плоскости режущего зуба;

5) определение профиля зуба в передней плоскости в системе координат технологической винтовой поверхности;

6) перемещение профиля передней поверхности с винтовым параметром производящей винтовой поверхности в системе координат технологической поверхности.

Положение реек в корпусе фрезы зависит от смещений  $a_x$  и  $a_z$  осей  $O_0y_0$  и  $O_Ty_T$  производящей и технологической винтовых поверхностей, т. е. от расположения координатных систем  $O_0x_0y_0z_0$  и  $O_Tx_Ty_Tz_T$ .

Для фрез с единым технологическим и рабочим корпусом (см. рисунок 4, а)

$$a_x = -2c \cdot \sin \mu, \quad a_z = -2c \cdot \cos \mu, \quad (3)$$

где  $c$  - смещение оси рассчитывается численно из уравнения

$$2c \cdot \cos\{\arcsin[(b_0 + c - 0,5b_{oc})/r_{a0} - \alpha_a]\} - r_{a0} \cdot \sin \alpha_a = 0$$

$b_0$  - ширина головки рейки;  $b_{oc}$  - ширина основания рейки.

Из (3) следует, что с увеличением заднего угла  $\alpha_{a0}$  на радиусе вершин зубьев производящей поверхности увеличивается и смещение  $c$  оси паза с оси корпуса.

Для фрез с отдельными корпусами (см. рисунок 4, б)

$a_x = r_{a0} - r_{aT} \cos \alpha_{a0}$ ,  $a_z = r_{aT} \sin \alpha_{a0}$ , где  $r_{aT} = r_{a0} / (\cos \alpha_{a0} + \operatorname{tg} \beta_T \sin \alpha_{a0})$  - рассчитывается по методике Иноземцева Г. Г из условия наименьшего искажения профиля при переточках;  $\beta_T$  определяется углом стачивания рейки  $\psi_{c0} = b_\alpha (j_{cm} + 1) / r_{a0}$ ;  $b_\alpha$  - величина стачивания задней поверхности за одну переточку, превышающая величину износа этой поверхности;  $j_{cm}$  - количество смен инструмента на переточки.

Влияние переточек на точность фрезы рассмотрено на технологической винтовой поверхности, но в системе координат производящего червяка.

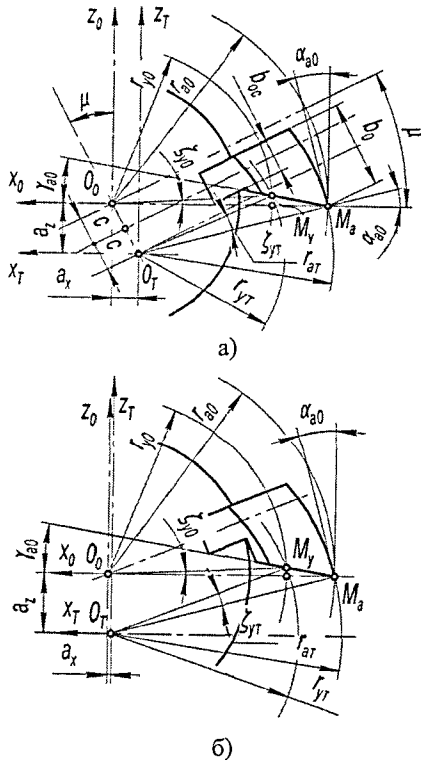


Рисунок 4 - Конструкции фрез:  
а - с единым технологическим и рабочим корпусом; б - с отдельными корпусами

Координаты точек производящей поверхности с учетом переднего угла в системе координат фрезы

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_{y\gamma_0} \cos \zeta_{y\Gamma} + z_{y\gamma_0} \sin \zeta_{y\Gamma} + a_x \cos \zeta_{y\Gamma} + a_y \cos \zeta_{y\Gamma} - a_x; \\ y_0 &= y_{y\gamma_0} \pm 0,5 p_{x_0} \zeta_{y\Gamma} / \pi; \\ z_0 &= -x_{y\gamma_0} \sin \zeta_{y\Gamma} + z_{y\gamma_0} \cos \zeta_{y\Gamma} - a_x \sin \zeta_{y\Gamma} + a_z \cos \zeta_{y\Gamma} - a_z. \end{aligned} \right\}$$

При сечении этой поверхности плоскостью  $z_0 = x_0 \operatorname{tg} \gamma_{a0} + r_{a0} \operatorname{tg} \gamma_{a0}$ , в которой перемещается шлифовальный круг с угловым шагом  $\Delta \tau_0 j$  рассчитаны погрешности профиля  $f_n$  винтовой поверхности червячной фрезы с учетом переднего угла  $\gamma_{a0}$  после  $j$  переточек как расстояние, измеренное по нормальям к участкам исходного профиля.



Рисунок 5 - Влияние переточек червячной фрезы с  $m = 4$  мм,  $\alpha_{n0} = 20^\circ$  на точность профиля режущих зубьев при профилировании фрезы в технологическом корпусе

соответствия переточенной фрезы классу точности по ГОСТ 9324-80Е.

Повышение стойкости червячных фрез между переточками в многоменклатурном мелкосерийном производстве зубчатых колес, а иногда и обеспечение стойкости фрезы для обработки одного многозубого широковенцового колеса предлагается обеспечить за счет сочетания улучшения схемы срезания стружек и рационального использования фрезы в зоне резания путем ее передвижек и подналадок.

Исходными данными для определения эффективной конструкции режущей части фрезы являются:

Выведенные зависимости использованы для анализа погрешностей осевого профиля фрезы (рисунок 5) с параметрами: радиус вершин зубьев  $r_{a0} = 57$  мм, модуль  $m = 4$  мм, число заходов  $z_0 = 1 \dots 4$ , передний угол  $\gamma_{a0} = 5^\circ$ , исходная ширина рейки  $b_0 = 22$  мм. Суммарная величина стачивания  $b_{a\Sigma} = 12$  мм, количество переточек  $j_{cm} = 12$ , припуск на одну переточку  $\Delta b_{a\Sigma} = 1,2$  мм.

Расчеты показали, что фрезы, профилирование которых производится в специальном технологическом корпусе, более чем в пять раз точнее фрез, профилирование которых производится в рабочем корпусе, но в технологическом положении. На рисунке приведена шкала

1) номенклатура зубчатых колес по модулям, числам зубьев и размерам запускаемой в производство партии;

2) максимальная толщина срезаемого слоя вершинной и боковыми режущими кромками в выбранном диапазоне чисел зубьев колес и продольных подач.

Толщина срезаемого слоя – длина нормали к поверхности резания, которая проведена через рассматриваемую точку режущей кромки и ограничена сечением срезаемого слоя.

В процессе зубофрезерования на вершинные режущие кромки инструмента приходится наибольшая нагрузка, определяющая назначение основных параметров этой технологической операции.

Расчет толщины срезаемого слоя проводился по методике Феофилова Н. Д. в системе координат заготовки  $O_1x_1y_1z_1$  (рисунок 6). При этом использована зависимость

$$a_{\max} = 0,445m^{0,7} z_1^{-0,48} (90^\circ + \beta_1)^{0,56} d_{a0}^{-0,2} z_0^{0,91} z_{10}^{-0,93} h_{j0}^*{}^{0,27} s_{z1}{}^{0,49}.$$

Из рисунка 6 видно, что максимальная толщина срезаемого слоя образуется вначале вырезания последней впадины зубчатого колеса. Затем процесс резания стабилизируется по параметрам срезаемого слоя. Червячная фреза в серийном производстве используется для колес с различным числом зубьев на различных продольных подачах. Установлено, что максимальная толщина среза наблюдается у колес с меньшим числом зубьев из диапазона чисел зубьев на которое проектируется фреза при фрезеровании с максимально возможными из условия экономической стойкости подачами. Если схема резания спроектирована с возможностью разделения срезаемого слоя на части для минимального  $z_1$  и максимальной  $s_{z1}$ , то при нарезании колес с большим числом зубьев на меньших подачах деление срезаемого слоя на части будет обеспечено.

Расчеты и построения (см. рисунок 6, г), необходимые для модификации профиля производящего контура в зависимости от параметров операции зубофрезерования, выполняются в последовательности:

- 1) рассчитать величины  $\varphi_{a0}$ ,  $\Sigma a_{i1}$ ,  $\varphi_{i1}$ ,  $a'$ ,  $a_{\max}$ ,  $a_{\max t}$ ;
- 2) провести линию  $t-t$  (см. рисунок 2.16, в), взять на ней точку  $O_{i3}$ , провести через нее отрезок  $O_{i3}A_{i3} = a_{\max t}$  перпендикулярный  $t-t$ ;
- 3) через точку  $A_{i3}$  провести линию  $t_1-t_1$  под углом  $\varphi_{i1}$  к линии  $t-t$ ;
- 4) получить точку  $O'_{i3+1}$ ;
- 5) рассчитать торцовый угол профиля, толщину производящего контура на окружности вершин зубьев по формуле  $s_{a0} = 0,5m[\pi - 4(h_a^* + c^*) \operatorname{tg} \alpha_0]$  и построить два последовательно работающих режущих контура;
- 6) провести сопряжение боковых режущих кромок с вершинной режущей кромкой радиусом  $\rho_{a0} = 0,38m$ ;
- 7) определить расположение касательных к округленным участкам производящего контура (см. рисунок 6, г).

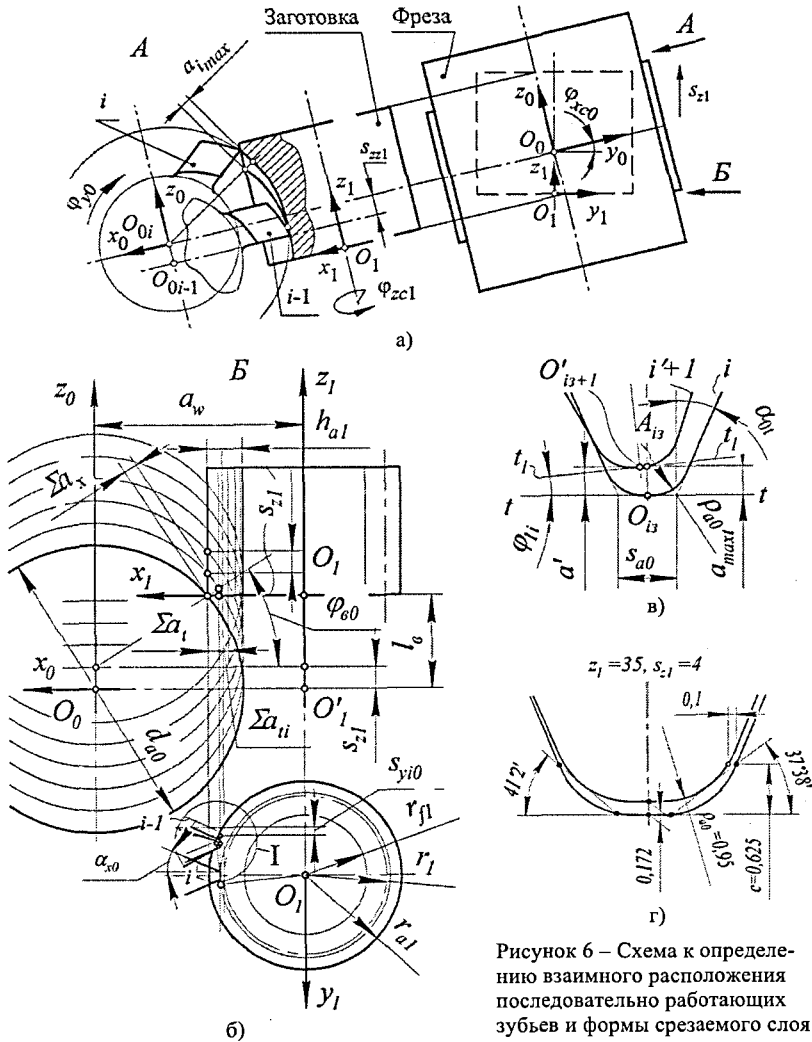


Рисунок 6 – Схема к определению взаимного расположения последовательно работающих зубьев и формы срезаемого слоя

Установлено, что для колес с малым числом зубьев увеличение подачи уменьшает угол наклона фаски, которая начинает пересекать ось симметрии режущего контура и срезает вершинную режущую кромку, необходимую для базирования рейки при шлифовании ее основания после шлифования винтовой поверхности технологического червяка. Основным условием модификации профиля является расположение фаски в пределах радиального зазора  $c$ .

Число зубьев, при котором сохраняется минимальная величина вершинной режущей кромки  $s_{a0} = 0,31 \text{ мм}$  у левой и правой сторон профиля,  $z1 = 21$  при модуле равном  $2,5 \text{ мм.}$ , а углы фасок соответственно  $\alpha_{\phi L} = 31^{\circ}51'$ ,  $\alpha_{\phi R} = 36^{\circ}23'$ . Эти величины и определяют параметры модификации профиля с помощью фасок с числа зубьев нарезаемых колес более 21.

Использование зубьев с уменьшенной толщиной, т. е. зауженных возможно с 15-ти зубьев у колеса, при величине заужения  $\Delta_{s0} = 0,237 \text{ мм}$  поочередно у четных и нечетных зубьев фрезы.

**В третьей главе** исследованы вопросы влияния параметров режима резания и жесткости инструментальной наладки на основные конструктивные параметры инструмента. Рассмотрено влияние числа зубьев колеса и параметров фрезы на ее исходное положение относительно средней плоскости зубофрезерного станка.

Основными параметрами, определяющими конструкцию инструментальной наладки являются: диаметр и длина червячной фрезы, диаметр посадочного отверстия в корпусе фрезы и суммарный путь передвижек. Они являются исходными данными для назначения режима резания.

Для диаметра оправки выведена зависимость

$$d_{\text{опр}} = \sqrt[4]{P_{xz}(L - l_0)^3 / (0,0006LE\pi)}, \quad (4)$$

где  $L$  – расстояние между опорами инструментальной оправки.

Зависимость получена при условии, что максимальная величина прогиба для валов и шпинделей металлорежущих станков  $f_{\text{max}} \leq [f] = 0,0002L$ .

С учетом возможного увеличения длины фрезы при анализе двух фрез различной длины  $l_{01}$  и  $l_{02}$  и сохранении жесткости инструментальной оправки, диаметр оправки более длинной фрезы рассчитывается по формуле

$$d_{\text{опр}2} = d_{\text{опр}1} [(L_{02} - l_{02}) / (L_{01} - l_{01})]^{0,75}, \quad (5)$$

где  $L_{01}$  и  $L_{02}$  - расстояние между опорами оправки

Эта зависимость выведена при условии приравнивания двух прогибов оправок с одинаковой жесткостью, но при разных длинах установленных фрез, применяемых в инструментальной наладке.

Из формулы (4) видно, что при увеличении длины фрезы уменьшается диаметр оправки, а следовательно, и наружный диаметр фрезы, при исходной жесткости системы. Это позволяет снизить машинное время обработки.

Использование длинных фрез допускает большое количество передвижек и оказывает влияние на производительность станка и экономичность операции зубофрезерования. При этом длина фрезы определяется количеством передвижек  $j_n$  и величиной единичной передвижки  $l_{jn}$ , шириной буртиков  $l_b$ , исходным расстоянием  $l_{ny}$  и зоной передвижки (рисунок 7).



эффективность рационального сочетания передвижек и подналадок фрезы на производительность станка и стоимость операции зубофрезерования.

При зубофрезеровании цикл подналадок и передвижек фрезы реализуется в двух вариантах:

а) фреза, установленная на станок, проходит все подналадки до достижения допустимого износа задних поверхностей, а затем производится передвижка на не изношенный участок рабочей поверхности и так до смены фрезы (рисунк 8, а);

б) после износа участка фрезы, находящегося в работе, в пределах, соответствующих допуску на контролируемый параметр зубчатого венца, производят передвижку фрезы на новый ее участок и повторяют передвижки вдоль всей длины рабочей части фрезы. Затем осуществляется подналадка и очередная серия передвижек. Такой цикл передвижек и подналадок производится до достижения фрезой допустимого износа (см. рисунок 8, б);

Скорость резания  $v_q$  оптимальная с точки зрения получения минимума штучно-калькуляционного времени, зависящего от режима резания для вариантов зубофрезерования.

$$v_{qa} = \frac{C_v k_v m_1^{m_1} (j_{\Pi} + 1)^{m_1}}{(1 - m_1)^{m_1} s_0^{j_{\Pi}} m^{x_{\Pi}} [T_{\Pi} j_{\Pi} (j_{\Pi} + 1) + T_{\Pi} j_{\Pi} + T_{\text{СМ}}]^{m_1} k_b^{m_1}} \text{ м/мин,}$$

$$v_{qb} = \frac{C_v k_v m_1^{m_1} (j_{\Pi} + 1)^{m_1}}{(1 - m_1)^{m_1} s_0^{j_{\Pi}} m^{x_{\Pi}} [T_{\Pi} j_{\Pi} (j_{\Pi} + 1) + T_{\Pi} j_{\Pi} + T_{\text{СМ}}]^{m_1} k_b^{m_1}} \text{ м/мин.}$$

По оптимальной скорости резания можно рассчитать машинное время, время обслуживания инструмента и станка и долю штучно-калькуляционного времени, которые зависят от режима резания.

Скорость резания  $v_3$ , оптимальная с точки зрения минимума себестоимости операции

$$v_3 = \frac{C_v k_v}{s_0^{j_{\Pi}} m^{x_{\Pi}}} \left[ \frac{C_M (j_{\Pi} + 1) (j_{\text{СМ}} + 1) m_1}{(T_{\text{обс.р}} C_M + C_{\Pi}) (1 - m_1) k_b} \right]^{m_1}$$

где  $T_{\text{обс.р}}$  в зависимости от выбранного варианта зубофрезерования.

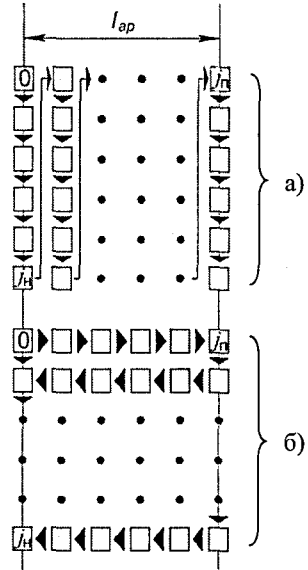


Рисунок 8 - Варианты зубофрезерования:

а - серия подналадок фрезы с ее последующей передвижкой; б - серия передвижек фрезы с ее последующей подналадкой

Из приведенных зависимостей видно, что производительность станка и стоимость выполнения операции зубофрезерования непосредственно связаны с конструкцией инструмента, его наладкой на станке и режимом эксплуатации.

Расчеты проведены при скорости резания оптимальной как с точки зрения производительности станка, так и себестоимости выполнения операции.

Исходные данные: модуль нарезаемых колес – 2 мм и 4 мм; число зубьев для каждого модуля – 20 и 50; направление линии зубьев – прямое; угол профиля исходного контура – 20 град.; материал колес – сталь 12ХНЗА с НВ 217; ширина зубчатых венцов – 30 мм.

Параметры червячных фрез соответственно для модулей 2 мм и 4 мм: диаметр вершин зубьев – 92 мм и 120 мм; длина фрез – 220 мм; длина буртиков – 12 мм; длина зоны передвижек – 170 мм; число заходов – 3; материал режущей части – Р6М5К5; направление стружечных канавок – прямолинейное; на правление винтовой линии – правое; упрочняющее покрытие – нитрид титана; фреза с модификацией профиля зубьев за счет попеременно чередующихся фасок на уголках зубьев, переточенная. Экономические параметры: затраты предприятия, связанные с работой станка и станочника, за вычетом затрат на эксплуатацию режущего инструмента  $C_m = 3,5$  руб/мин; стоимость червячных фрез с модулем 2 мм и 4 мм соответственно – 14000 руб. и 16000 руб.; затраты на одну переточку – 360 руб.; стоимость изношенной фрезы – 150 руб. Коэффициент случайной убыли инструментов – 1,05.

Технологические параметры операции: количество зубчатых колес в стопке – 2; число рабочих ходов фрез – 1; подача – попутная – 3 мм/об.; стойкость фрезы до переточки – 480 мин; обработка – черновая под шлифование; глубина резания – 2,25 мм; вспомогательное время на операцию – 0,64 мин; время обслуживания, не зависящее от режима резания – 0,17 мин; подготовительно – заключительное время на партию – 42,5 мин; время на одну подналадку – 0,167 мин; время на смену фрезы – 14 мин; скорость передвижки 12 мм/мин; размер партии – 200 штук; зубофрезерный станок модели LC 502 (Либхер, ФРГ).

Для скорости резания при обработке стали 12ХНЗА сборными червячными фрезами с поворотными рейками получена зависимость

$$v = \frac{361k_v}{T^{0,41} s_0^{0,5} m^{0,1} z_0^{0,2}},$$

где  $k_v = k_1 k_2 k_3 k_4$ ;  $k_1$  – учитывает марку быстрорежущей стали;  $k_2$  – учитывает модификацию производящего контура;  $k_3$  – учитывает применение упрочняющего покрытия режущей части рейки;  $k_4$  – учитывает радиальное биение режущих реек после заточки (таблица 1).

Расчеты показали, что высокопроизводительная обработка – неэффективна, так как технологическая стоимость детали возрастает в четыре раза из-за резко увеличивающихся затрат на инструмент, объясняющихся его низкой размерной стойкостью при высокой скорости резания. Это приводит к необходимости сокращения времени работы станка между подналадками и съему фрезы на переточки. Большой эффект достигается при обработке колес с большим мо-

дулем и большим числом зубьев. Это объясняется более равномерным изнашиванием фрезы на деталях с большим количеством зубьев, большей зоной контакта фрезы и нарезаемого колеса, чем у малозубых колес.

Таблица 1

Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от:

а) марки быстрорежущей стали – $k_1$			
P18	P6M5	P6M5K5	P9M4K8
1,1	1,0	1,2	1,3
б) модификации производящего контура – $k_2$ (см. рисунок 1.18)			
стандартный	б	а	и
1,0	1,2	1,3	1,3
в) упрочняющего покрытия (нитрида титана) – $k_3$			
без покрытия	с покрытием - новая	с покрытием - переточенная по передней поверхности	
1	1,4	1,2	
г) радиального биения режущих реек после заточки – $k_4 = f_{ra0}^{-0,05}$			

В ходе внедрения фрез обработана и проверена партия зубчатых колес в количестве 250 штук коробки привода масляного насоса дизельного двигателя. Фрезерование осуществлялось однозаходной фрезой (рисунок 9) с диаметром 92 мм, длиной 125 мм с двенадцатью режущими рейками из быстрорежущей стали P6M5K5 на станке модели 53A30 на попутной продольной подаче 2,5 мм/об. заготовки со скоростью резания 48 м/мин и охлаждением маслом «индустриальное-20». Точность фрезы соответствовала классу А. Пакет заготовок состоял из трех штук.

Цель исследования состояла в изучении влияния параметров фрезы на точность обработанных колес, а также в определении границ применения фрез.

Комплекс контроля включал:

а) по нормам кинематической точности - колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_{ir}''$  и колебание длины обшей нормали  $F_{vwr}$ ;

б) по норме плавности – колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_{ir}''$  и погрешность профиля  $f_{fr}$ .

Контроль указанных норм точности производился после зубофрезерования, а затем после шлифования. Шлифование осуществлялось червячным абразивным кругом.

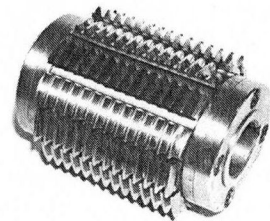


Рисунок 9 - Сборная червячная фреза

Выявление теоретического закона распределения определило вероятность получения значений исследуемых параметров за пределами полей допусков этих параметров. В таблице 2 приведены максимальные значения величин  $F_{vwr}$ ,  $F_{ir}''$ ,  $f_{ir}''$  и  $f_{fr}$  после зубофрезерования червячной фрезой с поворотными рейками и после шлифования, найденные из принятых условий, а также вероятность получения годных деталей  $P(\delta_{x_i}) \cdot 100\%$  по каждому из исследуемых параметров точности. Под величиной  $P(\delta_{x_i})$  понимается вероятность получения параметра точности меньшего, чем верхняя граница допуска.

Таблица 2

Результаты статистического исследования точности зубчатых колес

Параметры точности	Зубофрезерование				Шлифование			
	$F_{vwr}$	$F_{ir}''$	$f_{ir}''$	$f_{fr}$	$F_{vwr}$	$F_{ir}''$	$f_{ir}''$	$f_{fr}$
Максимальные значения, мкм	33,4	69,1	37,9	17,1	23,5	54,5	20,1	10,4
Допуск на параметр, мкм								
6 степень	16	36	14	8	16	36	14	8
7 степень	22	50	20	11	22	50	20	11
8 степень	28	63	28	14	28	63	28	14
Процент годных колес $P(\delta_{x_i}) \cdot 100\%$								
6 степень	8,3	2,3	16	0	65,5	61	86,1	87,6
7 степень	48,7	54,7	20	0	99,5	99,4	100	100
8 степень	94,4	98,7	81,1	64	100	100	100	100

Результаты статистической обработки показали, что применение сборных червячных фрез с последующим зубошлифованием обеспечивает получение более 99% зубчатых колес в пределах 7-ой степени точности. На операции зубофрезерования наиболее существенной погрешностью является погрешность профиля, которая определяется качеством сборки червячной фрезы и правильностью ее переточки.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена задача конструкторско-технологического проектирования сборной червячной фрезы с эвольвентной производящей для реализации операции зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес при рациональном сочетании уровней производительности станка и стоимости выполнения операции.

1. Анализ литературных данных и производственного опыта червячного зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес показал, что основной зубообработки является разработка высокоэффективных инструментов и наладок, способных к быстрому переналаживанию. К таким инструментам предъявля-

ются повышенные требования, как по продолжительности периода стойкости между переточками, сроку службы до утилизации, так и по технологичности конструкции, в особенности для сборного инструмента. Таким образом, задача обоснования конструкторско-технологических решений, повышающих эксплуатационные возможности червячных фрез является актуальной.

2. Разработанный вариант проектирования винтовой эвольвентной производящей поверхности позволил уточнить геометрические модели для 3-D моделирования, как по торцовому, так и осевому сечениям и установить зависимость угловой ширины впадины винтовой поверхности на цилиндре производящего радиуса от координат предельных точек эвольвенты, исключаящие интерференцию боковых эвольвентных поверхностей.

3. На основе теории взаимоогibaемых поверхностей по профилю подлежащей обработке зубчатой поверхности и кинематике ее движения в станочном зацеплении определена производящая поверхность и профиль режущих зубьев эвольвентной червячной фрезы, а также максимальные толщины слоев, срезаемых вершинными и боковыми режущими кромками, для диапазонов чисел зубьев колес и продольных подач, на которые проектируется фреза. Это явилось основой модификации профиля режущих зубьев за счет попеременно чередующихся фасок и уменьшения осевой толщины производящего зуба.

4. Для сборных фрез с поворотными зубчатыми рейками на основе прочностных расчетов инструментальных оправок получено уравнение для корректирования диаметра посадочного отверстия в ступице фрезы в зависимости от длины фрезы. Установлена возможность применения инструментальных оправок меньше на один размерный уровень при увеличении длины фрезы в 1,5 – 2 раза. Выведены зависимости и составлены таблицы для выбора диаметров инструментальных оправок из условия обеспечения их жесткости, соответствующей заданным точностным требованиям обрабатываемой детали.

5. В результате исследования условий перетачивания фрез установлено, что фрезы, профилирование которых осуществляется в специальных технологических корпусах более чем в пять раз точнее фрез, профилируемых в рабочем корпусе, но в технологическом положении реек. Так при анализе фрез для зубчатых колес с  $t = 4 \text{ мм}$ ,  $\gamma_a = 5^\circ$  и числом режущих реек равным 12, фрезы со специальным технологическим корпусом при стачивании задней поверхности на 12 мм не выходят из класса точности *B* при исходном классе точности *A*. Такой запас ширины шлифованной задней поверхности рейки на переточку почти в два раза превышает аналогичный параметр у монолитных червячных фрез.

6. Разработанный комплекс аналитических зависимостей позволил синтезировать геометрический образ конструкции сборной фрезы, а также получить зависимости для расчета режима резания при зубофрезеровании и оценки технико-экономической эффективности операции. Показано, что на часовую производительность станка и стоимость выполнения операции оказывают влияние не только параметры режима резания и конструкции инструмента, но и его подналадки, передвижки и смены на переточки. Зависимости для расчета оптимальных скоростей

резания, как с точки зрения производительности станка, так и экономичности обработки, позволяют определить область рациональной эксплуатации инструмента по стойкости. Зубофрезерование на скоростях резания, обеспечивающих максимум производительности станка, в пять и более, раз удорожает выполнение операции, чем на экономически выгодных скоростях резания.

7. Проведенные точностные расчеты инструментов и наладки в целом, а также стойкостные испытания как лабораторные, так и производственные подтвердили правильность разработанных теоретических методик и позволили осуществить внедрение полученных результатов в производство. Статистический анализ партии цилиндрических зубчатых колес в размере 250 штук выявил, что по основным параметрам они соответствуют 7 - 8-й степеням точности, а опыт изготовления фрез показал возможность достижения их точности в пределах классов от *AA* до *B*.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Научные работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях**

1. Кинематика червячного зубофрезерования. Скрябин В. Н., Тимофеев А. П., Феофилов Н. Д., Янов Е. С. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4: в 2 ч. Тула: ТулГУ, 2010. Ч.1. – С. 58-68.

2. Феофилов Н. Д., Скрябин В. Н., Мацкевич А. В. Технико-экономические аспекты процесса зубофрезерования цилиндрических колес // Вестник машиностроения. – 2011. – №5. – С. 82-88.

3. Феофилов Н. Д., Скрябин В. Н., Мацкевич А. В. Влияние подналадок и передвижек фрезы на показатели процесса зубофрезерования // Вестник машиностроения. – 2011. – №6. С. 80-84.

**Научные работы в других изданиях**

4. Феофилов Н. Д., Скрябин В. Н. Червячное зубофрезерование деталей с прямолинейными боковыми профилями // Вестник Тульского госуниверситета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы Междунар НТК «АПИР - 16», Ч.2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 76-81.

5. Скрябин В. Н., Феофилов Н. Д. Сборная червячная фреза для деталей с прямолинейными боковыми профилями // Вестник Тульского госуниверситета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы Междунар НТК «АПИР - 16», Ч.2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 43-48.

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 23 апреля 2012 г.  
Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 032

Юго-Западный государственный университет 305040, Курск, ул.50 лет Октября, 94.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, Тула, просп. Ленина, 95.