



## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОСОЗУБЫХ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ ДИСКОВЫМИ И КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ НА ПЯТИКООРДИНАТНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Кондрашов А.Г.<sup>1</sup>, Сафаров Д.Т.<sup>1</sup>, Фасхутдинов А.И.<sup>1</sup>, Казаргельдинов Р.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

<sup>2</sup> ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В конструкции современного большегрузного автомобиля сегодня присутствует очень широкая номенклатура зубчатых колес с нестандартным профилем. Изготовление опытных партий таких колес при традиционных подходах к подготовке производства требует больших временных и финансовых затрат на заказ, проектирование и изготовление специального зуборезного инструмента. Развитие многокоординатных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяет сегодня выполнить такую обработку универсальным инструментом. Выполнен обзор методов обработки зубчатых колес инструментом дискового типа – резцовыми головками и дисковыми фрезами при изготовлении зубчатых колес. Показаны недостатки рассмотренных методов при изготовлении опытных образцов венцов. Приведены алгоритмы расчета координат рабочих ходов инструмента. Приведены экспериментальные данные обработки зубчатого венца при поперечных и продольных рабочих ходах. Дана оценка погрешности профиля по данным измерений на зубоизмерительной координатно-измерительной машине. **Цель работы.** Снижение стоимости и сроков подготовки производства косозубых зубчатых венцов в условиях мелкосерийного и опытного производства с обеспечением производительности, сопоставимой с обработкой специализированным зуборезным инструментом. **Используемые методы.** Используются математические методы матричных преобразований. **Новизна.** Впервые в отечественном автомобилестроении за счет возможностей современных пятикоординатных станков с ЧПУ реализована технология формообразования зубчатого венца универсальной дисковой фрезой, включающая обработку эвольвентных поверхностей, дна впадины, а также снятие фасок по кромкам зубьев. **Результат.** Разработанная технология обработки универсальна и обеспечивает высокую точность обработанного зубчатого венца, сравнимую с точностью обработки традиционными способами зубообработки – червячными фрезами или долбяками. **Практическая значимость.** Технология внедрена в процесс опытного производства косозубых зубчатых колес и позволяет сократить длительность подготовки производства новых зубчатых перетач с 2-3-х месяцев до 1-2-х часов за счет отсутствия затрат времени на изготовление специальных зажимных оправок и зуборезного инструмента.

**Ключевые слова:** цилиндрическая косозубая зубчатая передача, зубчатый венец, зуборезный инструмент, дисковая фреза, зубофрезерование, станок с ЧПУ

© Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И., Казаргельдинов Р.Р., 2023

### Для цитирования

Технология формообразования косозубых зубчатых венцов дисковыми и концевыми фрезами на пятикоординатных станках с числовым программным управлением / Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И., Казаргельдинов Р.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 123-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-123-136>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# TECHNOLOGY OF FORMING OF HELICAL RING GEARS WITH DISK CUTTERS AND END MILLS ON FIVE-AXIS CNC MACHINES

Kondrashov A.G.<sup>1</sup>, Safarov D.T.<sup>1</sup>, Faskhutdinov A.I.<sup>1</sup>, Kazargeldinov R.R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

<sup>2</sup> PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The design of modern heavy-duty vehicles includes a very wide range of gears with a non-standard profile. The production of experimental batches of such gears, when applying conventional approaches to the preparation of production, requires much time and financial expenses for ordering, designing and manufacturing a special gear-cutting tool. The development of multi-axis machines with computer numerical control (CNC) provides for such machining with a universal tool. The paper presents a review of methods of machining gears with a disk-type tool, namely cutter heads and disk cutters, when manufacturing gears. It describes disadvantages of the methods under study, when manufacturing prototypes of ring gears. The authors present algorithms for calculating the axes of working strokes of the tool and experimental data on machining of ring gears with transverse and longitudinal working strokes. The paper contains an estimated error of the profile according to the measurement data on a tooth-measuring coordinate measuring machine. **Objectives.** The research is aimed at reducing the price and periods for preparing production of helical ring gears on small batch and pilot production, while ensuring performance compared with machining with special tooth cutting tools. **Methods Applied.** The authors applied mathematical methods of matrix transformations. **Originality.** For the first time, the domestic automotive industry used the technology of forming ring gears with a universal disk cutter due to the capabilities of modern five-axis CNC machines, including machining of evolverment surfaces and the tooth gullet, as well as chamfering along the edges of the teeth. **Result.** The developed technology of machining is universal, while ensuring high accuracy of machined ring gears compared with accuracy of machining with conventional methods of gear machining, namely with hobbing or gear-shaping cutters. **Practical Relevance.** The technology has been introduced into pilot production of helical ring gears to reduce the period of preparation for the production of new gears from 2-3 months to 1-2 hours as time is not spent on manufacturing special clamping mandrels and gear-cutting tools.

**Keywords:** cylindrical helical gear, ring gear, gear-cutting tools, disk cutter, gear milling, CNC machine

## For citation

Kondrashov A.G., Safarov D.T., Faskhutdinov A.I., Kazargeldinov R.R. Technology of Forming of Helical Ring Gears with Disk Cutters and End Mills on Five-Axis CNC Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 123-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-123-136>

## Введение

Разработка и выпуск новых узлов и агрегатов большегрузного автомобиля, в состав которых входят цилиндрические прямозубые и косозубые зубчатые передачи (редукторы, раздаточные коробки, коробки передач), представляет собой комплекс сложных инженерных задач. Конструкция автомобиля сегодня отличается от других видов техники очень широкой номенклатурой зубчатых колес с нестандартным профилем. Так, изготовление опытной партии коробки переключения передач сегодня потребует изготовления 30-40 партий уникальных зубчатых венцов с нестандартным модулем и исходным контуром (например,  $m = 4,1$  мм,  $\alpha = 17^\circ$ ). Традиционная подготовка производства потребует выполнить проектирование и изготовление специального зуборезного инструмента. Так, например, цена червячной зуборезной фрезы (для венцов с модулем 3,5-6 мм) может составлять в зависимости от

производителя 60-100 тыс. руб., а ожидание заказанного инструмента может продлиться от 6 до 12 месяцев, что в современных условиях совершенно недопустимо. Кроме этого, расходы на сам инструмент будут несоизмеримы с затратами на зубонарезание (обрабатывается партия 3-10 деталей), а возможность выработать полностью ресурс инструмента присутствует не всегда.

Современные возможности многокоординатных станков с ЧПУ позволяют выполнить обработку зубчатого венца стандартными дисковыми или концевыми фрезами. Конечно, в серийном производстве данные инструменты не могут конкурировать с инструментами червячного типа (как по производительности, так и по стойкости). В условиях обработки опытной партии применение стандартных дисковых фрез на станке с ЧПУ обеспечивает несомненные преимущества. Однако такой вид обработки требует от специалистов предприятия более высокой квалификации ввиду сложности задачи. В част-

ности, важно правильно построить 3D-модель зубчатого колеса, выбрать в САМ-системе инструмент и задать направление траекторий его перемещения, а в процессе обработки, обеспечить требуемую точность зуба. Методы и алгоритмы расчета координат точек траектории перемещения стандартного инструмента в отечественной и иностранной научной литературе раскрыты не в полной мере, что не позволяет обеспечить обработку опытных образцов венцов требуемой точности. Кроме этого, определенные трудности представляет компенсация погрешностей технологической оснастки при обработке зубчатого венца на станке с ЧПУ.

Распространенными методами зубообработки цилиндрических зубчатых колес на станках с ЧПУ общего назначения является обработка по методу копирования [1] однозубыми модульными или фасонными дисковыми фрезами [2-4], дуплексными и триплексными дисковыми фасонными фрезами [5]. Эти способы обработки могут применяться как для чистовой, так и для черновой обработки зубчатых венцов. В [5] рассматривается способ обработки фасонных профилей угловыми фрезами на примере винтовых канавок. По заданному профилю фрезы определяется профиль получаемой канавки при варьировании варметрами установки фрезы. Данный метод обработки может быть реализован на четырехкоординатном станке с ЧПУ для предварительного удаления материала из впадины зубчатого колеса при соответствующей его адаптации

и разработке специализированного инструмента.

При наличии специализированных зуборезных станков или специальных станков с ЧПУ с функцией обката возможен способ обработки зубчатых венцов цилиндрических колес двухрядными резцовыми головками [6, 7] (рис. 1). Этот метод обработки позволяет выполнить чистовую обработку зубьев. При высокой производительности требуется изготовление специальных резцовых головок.

Для обработки зубчатых колес вышеперечисленными методами необходимо выполнить проектирование, а затем изготовление специализированного инструмента с заданным профилем режущих кромок.

В [8-10] рассмотрен способ обработки и конструкция инструмента, обрабатывающего прямозубые цилиндрические крупномодульные зубчатые колеса обкатным методом на станках ЧПУ общего назначения. Этот метод является более универсальным, поскольку одним инструментом возможна обработка зубчатых колес с различным модулем и числом зубьев в заданных пределах (рис. 2, а). В [11] приведен пример черновой обработки впадин прямозубых цилиндрических зубчатых колес комплектом универсальных дисковых фрез, установленных на одной оправке (рис. 2, б). Этот метод применим как на станках с ЧПУ, так и на универсальных фрезерных станках, однако этим методом невозможно обработать косозубые цилиндрические колеса мелкого и среднего модуля.

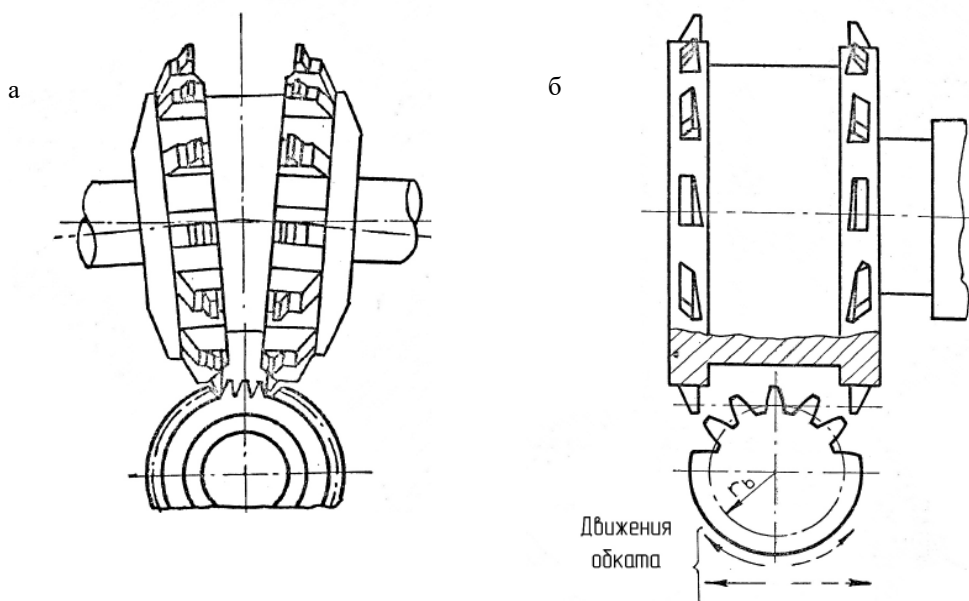


Рис. 1. Зубообработка резцовыми головками: а – с клиновой шайбой; б – с нулевым углом профиля [6]  
 Fig. 1. Tooth machining with cutter heads: a is with a beveled washer; б is with a zero angle of the profile [6]

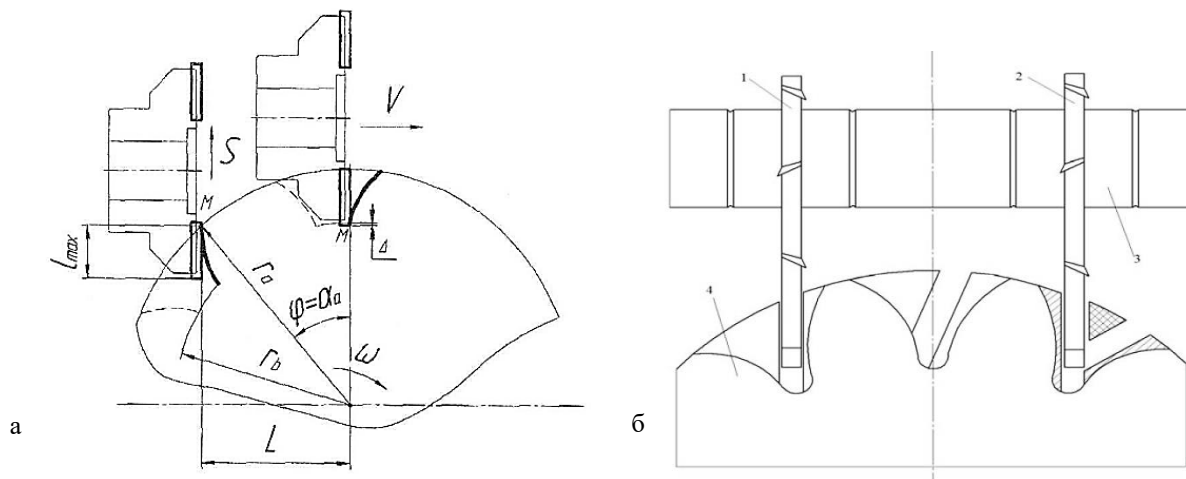


Рис. 2. Обработка впадин: а – специальной дисковой фрезой [10]; б – комплектом дисковых фрез [11]  
 Fig. 2. Machining of gullets: a is with a special disk cutter [10]; б is with a set of disk cutters [11]

Следует отметить, что ни один из вышеприведенных методов не обеспечивает необходимой универсальности обработки цилиндрических косозубых колес различных конструктивных параметров без изготовления специализированного зуборезного инструмента.

В зарубежных изданиях тематика обработки зубчатых колес универсальным инструментом является актуальной и востребованной. В [13-19] отмечаются преимущества современных методов обработки на пятикоординатных станках с ЧПУ при обработке косозубых зубчатых колес. Наиболее известными методами подобной обработки, доведенной до промышленного применения, являются запатентованные фирмами-изготовителями режущего инструмента методы обработки gearMILL – обработка концевыми фрезами и InvoMilling – обработка преимущественно дисковыми фрезами.

Имеются отдельные публикации, рассматривающие только теоретические основы нахождения траекторий обработки, а также анализирующие геометрические параметры зубчатых колес от параметров процесса приведенными выше методами обработки зубчатых колес. Примером теоретических исследований обработки зубчатых колес на пятикоординатных станках является работа [16]. В работе приведены математические модели зубьев, но не приводятся экспериментальное подтверждение. Примером экспериментальных исследований являются работы [20, 21]. В них рассматриваются результаты измерений боковых поверхностей зубьев после обработки концевым инструментом, но не приводятся траектории перемещений инструмента. Опытные данные приведены для концевых фрез ограни-

ченной номенклатуры. По методу InvoMilling преобладают исследования анализа результатов обработки. Например, в [22] рассматриваются результаты обработки зубчатых венцов дисковым инструментом. В данной работе не исследован метод продольного срезания припуска при формировании впадин зубчатых колес. Встречаются исследования остаточных напряжений после обработки универсальными инструментами. Например, в [23] исследуются остаточные напряжения после обработки на 5-осевых обрабатывающих центрах крупногабаритных шестерен концевыми фрезами, авторами установлено влияние износа на остаточные напряжения на боковой поверхности зубьев зубчатых колес и влияние глубины резания по боковым сторонам на шероховатость поверхности. В статье не приводится схема рабочих перемещений инструмента, что не позволяет интерпретировать результаты исследования. Таким образом, имеющаяся в иностранной литературе информация свидетельствует о достаточной разработанности темы с отсутствием рассмотрения отдельных аспектов теоретических и экспериментальных исследований процесса. Обработка зубчатых венцов выполняется за счет реализации программного кода, запатентованных программных продуктов, например фирмы «Sandvik Coromant», рассчитывающих траектории перемещения инструментов для различных стоек ЧПУ.

Имеется ряд значительных недостатков использования таких программных продуктов производителями автокомпонентов, включающих зубчатые передачи. Траектории перемещений жестко привязаны к базам данных фирменного зарубежного инструмента, изменение парамет-



ров и координат перемещений задается шаблонами обработки и не может быть изменено. Режимы резания привязаны к геометрическим параметрам фирменного инструмента.

Таким образом, актуальность темы объясняется отсутствием комплексного подхода в обработке универсальным инструментом элементов зубчатого венца – эвольвентной поверхности, переходной кривой, впадины и фасок в соответствии с заданными конструктивными требованиями с максимально возможной производительностью обработки, отсутствием отечественного программного продукта, лишенного недостатков применения программных продуктов зарубежных производителей режущего инструмента.

### Методы исследования

В случае обработки косозубых цилиндрических колес дисковых фрез необходим станок с ЧПУ с одновременно управляемыми пятью координатами – тремя поступательными и двумя вращательными. На нем необходимо обеспечить обработку не только эвольвентных боковых сторон, но и других элементов – переходной зоны, поверхности впадин, обеспечить обработку равномерной заходной фаски каждой впадины, то есть взаимосвязанную последовательность переходов, обрабатываемых универсальным инструментом с минимальным временем обработки. Разработанные переходы обработки можно отнести к дискретному способу обработки при непрерывном обкате [1] инструмента и заготовки. Обработка впадин зубчатого венца колеса выполняется по технологическому маршруту, приведенному в табл. 1, при этом обеспечивается минимальная длительность обработки и заданные параметры зубчатых венцов. Рабочие движения в переходах заданы из условия постоянства положения обрабатываемой впадины зубчатого колеса.

Основной объем материала удаляется прорезкой прямоугольной впадины зуба в нормальном сечении. Затем выполняется полуступенчатый переход фрезерования боковых поверхностей впадин – правой и левой. В результате формируется ступенчатый равномерный припуск по боковым сторонам впадины под чистовое фрезерование. Далее следует чистовой переход фрезерования профиля зубчатого колеса, в результате которого формируется теоретический эвольвентный профиль впадин зубчатого колеса с припуском под чистовое шлифование, если оно предусмотрено после термообработки полуфабриката зубчатого колеса.

Этот переход может выполняться двумя различными способами – продольным перемещением цилиндрической фрезы вдоль линии направления зуба либо поперечным перемещением. Все вышеперечисленные переходы могут выполняться одной и той же прямоугольной цилиндрической фрезой.

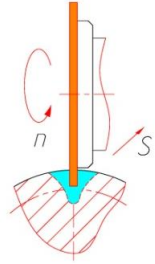
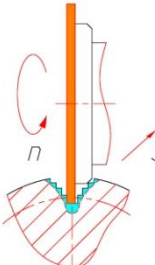
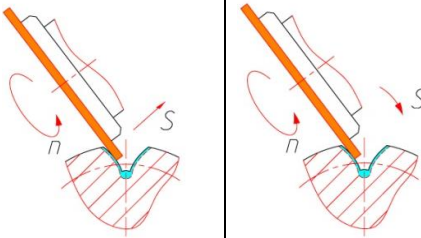
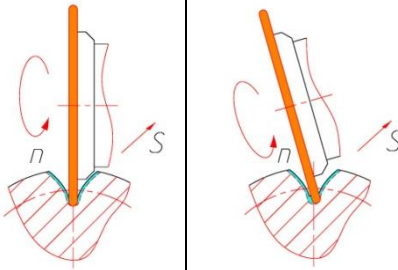
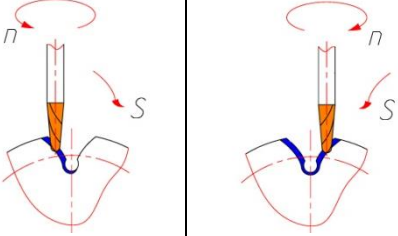
Переходная кривая впадины фрезеруется цилиндрической фрезой с радиусной режущей частью без поднутрения и с поднутрением для обеспечения возможности выхода круга в процессе следующей зубошлифовальной операции. На заключительном переходе по торцевым кромкам впадин зубьев с двух сторон фрезеруется фаска. Для расчета траекторий инструмента введена система координат, связанная с обрабатываемой впадиной  $P_H$ ,  $P_E$ ,  $P_B$  (рис. 3). Дополнительно к трем линейным координатам положение инструмента определяется двумя угловыми координатами –  $\gamma_B$  и  $\gamma_E$ , отражающими поворот относительно осей  $P_B$  и  $P_E$  соответственно. В зависимости от требований к точности обработки выбирается количество траекторий (слоев) –  $NT$  и количество точек одной траектории –  $NP$ . Вид перехода, тип применяемого инструмента и величина припуска определяют координаты точек траекторий в системе координат обрабатываемой впадины, пример точка  $M11$  (рис. 3, а).

Как правило, пятикоординатная обработка выполняется в режиме «управления вершиной инструмента». В этом режиме поворот заготовки приводит к корректировке линейных координат. Для этой цели в блок-схеме на рис. 4 предусмотрен поворот системы координат  $P_H$ ,  $P_E$ ,  $P_B$  с переходом в систему координат станка  $XYZ$  (рис. 3, б). Поэтому расчет координат точек траекторий обработки выполняется в несколько этапов (см. рис. 4):

- расчет координат точек торцевого профиля зуба и его отрисовка;
- выбор инструмента, схемы обработки и параметров режима резания из базы данных;
- расчет координат точки траектории в системе координат впадины;
- пересчет координат с учетом режима отслеживания вершины режущего инструмента при 5-координатной обработке.

Для автоматизации алгоритма расчета траекторий обработки зубьев универсальным инструментом и разработки управляющих программ станка с ЧПУ разработан программный модуль на языке программирования Delphi, основное окно ввода данных и визуализации координат рабочих ходов приведено на рис. 5.

Таблица 1. Технологический маршрут фрезерования впадины зубчатого колеса дисковыми и концевыми фрезами  
 Table 1. The process flow of milling gear gullets with disk cutters and end mills

№ п/п	Технологический переход	Назначение перехода	Рабочие движения	Инструмент/режим резания
1	Черновая прорезка впадины	Удаление максимально возможного припуска из впадины зуба		Coromill 162 $t = 3$ мм $S_z = 0,08$ мм/зуб $V = 190$ м/мин
2	Получистое фрезерование боковых поверхностей зубьев	Ступенчатое удаление припуска во впадине с припуском под получистовое фрезерование		Coromill 161 $t = 1,5$ мм $S_z = 0,08$ мм/зуб $V = 150$ м/мин
3	Чистовое фрезерование боковых поверхностей зуба	Формообразование теоретического профиля боковой поверхности зуба с припуском под зубошлифование		Coromill 161 $t = 1,5$ мм $S_z = 0,06$ мм/зуб $V = 180$ м/мин
4	Фрезерование по дну впадины зуба	Формообразование радиусной поверхности по дну впадины		Coromill 161 $t = 0,5$ мм $S_z = 0,08$ мм/зуб $V = 180$ м/мин
5	Фрезерование фаски по кромкам впадины	Формообразование фаски по боковой кромке впадин зубьев		Coromill Plura R216.42-04030-AC30G $t = 0,3$ мм $S_z = 0,04$ мм/зуб $V = 120$ м/мин

Примечание.  $t$ ,  $S_z$ ,  $V$  – глубина резания, подача на зуб и скорость резания соответственно. Значения параметров режима резания выбраны по [12].

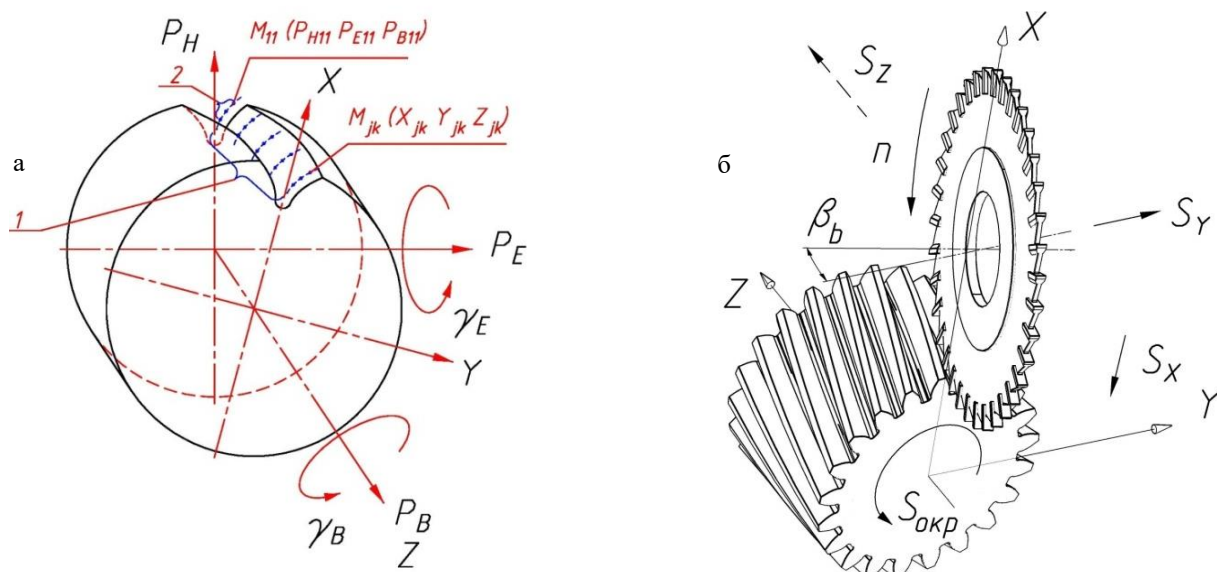


Рис. 3. Схема координат обрабатываемой впадины (а) и станка (б): 1 – траектории перемещения инструмента; 2 – точки траекторий

Fig. 3. The scheme of coordinates of gullets under machining (a) and the machine (б): 1 is tool paths; 2 are path points

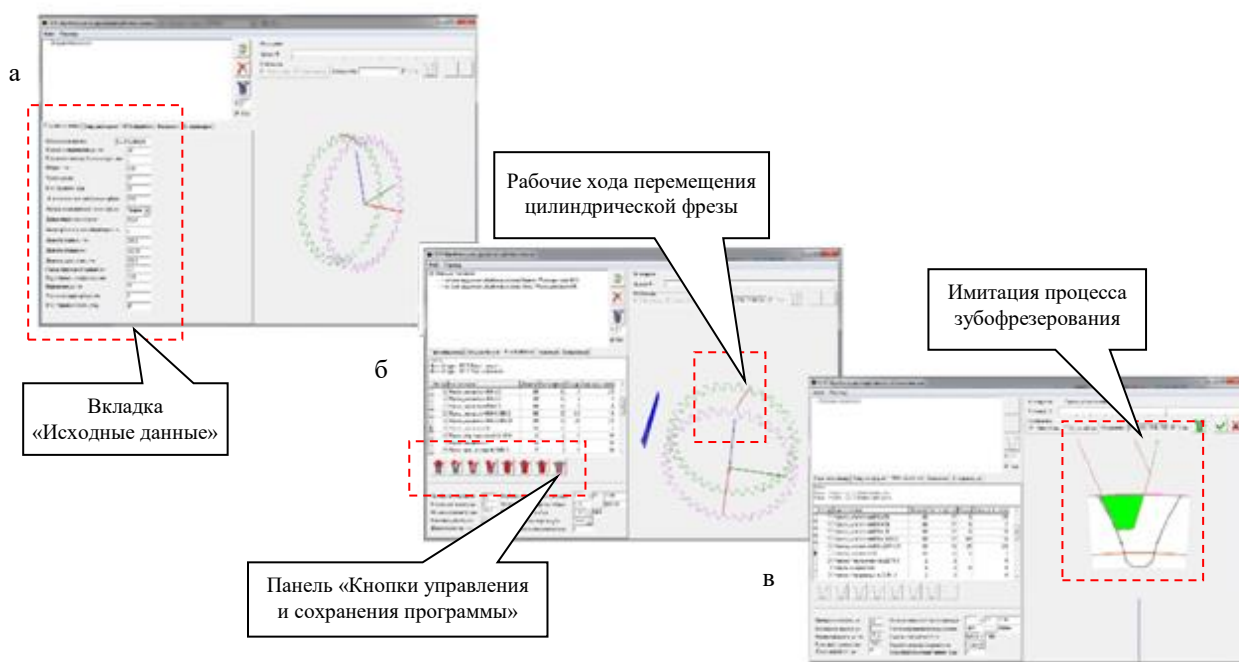


Рис. 5. Программный модуль разработки управляющих программ станка с ЧПУ обработки косозубых цилиндрических колес дисковыми и концевыми фрезами: а – окно ввода входных данных; б – окно расчета, просмотра траекторий базовых точек фрезы и сохранения управляющей программы ЧПУ; в – окно имитации процесса обработки впадины зубчатого колеса

Fig. 5. Software module for the development of control programs of a CNC machine for machining cylindrical helical gears with disk cutters and end mills: а is a window for entering input data; б is a window for calculating, viewing the paths of the base points of the milling cutter and saving the control program of CNC; в is a window for simulating a gear gullet machining process

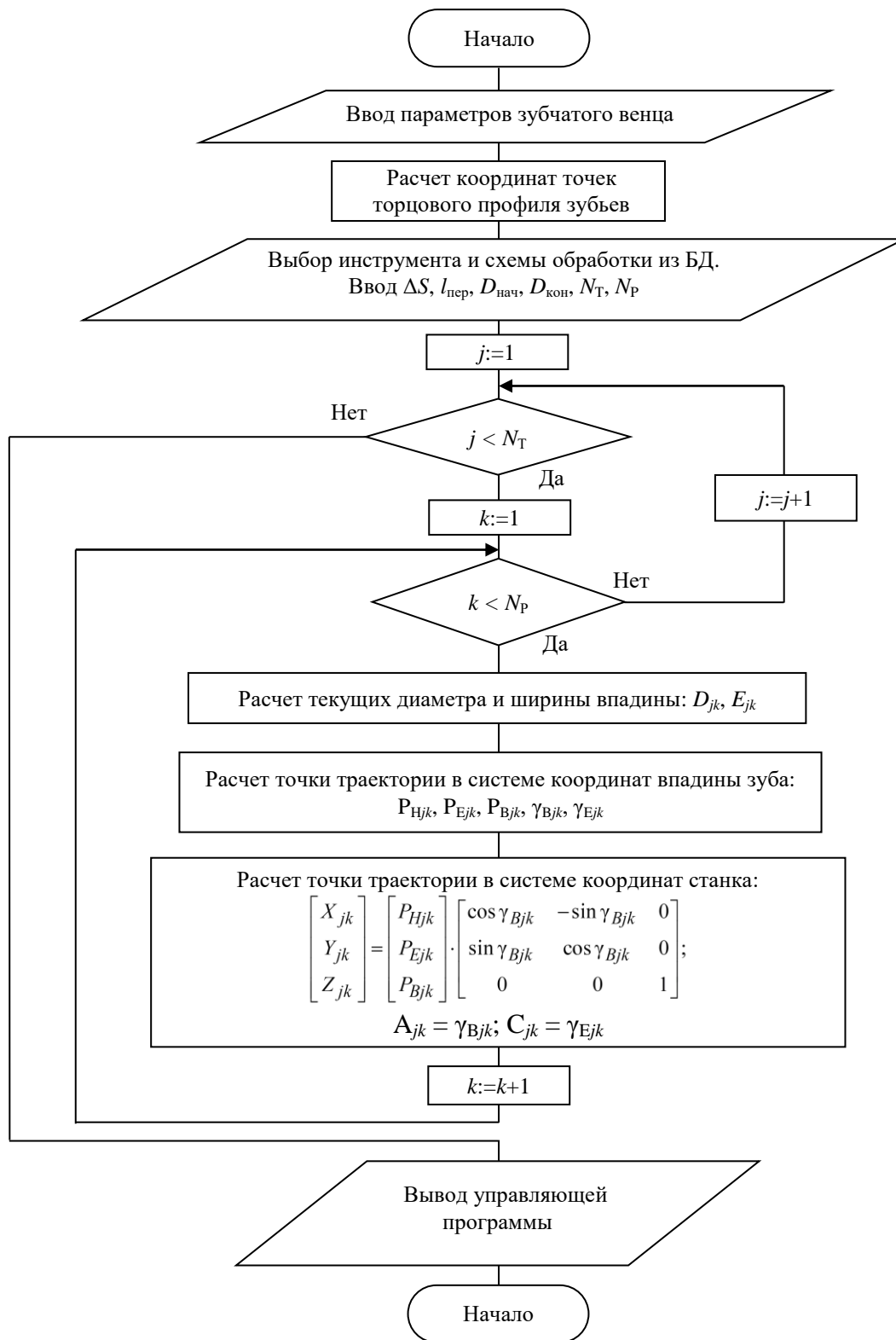


Рис. 4. Алгоритм расчета траекторий обработки зубьев универсальным инструментом на станке с ЧПУ  
 Fig. 4. An algorithm for calculating paths of tooth machining with a universal tool on a CNC machine



Входными данными являются параметры зубчатого колеса, на выходе же формируется текстовый файл управляющей программы для станка. Проверка правильности назначения параметров обработки выполняется в окне имитации процесса обработки впадины зубчатого колеса.

### Результаты исследования и их обсуждение

Проверка теоретических положений прове-

дена при обработке зубчатого вала автоматической коробки переключения передач большегрузного автомобиля. Параметры зубчатого венца приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, венец имеет нестандартный модуль и исходный контур, что не позволяет осуществить подбор стандартной червячной фрезы. Заказ специального инструмента приведет к потерям времени (4-6 месяцев) и затратам (до 100 тыс. руб.).

Таблица 2. Параметры зубчатого венца

Table 2. Ring gear parameters

Параметр		Обозначение	Величина
Модуль нормальный		$m_n$	4,35
Число зубьев		$z$	23
Угол наклона винтовой линии зубьев		$\beta$	22°30'
Направление наклона винтовой линии зубьев		–	Левое
Нормальный исходный контур	Угол профиля	$\alpha$	24°
	Коэффициент высоты головки	$h_a^*$	1,14
	Коэффициент высоты ножки	$H_f^*$	1,36
	Коэффициент радиального зазора	$c^*$	0,3
	Коэффициент радиуса кривизны	$\rho_f^*$	0,367
Коэффициент смещения		$x$	-0,087
Делительный диаметр		$D$	107,324
Основной диаметр		$D_b$	94,213
Диаметр вершин зубьев		$D_a$	111,27 <sup>-0,14</sup>
Ширина зубчатого венца		$B$	64
Степень точности по ГОСТ ИСО 1328-2017		–	7
Допуск на погрешность профиля		$F_{\alpha T}$	0,019
Допуск на погрешность направления зуба		$F_{\beta T}$	0,020
Радиальное биение зубьев		$F_{RT}$	0,037
Погрешность окружного шага		$f_p$	0,013
Накопленная погрешность окружного шага		$F_p$	0,041
Длина общей нормали		$W$	43,54 <sup>-0,08</sup> <sub>-0,18</sub>
Число зубьев на длине общей нормали		$Z_W$	4
Материал детали		–	18ХГР
Толщина центованного слоя		$h_{ц}$	0,6-1,0
Твердость поверхности		$H_{п}$	59-63HRC
Прочность сердцевин		$\sigma_c$	1000 Н/мм <sup>2</sup>

Экспериментальная обработка реализована на пятикоординатном токарном обрабатывающем центре с ЧПУ фирмы «Mazak». Обработка выполняется дисковыми фрезами фирмы «Sandvik Coromant». Черновая обработка впадин зубчатого колеса выполняется фрезой Coromill 162, чистовая обработка фрезой Coromill 161 (рис. 6).

Технологические возможности данного станка позволяют обработать этими фрезами как отдельные шестерни, так и вал-шестерни. На рис. 7 показан процесс обработки вала-шестерни с косозубым цилиндрическим венцом чистовой фрезой модели Coromill 161 (диаметр 80 мм, 12 зубьев, материал неперегретых пластин 1025, P10).

Проверка полученных геометрических показателей зубчатых колес выполняется на специализированной зубоизмерительной машине «Gleason». Характерные профилограммы профилей зубьев обработанных зубчатых колес приведены на рис. 8. В зависимости от движений фрезы в чистовом переходе обработки поверхностей зубчатых колес характер профиля отличается. При продольном перемещении дисковой фрезы на эвольвентном профиле формируются характерные следы (рис. 8, а) величиной 0,029-0,043 мм.

Полученная погрешность формы профиля является следствием значительных продольных рисков от инструмента на боковых сторонах зубьев. Данная погрешность допустима для предварительного нарезания зубьев под последующее шлифование (величина припуска на сторону под шлифование составляет величину от 0,12-0,15 мм). Остальные погрешности зубчатого венца не превышают требований по 7-й степени точности.

При поперечном перемещении дисковой фрезы погрешность формы профиля незначительна (рис. 8, б), ее величина до 0,005 мм. Поперечное перемещение фрезы формирует значительно более точный эвольвентный профиль. По результатам поперечной обработки погрешности зубчатого венца не превышают требований по 6-й степени точности. Шероховатость боковых сторон зубьев составила Ra 1,25 по высоте профиля и Ra 0,4 по ширине венца. Обработка поперечным перемещением дисковой фрезы увеличивает длительность процесса обработки до 1,5 раз по сравнению с обработкой только продольными перемещениями фрезы, что необходимо учитывать при утверждении оптимального процесса обработки зубчатых колес.

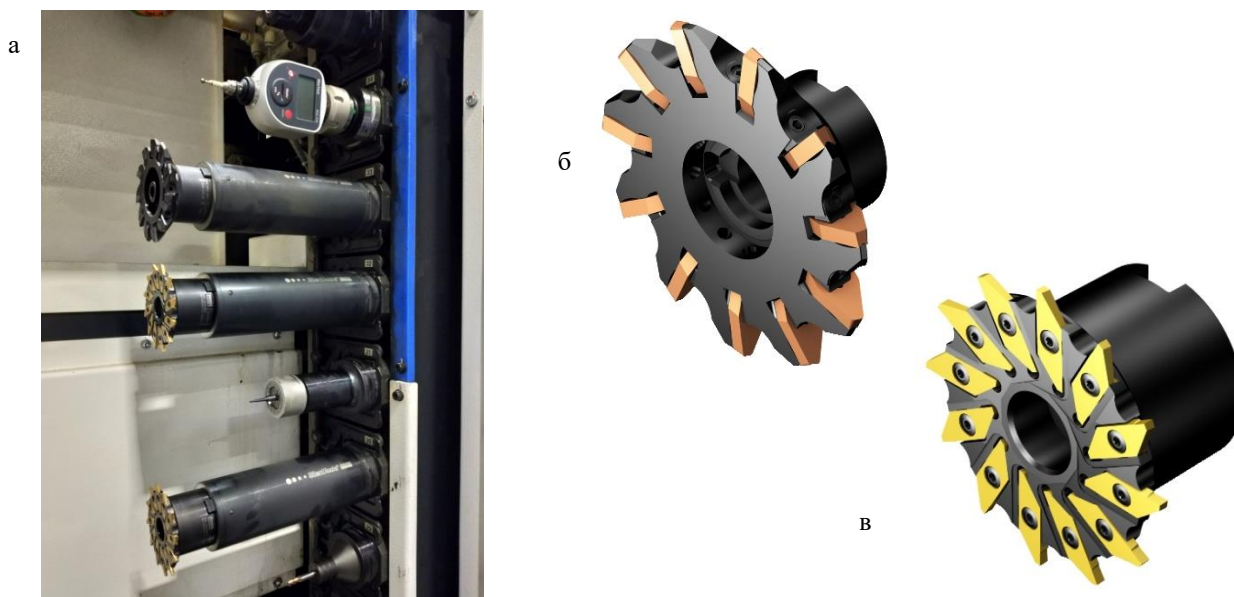


Рис. 6. Дисковые фрезы производства Sandvik Coromant для обработки впадин зубьев: а – установленные в инструментальном магазине станка Integrex I300S фирмы «Mazak»; б – фреза Coromill 162; в – фреза Coromill 161

Fig. 6. Disk cutters by Sandvik Coromant for gear gullet machining: а are installed in a tool storage device of the Integrex I300S machine by Mazak; б is Coromill 162 cutter; в is Coromill 161 cutter

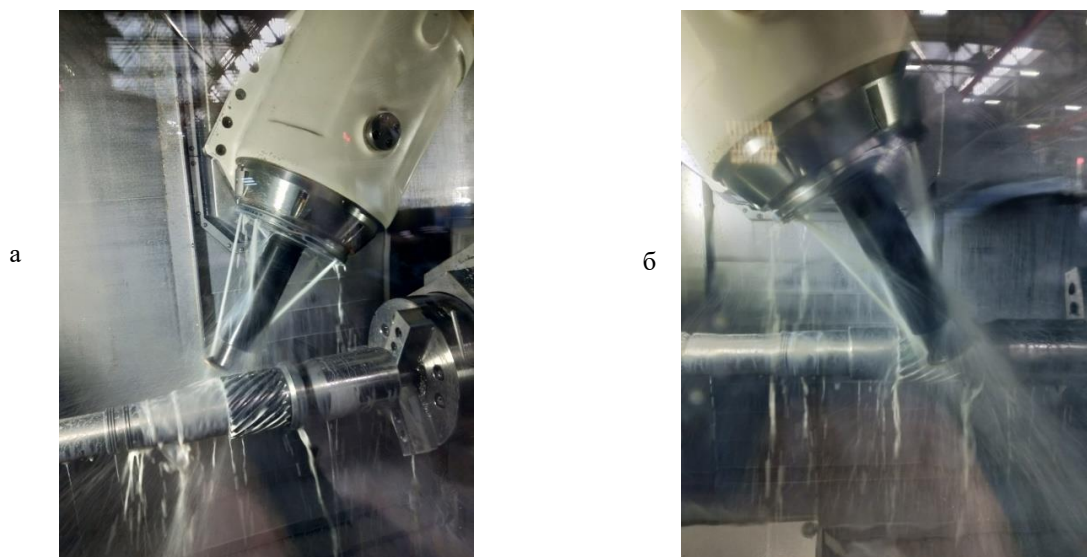


Рис. 7. Чистовая обработка впадин зубчатого венца опытной детали дисковой фрезой Coromill 161 при поперечном перемещении: а – по левой стороне; б – по правой стороне впадины зубчатого колеса  
 Fig. 7. Finishing of ring gear gullets of an experimental part with a Coromill 161 disk cutter, when moving transversely: a is on the left side; б is on the right side of gear gullets

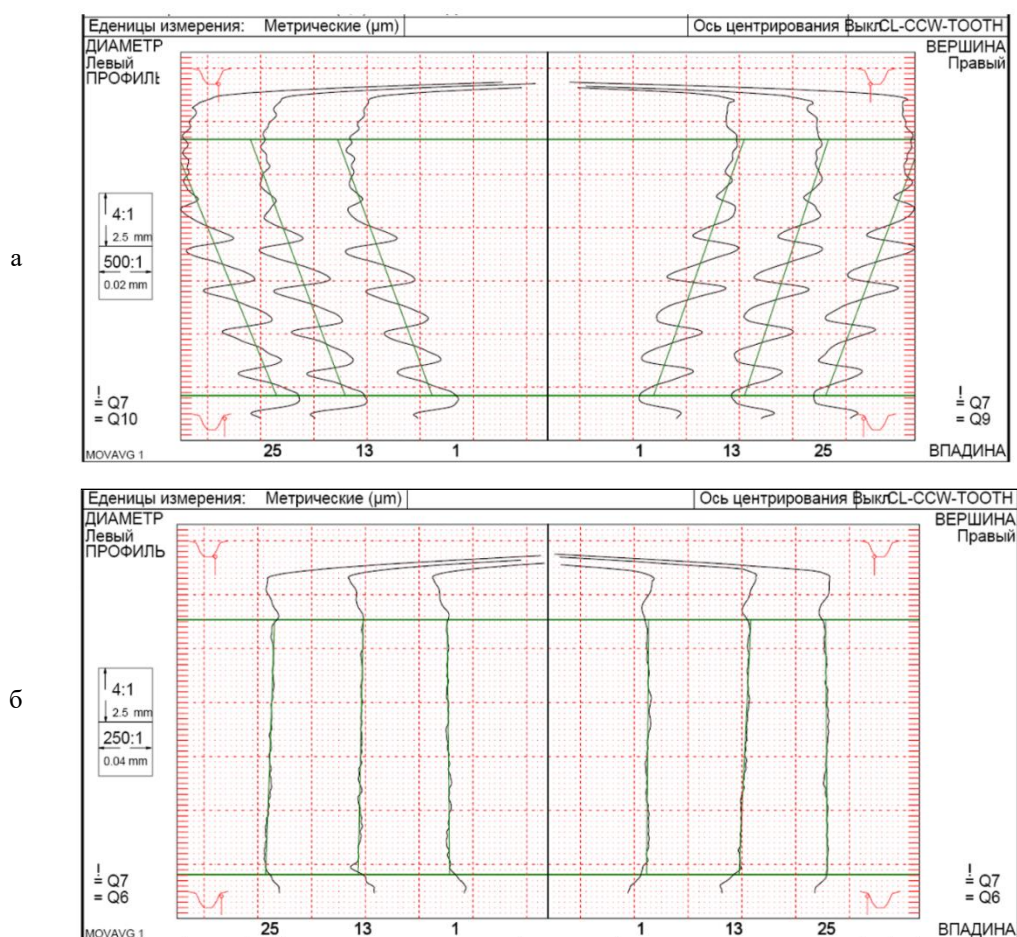


Рис. 8. Профилограммы эвольвентного профиля косозубых цилиндрических колес, обработанных при перемещениях дисковой фрезы: а – продольном; б – поперечном  
 Fig. 8. Profilograms of the involute profile of cylindrical helical gears machined, when moving the disk cutter: a is longitudinally; б is transversely



### Заключение

Таким образом, впервые в отечественном автомобилестроении разработана технология изготовления, а также программный модуль, позволяющий сформировать управляющие программы обработки косозубых и прямозубых цилиндрических венцов (в том числе многовенцовых валов-шестерен) универсальным дисковым инструментом. Формирование управляющих программ может быть выполнено наладчиком или технологом непосредственно на рабочем месте.

По точности геометрических показателей зубчатых венцов данный способ превосходит способы обработки дисковыми модульными фрезами и другим универсальным инструментом и не уступает фрезерованию червячными зуборезными фрезами. При наличии в станочном парке предприятия пятикоординатного станка с ЧПУ обработку опытных партий зубчатых венцов (по 3-10 шт.) целесообразнее обрабатывать стандартным дисковым инструментом. Типовой проблемой подготовки производства изготовления узлов с зубчатыми передачами является необходимость изготовления специализированного зубчатого инструмента.

В условиях крупного машиностроительного предприятия необходимо проектирование, открытие заказа и изготовление специализированного зуборезного инструмента (червячные фрезы и зубофасочные фрезы, долбяки, обкаточные резцы), инструментальной и заготовительной оснастки в зависимости от параметров изготавливаемого зубчатого колеса, которое занимает от 3-х до 6-ти месяцев. В отдельных случаях заказы размещаются у иностранных производителей инструмента. Стоимость изготовления фрез может достигать от 50 до 300 тыс. руб. Например, освоение автоматической коробки передач потребовало изготовления 80-ти вариантов зубчатых венцов на различных деталях – шестернях, вал-шестернях и синхронизаторах в количестве от 5 до 10 шт. Применение разработанной программы позволило полностью избежать изготовления специализированного инструмента и инструментальной оснастки. Для рассматриваемого примера подготовки производства изготовления КПП обеспечена экономия средств около 9 млн руб. и сокращение сроков изготовления опытных коробок от 6-ти месяцев до года.

### Список источников

1. Лелюхин В.Е. Классификация методов формообразования поверхностей при изготовлении деталей //

Вестник инженерной школы ДВФУ. 2012. №1(10). С. 14-17.

2. Козлов А.М., Савенков Д.Р., Козлов А.А. Расчет и проектирование модульных фрез для обработки крупномодульных зубчатых колес // Современные материалы, техника и технологии. 2019. №2(23). С. 26-33.
3. Козлов А.М., Савенков Д.Р. Расширение технологических возможностей универсального зубофрезерного станка при нарезании крупномодульных зубчатых колес // Современные материалы, техника и технологии. 2018. №6(21). С. 25-31.
4. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В., Козлова О.В. Концевая однозубая модульная фреза для финишной обработки зубчатых колес // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 8. С. 232-237.
5. Ляшков А.А. Формообразование винтовой поверхности детали угловой фрезой // Инженерный вестник Дона. 2012. №3(21). С. 331-335.
6. Малахов Г.В., Михайлов А.В., Савичев И.А. Исходные технологические параметры зубообработки двухрядными резцовыми головками // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 1. С. 117-125.
7. Малахов Г.В., Михайлов А.В., Савичев И.А. Схемы чистовой зубообработки резцовыми головками методами огибания // Известия ТулГУ. 2016. (08). Ч. 1. С. 110-116.
8. Балков В.П. Современные технологические подходы при изготовлении цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента / Каменецкий Л.И., Кириутин А.С., Негинский Е.А., Отт О.С., Пищулин Д.Н. // Металлообработка. 2015. №4(88). С. 2-6.
9. Артюхин Л.Л. Создание высокоэффективного специального инструмента для обработки крупномодульных зубчатых колес / Ветрова Н.А., Отт О.С., Надольский М.А. // Наука и образование. 2012. №9. С. 61-68.
10. Отт О.С. Разработка сборных дисковых фрез с кинематическим обкаточным движением для обработки зубчатых колес крупного модуля на станках с ЧПУ; автореф. ... канд. техн. наук. М.: Станкин, 2011. С. 24.
11. Игнатъева А.П. Повышение эффективности предварительной обработки крупномодульных малозубых колес // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. №3(08). С. 296-298.
12. Каталог Sandvik Coromant. Фрезерование – 2019. 245 с.
13. Хаятт Г. и др. Обзор новых стратегий производства зубчатых колес // Procedia CIRP. 2014, vol. 14, pp. 72-76.
14. Sichosz P. of article: „Innowacyjne narzędzia i technologie obróbki skrawaniem” (“Innovative machining tools and technologies”) // Mechanik. 2018, vol. 91, no. 10, pp. 794-802.

15. Gosselin C. Multi axis CnC manufacturing of straight and spiral bevel gears // *Advanced Gear Engineering*. 2018, pp. 167-204.
16. Буке Дж. и др. Быстрое изготовление прототипов зубчатых колес – сравнение технологий // *Procedia CIRP*. 2014, vol. 14, pp. 77-82.
17. Клоке Ф., Брум М., Штаудт Дж. Качество и поверхность зубчатых колес, изготовленных фрезерованием произвольной формы стандартными инструментами // *Материалы международной конференции по зубчатым колесам, Лион, Франция. Лион, 2014. С. 26-28.*
18. Сокращение времени изготовления за счет высокоточного 5-осевого фрезерования прототипа зубчатого колеса / Малек О., Мельник К., Мартенс К., Джейкобс Т., Буке Дж., Ауверс У., Хааф П.Т., Лауверс Б. // *Материалы 7-й конференции CRIP по высокопроизводительному резанию НРС, Хемниц, Германия, 31 мая – 2 июня 2016 года. Хемниц, 2016. Т. 46. С. 440-443.*
19. Гайзер У. Производство 5-осевых зубчатых колес становится практичным // *Технология зубчатых колес*. 2017. С. 32-34.
20. Chlost M., Gdula M. A new method of the positioning and analysis of the roughness deviation in five-axis milling of external cylindrical gear // *acta mechanica et automatica*. 2022, vol. 16, no. 3, pp. 207-214.
21. Бергс Т. и др. Исследования по пятиосевому фрезерованию и последующему пятиосевому шлифовку зубчатых колес // *Procedia CIRP*. 2022. Т. 107. С. 705-711.
22. Глейзер Т. и др. Жесткая обработка цилиндрических зубчатых колес методом invomillingtm // *Журнал по производству и обработке материалов*. 2018. Т. 2. №3. С. 44.
23. Захерт С. и др. Оценка влияния различных параметров фрезерования и износа инструмента на зону обода 5-осевой фрезерованной крупной шестерни // *Procedia CIRP*. 2022. Т. 108. С. 43-48.
5. Lyashkov A.A. Shaping of the screw surface of a part with an angle cutter. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of the Don]. 2012;(3(21)):331-335. (In Russ.)
6. Malakhov G.V., Mikhailov A.V., Savichev I.A. Initial technological parameters of tooth machining with two-row cutter heads. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2016;(8):117-125. (In Russ.)
7. Malakhov G.V., Mikhailov A.V., Savichev I.A. Flow charts of finishing tooth machining with cutter heads by bending methods. *Izvestiya TulGU* [Proceedings of Tula State University]. 2016;(08):110-116. (In Russ.)
8. Balkov V.P., Kamenetsky L.I., Kiryutin A.S., Neginisky E.A., Ott O.S., Pishchulin D.N. Modern technological approaches to manufacturing cylindrical gears in small-scale production and features of calculation and design of gear-cutting tools. *Metalloobrabotka* [Metal Forming]. 2015;(4(88)):2-6. (In Russ.)
9. Artyukhin L.L., Vetrova N.A., Ott O.S., Nadolsky M.A. Design of a highly efficient special tool for machining coarse-pitch gears. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2012;(9):61-68. (In Russ.)
10. Ott O.S. Razrabotka sbornykh diskovykh frez s kinematischeskim obkatochnym dvizheniem dlya obrabotki zubchatykh koles krupnogo modulya na stankakh s ChPU; avtoref. ... kand. tekhn. nauk [Development of interlocking side milling cutters with a kinematic rolling motion for CNC machining of coarse-pitch gears: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Moscow: STANKIN, 2011, 24 p. (In Russ.)
11. Ignatieva A.P. Improving efficiency of pretreatment of coarse-pitch small-toothed gears. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki* [Currently Relevant Issues of Aviation and Cosmonautics]. 2013;(3(08)):296-298. (In Russ.)
12. *Katalog Sandvik Coromant. Frezerovanie – 2019.* [Sandvik Coromant catalog. Milling – 2019]. 245 p. (In Russ.)
13. Hyatt G. et al. A review of new strategies for gear production. *Procedia CIRP*. 2014;14:72-76.
14. Cichosz P. Innovative machining tools and technologies. *Mechanik*. 2018;91(10):794-802.
15. Gosselin C. Multi axis CNC manufacturing of straight and spiral bevel gears. *Advanced Gear Engineering*. 2018: 167-204.
16. Bouquet J. et al. Fast production of gear prototypes – A comparison of technologies. *Procedia CIRP*. 2014;14:77-82.
17. Klocke F., Brumm M., Staudt J. Quality and surface of gears manufactured by free form milling with standard tools. *Proceedings of the International Conference on Gears, Lyon, France*. 2014:26-28.
18. Malek O., Mielnik K., Martens K., Jacobs T., Bouquet J., Auwers W., Haaf P.T., Lauwers B. Lead time reduction by high precision 5-axis milling of a prototype gear. *Procedia CIRP*. 2016;46:440-443.

### References

1. Lelyukhin V.E. Classification of methods of forming surfaces in manufacturing of parts. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU* [Bulletin of School of Engineering of Far Eastern Federal University]. 2012;(1(10)):14-17. (In Russ.)
2. Kozlov A.M., Savenkov D.R., Kozlov A.A. Calculation and design of gear-milling cutters for machining coarse-pitch gears. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Machinery and Technologies]. 2019;(2(23)):26-33. (In Russ.)
3. Kozlov A.M., Savenkov D.R. Expansion of technological capabilities of a universal gear milling machine, when cutting coarse-pitch gears. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Machinery and Technologies]. 2018;(6(21)):25-31. (In Russ.)
4. Protasyev V.B., Istotsky V.V., Kozlova O.V. End single-tooth gear-milling cutters for finishing of



19. Gaiser U. 5-axis gear manufacturing gets practical. *Gear Technology*. 2017:32-34.
20. Chlost M., Gdula M. A new method of the positioning and analysis of the roughness deviation in five-axis milling of external cylindrical gear. *Acta Mechanica et Automatica*. 2022;16(3):207-214.
21. Bergs T. et al. Investigations on five-axis milling and subsequent five-axis grinding of gears. *Procedia CIRP*. 2022;107:705-711.
22. Glaser T. et al. Hard machining of spur gears with the InvoMilling<sup>TM</sup> method. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2018;2(3):44.
23. Zachert C. et al. Evaluation of the influence of different milling parameters and tool wear on the rim area of a 5-axis milled large gear. *Procedia CIRP*. 2022;108:43-48.

Поступила 08.06.2023; принята к публикации 21.06.2023; опубликована 25.09.2023  
Submitted 08/06/2023; revised 21/06/2023; published 25/09/2023

**Кондрашов Алексей Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,  
Набережные Челны, Россия. Email: kondrashovag@mail.ru.

**Сафаров Дамир Тамасович** – кандидат технических наук, доцент,  
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,  
Набережные Челны, Россия. Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

**Фасхутдинов Айрат Ибрагимович** – кандидат технических наук, доцент,  
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,  
Набережные Челны, Россия. Email: fashutdinovai@gmail.com.

**Казаргельдинов Рамиль Раилевич** – ведущий инженер-конструктор ПАО «КамАЗ»,  
Набережные Челны, Россия.

**Aleksei G. Kondrashov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,  
Naberezhnye Chelny, Russia. Email: kondrashovag@mail.ru

**Damir T. Safarov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,  
Naberezhnye Chelny, Russia. Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

**Ayrat I. Faskhutdinov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,  
Naberezhnye Chelny, Russia. Email: fashutdinovai@gmail.com

**Ramil R. Kazargeldinov** – Lead Design Engineer, PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia.