

УДК 621.914

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ

*Гончаров А.М., к.т.н., доц., Гончаров Д.А., соискатель  
Кременчугский государственный политехнический университет  
имени Михаила Остроградского  
г. Кременчуг, Первомайская, 20  
E-mail: nich@polytech. poltava. ua*

Розроблена методика для проведення досліджень впливу різних геометричних і конструктивних параметрів черв'ячних фрез при їхніх подальших заточуваннях на характер зміни профілю виробничої поверхні, що дозволяє визначення оптимальних за точністю і стійкістю геометричних і конструктивних параметрів, а також найдодільніших способів заточування і отримання задніх поверхонь зуба різних за конструкцією черв'ячних фрез.

**Ключові слова:** черв'ячна фреза, точність, передня поверхня.

A method for conducting researches of influencing different geometrical and structural parameters of worm milling cutters in case of their subsequent sharpening on nature of change of type of productive surface is developed, allowing a determination optimum on exactness and firmness of geometrical and structural parameters and also the most expedient methods of sharpening and receipt of back surfaces of tooth of different for constructions worm milling cutters.

**Key words:** worm milling cutter, exactness, front surface.

**Введение.** Одним из известных путей повышения износостойкости червячных фрез, а также производительности процесса зубофрезерования, является использование рациональной геометрии режущей части зуба червячной фрезы и её конструктивных параметров. Параметры режущей части оказывают влияние не только на работоспособность червячной фрезы, но и на точность её профилирования, точность после переточки, а также на технологичность изготовления и трудоемкость её контроля. Точность обработки является определяющим фактором, на базе которого принимаются значения всех остальных параметров, связанных с процессом проектирования, изготовления и эксплуатации червячных фрез.

**Анализ предыдущих исследований.** Анализ процесса переноса погрешностей фрезы на профиль зубьев обрабатываемого изделия, выполненный в работе [1], позволил сделать следующие выводы. Все погрешности, возникающие при зубофрезеровании червячными фрезами, можно разделить на три группы: проектирование, изготовление и эксплуатация.

К погрешностям проектирования относятся погрешности, связанные с выбором геометрических и конструктивных параметров червячных фрез, со способом и параметрами их заточки и затылования, с аппроксимированием профиля инструмента для заточки и затылования, с переточкой червячных фрез.

Наибольшее влияние на эти погрешности оказывают геометрические (угол профиля, передние и задние углы и т.д.) и конструктивные (число зубьев, число заходов и т.д.) для цельных или сборных фрез параметры червячных фрез [2, 3]. Погрешности аппроксимирования и переточки в большей степени оказывают влияние на искривление и смещение профиля зуба детали относительно теоретически точного. Погрешности переточки являются неустраня-

емыми искажениями профиля, в то время как погрешности аппроксимирования вводятся искусственно. Погрешности переточки можно снизить, но избавиться от них полностью невозможно. Они существуют даже в том случае, если основные параметры червячной фрезы подобраны и выполнены идеально.

Погрешности проектирования червячных фрез оказывают наибольшее влияние на профиль зубьев и основной шаг обрабатываемых деталей. Эти погрешности, зависят от выбора геометрических и конструктивных параметров, от способов заточки и затылования, от аппроксимирования профиля инструмента для заточки и затылования и от переточки червячных фрез.

**Цель работы.** Разработать комплексную методику для проведения исследований влияния различных геометрических и конструктивных параметров червячных фрез при их переточке на характер изменения профиля производящей поверхности, образованной режущими кромками фрезы и возникающими при этом погрешностями обработки. Методика позволит определить оптимальные геометрические и конструктивные параметры, а также наиболее целесообразные способы заточки и затылования различных по конструкции червячных фрез, обеспечивающие при использовании рациональной по стойкости геометрии режущей части, получить высшую точность обработки, т. е. минимальные погрешности, связанные с их проектированием и переточкой.

**Материал и результаты исследований.** На практике все точные цельные червячные фрезы затылуются шлифовальным кругом радиально или под некоторым углом (косое затылование). Сборные червячные фрезы шлифуются в технологическом корпусе с последующей установкой их реек в рабо-

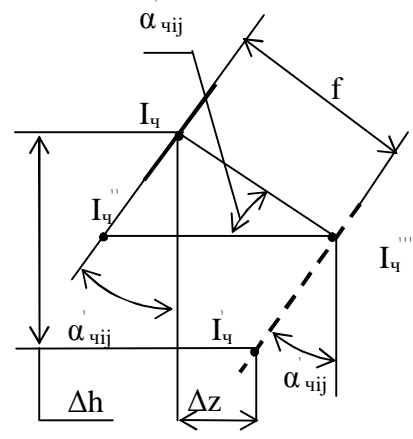
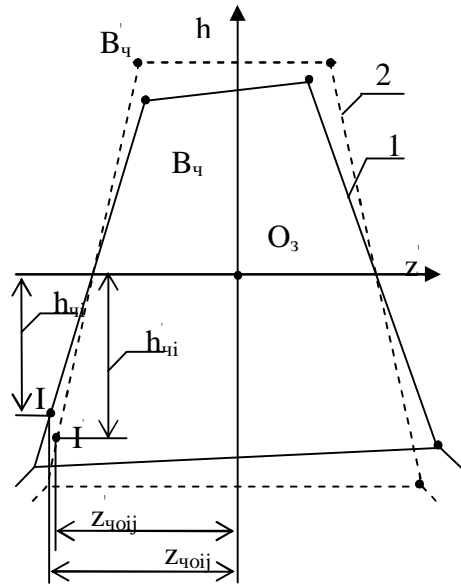
чем корпусе, или в качестве технологического и рабочего корпуса используется один корпус, в котором выполняется поворот реек после их шлифования. Поэтому о точной режущей кромке можно говорить только в одном расчетном сечении, а профиль детали при обработке червячной фрезой с различной степенью сточенности всегда имеет погрешности. Отклонения режущей кромки червячной фрезы, лежащей на действительном червяке от поверхности теоретически точного червяка для фрезы с соответствующей степенью сточенности, можно считать погрешностями, которые переносятся в процессе обработки на деталь.

В методике определения погрешностей, связанных с переточкой червячной фрезы, приняты следующие условия. Основным условием при профилировании червячной фрезы является то, что теоретически точная режущая кромка зуба фрезы должна лежать на поверхности теоретически точного исходного червяка. При переточке фрезы для сохранения точности обработки детали вновь полученные режущие кромки должны также находиться на поверхности теоретически точного червяка, но уже другого, рассчитанного для фрезы измененного диаметра.

Основной составляющей погрешности профиля зуборезных червячных фрез является органическая погрешность профилирования, вызванная заменой, с некоторым приближением, теоретически точного, например, эвольвентного червяка архимедовым или конволютным. Кроме того, значительные погрешности вызваны тем, что задние поверхности зубьев фрезы получены затылованием или шлифованием в технологическом корпусе шлифовальными кругами с аппроксимированными профилями, вследствие чего при переточках погрешность профиля фрезы изменяется как по величине, так и по характеру.

Для определения погрешностей профиля необходимо знать размеры осевых сечений теоретически точного червяка для фрезы с соответствующей степенью сточенности и действительного червяка, поверхность которого образована режущими кромками переточенной червячной фрезы (рис. 1). При этом их винтовые параметры должны быть одинаковы. Параметры осевого сечения действительного червяка для переточенной фрезы определяются по её режущим кромкам. Режущие кромки для червячных фрез с различной степенью сточенности определяются как линии пересечения передней поверхности зуба фрезы с задней поверхностью, полученной инструментом для затылования, с известным профилем или режущей кромкой, рассчитанными для фрезы в расчетном сечении.

Для оценки точности формообразования обрабатываемых деталей вопрос профилирования решается применительно к червячной фрезе с произвольными профилем исходного червяка, винтовой стружечной канавкой, различной по форме образующей в торцовом сечении передней поверхности, при любых направлениях и траекториях затылования резцом или шлифовальным кругом.



1- действительный профиль  
 2- теоретически точный профиль  
 Рисунок 1 – Схема к расчету погрешности профиля действительного червяка

Последовательность расчета погрешностей профиля действительного червяка для сточенной червячной фрезы может быть представлена следующими тремя этапами:

Этап 1. По параметрам обрабатываемой детали и принятой образующей передней поверхности зуба фрезы определяются параметры теоретически точного исходного червяка и режущих кромок червячной фрезы в расчетном сечении. Для уменьшения погрешностей профиля деталей, нарезаемых фрезами с различной степенью сточенности, рекомендуется расчетное сечение располагать таким образом, чтобы обеспечивалось симметричное расположение погрешности профиля зуба фрезы относительно нулевого значения для новой и максимально сточенной фрезы. По принятым параметрам инструмента для получения задней поверхности зуба фрезы, а также параметрам режущих кромок фрезы, зная направление и траекторию затылования, находятся

параметры профиля шлифовального круга или другого режущего инструмента, используемого для получения задних поверхностей.

Этап 2. Определяются параметры положения инструмента для затылования при затыловании червячной фрезы с определенной степенью сточенности. По параметрам передней поверхности зуба фрезы и задней затылованной поверхности находятся параметры режущих кромок сточенной червячной фрезы как линии пересечения этих двух поверхностей а затем определяется профиль в осевом сечении поверхности действительного червяка, образованного этими кромками. Параметры режущих кромок и профиля действительного червяка определяются на границах максимально сточенной фрезы.

Этап 3. Принимая во внимание условие равенства винтовых параметров действительного червяка и теоретически точного исходного для сточенной червячной фрезы, по параметрам обрабатываемой детали определяются параметры профиля теоретически точного червяка для сточенной червячной фрезы. По известным параметрам профилей в осевом сечении действительного червяка и теоретически точного для сточенной червячной фрезы находятся погрешности профиля в нормальном сечении, которые переносятся в процессе обработки на деталь.

Определение параметров теоретически точного червяка для переточенной червячной фрезы при обработке зубчатых колес и шлицевых валов с эвольвентным профилем зуба выполняется следующим образом.

В процессе переточки червячной фрезы ее диаметр изменяется, а шаг зубьев фрезы в осевом сечении остается постоянным, т.е.  $P_{xo} = \text{const}$ .

Известно [4,5], что с зубчатым колесом сопряженными могут быть многие эвольвентные червяки, т.е. для обработки колеса можно спроектировать разнообразные червячные фрезы с различными углами профиля исходной рейки. При этом у всех фрез, предназначенных для обработки заданного колеса, шаг зубьев по нормали, измерений на основном цилиндре исходного червяка будет общим и равным шагу зубьев обрабатываемого колеса  $P_t$ , измеренному на его основной окружности.

Так как величины  $P_t = \text{const}$  и  $P_{xo} = \text{const}$ , то с изменением радиуса фрезы с  $r_{o0}$  до  $r_{oj}$  будут меняться начальные окружности обрабатываемой детали с  $r_{ho}$  до  $r_{hj}$  и исходного червяка с  $r_{mo0}$  до  $r_{moj}$ , а также угол профиля рейки с  $\alpha_{po}$  до  $\alpha_{pj}$ . При этом изменяется межосевое расстояние  $L_o$  на величину

$$\Delta L = (r_{ho} - r_{hj}) + (r_{mo0} - r_{moj}) \quad (1)$$

Если учесть, что шаг зубьев на начальной окружности колеса определяется из выражения  $P_{noj} = P_t / \cos \alpha_{pj}$ , а шаг зубьев фрезы в осевом сечении на начальной окружности исходного червяка  $P_{xo} = P_{noj} / \cos \nu_{moj}$ , то для определения угла профиля рейки  $\alpha_{pj}$  будем иметь уравнение:

$$\alpha_{pj} = \arccos \left[ \frac{P_t}{P_{xo} \cos \nu_{moj}} \right], \quad (2)$$

где  $\nu_{moj}$  - угол подъема витков исходного червяка переточенной червячной фрезы на начальном цилиндре диаметром  $d_{moj}$ , определяемый из выражения [5]:

$$\nu_{moj} = \arctg \left[ \frac{P_{xo}}{\pi d_{moj}} \right] \quad (3)$$

Радиус начальной окружности детали находится из уравнения [6]:

$$r_{hi} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\cos \alpha_{pj}}{r_o}\right)^2 - \left(\frac{\sin \alpha_{pj}}{P}\right)^2}} \quad (4)$$

где  $r_o$  - радиус основной окружности зубчатого колеса;  $P$  - винтовой параметр зубчатого колеса.

При использовании переточенной червячной фрезы требуется корректировка угла установки фрезы на станке. Это исключает внесение дополнительных погрешностей, связанных с установкой фрезы на станке. Если этим пренебрегать, то будут внесены дополнительные погрешности. Угол установки фрезы  $\phi_{ck,j}$  находится из уравнения:

$$\phi_{ck,j} = \pi/2 - \nu_{moj} + \beta_{hj} \quad (5)$$

где  $\beta_{hj}$  - угол установки рейки принимается по углу подъема винтовой линии зуба детали на её начальной окружности при обработке фрезой с определенной сточенностью.

$$\tg \beta_{hj} = (r_{hj} \setminus r_{ho})^* \tg \beta_{ho} \quad (6)$$

где  $r_{ho}$ ,  $\beta_{ho}$  - соответственно исходные значения радиуса начальной окружности детали и угол установки рейки.

Расчет выполняется в следующей последовательности. Первоначально определяются исходные значения ( $P_t$ ,  $r_o$ ,  $P$ ,  $r_{ho}$ ) параметров обрабатываемой детали и параметры инструментальной рейки ( $\alpha_{po}$ ,  $\beta_{ho}$ ). Затем рассчитываются параметры теоретически точного исходного червяка ( $d_{ao}$ ,  $d_{mo}$ ,  $\nu_{mo}$ ,  $P_{xo}$ ) а также параметры его профиля ( $h_{ч10}$  и  $z_{ч010}$ ) для расчетного сечения фрезы. Определяются также исходные параметры настройки ( $\phi_{ck,o}$ ,  $L_o$ ) технологической системы, в условиях которой будет выполняться обработка.

Для новой или переточенной фрезы в первом приближении принимается значение диаметра начальной окружности червяка  $d_{moj}$  с учетом изменения наружного диаметра фрезы  $\Delta d_{ao}$  с принятой степенью сточенности. Затем рассчитываются значения:  $\nu_{moj}$ ;  $\alpha_{pj}$ ;  $r_{hj}$ ;  $\Delta L$ . Правильность расчета величин  $r_{hj}$ ,  $\alpha_{pj}$ ,  $\nu_{moj}$  проверяется из выражения

$$d_{moj}/2 = (L_o + \Delta L) - r_{hj} \quad (7)$$

В случае неравенства значение  $d_{moj}$  полученного в этом выражении (7) и подставляемого в уравнение (3) расчет повторяется, но уже с новым значением  $d_{moj}$ , полученным в выражении (7).

В качестве примера в табл.1 приведены результаты расчета параметров теоретически точного червяка ( $d_{ao}$ ,  $d_{mo}$ ,  $\nu_{mo}$ ), начальной окружности детали ( $r_{hj}$ ), угла профиля инструментальной рейки ( $\alpha_p$ ), угла установки фрезы ( $\phi_{ck}$ ) для червячной фрезы модулем  $m=5$  мм новой при  $\Delta d_{ao} = 4$  мм., расчетной при  $\Delta d_{ao} = 0$ , максимально переточенной при  $\Delta d_{ao} = -4$  мм.

**Таблиця 1 – Параметри теоретически точного червяка для фрез различной сточенности**

$\Delta d_{ao}$ мм	$d_{ao}$ мм	$d_{mo}$ мм	$\nu_{mo}$	$\Gamma_n$ мм	$\alpha_p$	$\Psi_{ck}$
4	112	99.4926	2° 52' 50"	67.4329	20° 1' 1"	114° 15' 46"
0	108	95.5000	3° 0' 44"	67.4237	20°	114° 8' 20"
-4	104	91.5098	3° 7' 55"	67.4133	19° 58' 51"	114° 0' 17"

На рис. 2 показан характер изменения профиля теоретически точного червяка при изменении диаметра фрезы:  $A_o, B_o, C_o, D_o$  – профиль исходного червяка в расчетном сечении;  $A_n, B_n, C_n, D_n$  – профиль теоретически точного червяка для новой фрезы;  $A_p, B_p, C_p, D_p$  – профиль теоретически точного червяка для переточенной фрезы. Также показано положение начальной прямой относительно исходного положения: 1 - начальная прямая для расчетной фрезы в исходном положении; 2 - начальная прямая для новой фрезы; 3 - начальная прямая для максимально переточенной фрезы. В табл. 2 приведены величины изменения координат ( $\Delta h, \Delta z$ ) в соответствующих точках профиля теоретически точного червяка для новой и максимально переточенной фрез относительно профиля исходного червяка.

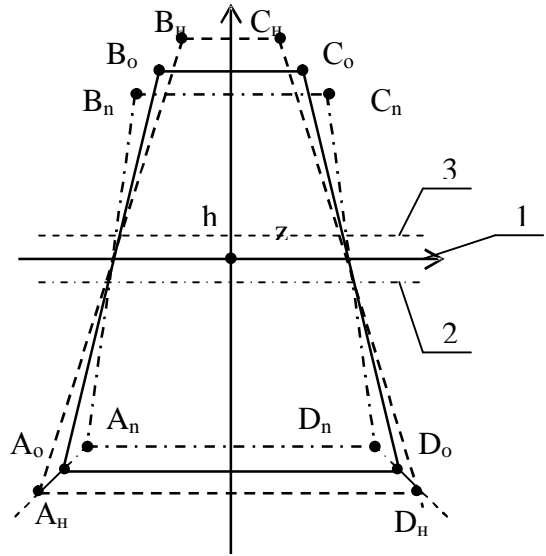
**Таблиця 2 – Отклонения профиля теоретически точного червяка от расчетного**

Теоретически точный червяк	Точки профиля	$\Delta h$ , мкм	$\Delta z$ , мкм
Для новой фрезы	B	3.400	2.327
	A	-4.040	-3.409
	C	3.400	-2.327
	D	-4.040	3.409
Для максимально переточенной фрезы	B	-3.910	-2.725
	A	4.57	3.628
	C	-3.910	2.725
	D	4.57	-3.628

Расчет погрешности профиля выполняется следующим образом. Так как погрешность профиля  $f_{гр}$  в расчетных точках действительного червяка в нормальном сечении определяется по разности осевых сечений теоретически точного и действительного червяков с соответствующей степенью сточенности, то уравнение для определения погрешности можно представить в виде:

$$f_{гр} = f \cdot \cos \nu'_{moj} \quad (8)$$

где  $f$  – величина смещения профиля действительного червяка относительно теоретически точного в осевом сечении в расчетной точке (рис.1.);  $\nu'_{moj}$  – угол подъема винтовой линии теоретически точного червяка на диаметре начального цилиндра фрезы с соответствующей сточенностью.



**Рисунок 2 – Характер изменения профиля теоретически точного червяка при переточке фрезы**

Для определения величины смещения профиля действительного червяка относительно теоретически точного в осевом сечении  $f$  в расчетной точке  $I_q$  рассмотрим два профиля:  $I'_q B'_q$  – теоретически точного и  $I_q B_q$  – действительного червяков, которые расположены в прямоугольной системе координат  $hO_z z$ . Начало системы координат совпадает с точкой касания начальной прямой с начальным цилиндром червячной фрезы соответствующей сточенности. Параметры  $h_{qij}$  и  $z_{qoij}$  в расчетных точках профиля теоретически точного червяка, а также параметры  $h_{qij}$  и  $z_{qoij}$  действительного рассчитываются в системе координат  $hO_z z$ .

Если принять, что погрешности профиля зуба фрезы образуются в результате несовпадения этих точек, то величины относительного смещения  $\Delta h$  и  $\Delta z$  по соответствующим осям  $h$  и  $z$  можно определить из выражений:

$$\Delta h = h_{qij} - h'_{qij} = r_{ij} - r'_{ij}; \quad (9)$$

$$\Delta z = z_{qoij} - z'_{qoij}. \quad (10)$$

Учитывая, что величины  $\Delta h, \Delta z$  в сравнении с соответствующими координатами  $h_{qi}, z_{qoi}$  малы, то можно записать следующую зависимость

$$f = I_q I'_q''' = I_q I_q''' \cdot \cos \alpha'_{qij} \quad (11)$$

Отрезок  $I_q I_q'''$ , если учесть что  $\Delta h > 0$ , а  $\Delta z < 0$ , определяется из выражения

$$I_q I_q''' = \Delta z - \Delta h \cdot \text{tg} \alpha'_{qij} \quad (12)$$

где  $\alpha'_{qij}$  – угол профиля в расчетной точке теоретически точного червяка в осевом сечении.

Учитывая все вышеизложенное, окончательно будем иметь выражение для определения погрешности профиля:

$$f_{fr} = \pm (\Delta z \cdot \cos \alpha'_{cij} - \Delta h \cdot \sin \alpha'_{cij}) \cdot \cos v'_{moj}, \quad (13)$$

где знак перед выражением берется в зависимости от знака параметра  $Z_{чoj}$

Следует учесть, что отрицательное значение погрешности соответствует недорезу профиля зуба на детали, а положительное значение - подрезу.

Таким образом, для расчета величины погрешности профиля  $f_{fr}$  в расчетной точке необходимо предварительно определить параметры соответствующих точек действительного  $r_{ij}$ ,  $Z_{чoj}$  и теоретически точного  $r'_{ij}$ ,  $Z_{чoi}$  червяков.

Величины  $r_{ij}$ ,  $Z_{чoj}$  получаются путем расчета геометрически точного червяка для переточенной фрезы с расчетным радиусом

$$r_{oj} = r_{oo} + \Delta d/2 \quad (14)$$

где  $r_{oo}$  - расчетный радиус исходного червяка червячной фрезы, по параметрам которой рассчитывается профиль или режущие кромки инструмента для ее затылования;  $\Delta d/2$  - величина изменения расчетного радиуса фрезы, вызванная ее переточкой.

Параметры  $r_{ij}$ ,  $Z_{чoj}$ , характеризующие расчетные точки осевого профиля действительного червяка, определяются по соответствующим точкам режущих кромок переточенной фрезы с радиусом  $r_{oj}$ , которые получены в результате пересечения известных боковых и вершинных затылованных поверхностей с передней поверхностью, образованной стружечной канавкой. Переточенную фрезу можно рассматривать как фрезу, которая затылуется инструментом с известным профилем или режущей кромкой. Поэтому исходными для расчета величин  $r_{ij}$  и  $Z_{чoj}$  будут параметры профиля  $X_{pi}$ ,  $Z_{pi}$  резца или  $R_{ши}$ ,  $Z_{ши}$  шлифовального круга, а также параметры профиля передней поверхности. Линия пересечения, образованная задней затылованной поверхностью и передней поверхностью зуба фрезы, будет лежать на поверхности действительного червяка.

Расчет выполняется в следующей последовательности. Первоначально определяются координаты  $X_{i3j}$ ,  $Y_{i3j}$ ,  $Z_{i3j}$  профилирующих точек инструмента для затылования для переточенной червячной фрезы в системе координат, связанной с этой фрезой. Определение величин координат точек действительного червяка  $h_{cij}$ ,  $Z_{чoj}$  по известным  $X_{i3j}$ ,  $Y_{i3j}$ ,  $Z_{i3j}$  не зависит от вида затылующего инструмента, т.к. они характеризуют координаты точек режущих кромок переточенной червячной фрезы, а поэтому имеют единый алгоритм расчета.

**Выводы.** Рассмотрены погрешности проектирования червячных фрез, оказывающие наибольшее влияние на профиль зубьев и основной шаг обрабатываемых деталей, а именно погрешности, связанные с выбором геометрических и конструктивных параметров, со способами заточки и затылования, аппроксимированием профиля инструмента для заточки и затылования и переточкой червячных фрез.

Разработана методика для проведения исследований влияния различных геометрических и конструктивных параметров червячных фрез при их переточке на характер изменения профиля производящей поверхности, образованной режущими кромками фрезы и возникающими при этом погрешностями обработки.

В результате таких исследований возможно определение оптимальных геометрических и конструктивных параметров, а также наиболее целесообразных способов заточки и затылования различных по конструкции червячных фрез. Которые позволят при использовании рациональной по стойкости геометрии режущей части, получить наивысшую точность обработки, т.е. минимальные погрешности, связанные с их проектированием и переточкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тайц В.А. Точность и контроль зубчатых колес.- М.: Машиностроение, 1972. -367с.
2. Гончаров А.М. Повышение точности профилирования червячных фрез с оптимальными передними углами. – Резание и инструмент. -Харьков, 1990.- №43.- С.64-68.
3. Гончарова Д.А., Гончарова А.М. Точность червячных фрез с поворотными рейками и рациональной по стойкости геометрией.// Вісник Кременчугського державного політехнічного університету.- Вип. 4/2003 (21). Частина 1. С. 71-73.
4. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. Киев.: Вища школа, 1986. – 455 с.
5. Семенченко Д.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов.- М.: Машгиз, 1962. -703 с.
6. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ.- М.: Машиностроение, 1975.-392 с.

Стаття надійшла 20.03.2007 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Саленком А.Ф.