

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов*

Описывается автоматизированная система моделирования и анализа, позволяющая создавать твердотельные компьютерные модели зубьев зубчатых колес путем эмуляции их обработки различными методами. Полученные модели позволяют в дальнейшем оценивать точность формирования зубчатого профиля, осуществлять компоновку различных передач и производить их инженерный анализ.

В настоящее время проектирование зубчатых передач происходит в основном аналитически. В этом случае результат расчета составляет набор параметров, который не дает возможности без изготовления пробного экземпляра представить геометрию профилей зубьев зубчатых колес.

Проведенный анализ существующих программных продуктов показал, что на настоящий момент не существует универсальных разработок, позволяющих произвести генерацию более чем одного типа зубчатых колес. Кроме того, указанные программные продукты представляют только графическое изображение зубчатого колеса без возможности дальнейшего применения, а библиотеки САД-систем представляют лишь упрощенное изображение, которое не позволяет оценить геометрию рабочей поверхности зубьев.

В связи с этим создание автоматизированной системы моделирования, предназначенной для генерации компьютерной модели зубчатого колеса, которую можно было бы в дальнейшем редактировать и компоновать, осуществлять автоматизированный инженерный (силовой, кинематический и динамический) анализ стандартными САД и САЕ средствами, является актуальной задачей. Это позволит вместо трудоемкого и дорогостоящего пробного нарезания использовать компьютерное моделирование процесса формирования зубьев различным зуборезным инструментом.

Анализ различных методов обработки зубчатых колес показал, что основными являются методы обработки профиля зуба долбяком и инструментом на основе производящего реечного контура. При этом в ряде случаев перемещение инструмента относительно заготовки может происходить по криволинейной траектории.

Целью работы являлось создание автоматизированной системы моделирования способов формирования зубьев колес различных типов зубчатых передач. Разработанная система предоставляет широкие возможности проектировщикам зубчатых передач за счет следующих программ, включенных в ее состав.

1. Программа эмуляции формообразования эвольвентного цилиндрического зубчатого колеса инструментом реечного типа [1].

Основными преимуществами данного решения является то, что существует возможность, варьируя параметрами производящего реечного контура (рис. 1) и параметрами процесса обката, получить твердотельную компьютерную модель зубчатого колеса (рис. 2). Программа позволяет эмулировать процесс зубонарезания нетрадиционных зубчатых передач, например, с использованием несимметричного производящего реечного контура (рис. 3). Кроме того в процессе эмуляции возможно учитывать влияние технологических погрешностей на формирование профилей зубьев колес путем внесения поправок в параметры зуборезного инструмента и схему обката. Программа позволяет рассчитывать контрольный размер по роликам для нарезаемого колеса, что впоследствии позволяет формировать конструкторскую документацию.

2. Программа для эмуляции процесса формообразования эвольвентных зубчатых колес с внешними и внутренними зубьями (рис. 4, 5) долбяком [2].

Формирование модели долбяка при этом происходит аналогично вышеописанному формообразованию цилиндрического колеса с внешними зубьями производящим реечным контуром.

Программа позволяет получать модели зубчатых колес с внешними и внутренними зубьями, а также рассчитывать межцентровое расстояние станочного зацепления  $a_w$  и контрольный размер по роликам.

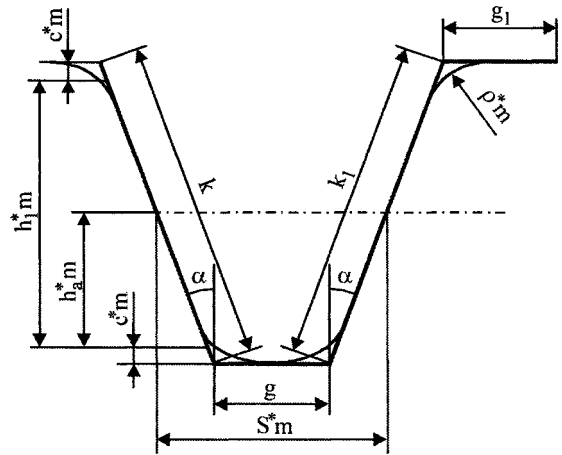


Рис. 1. Параметры производящего реечного контура

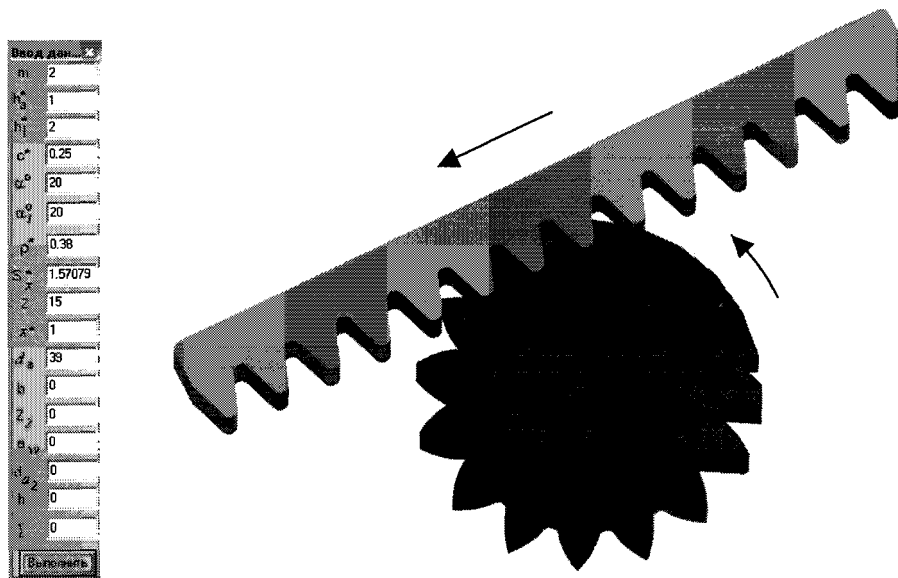


Рис. 2. Пример нарезания зубчатого колеса стандартной производящей рейкой ( $m=2, z=15, x=1$ )

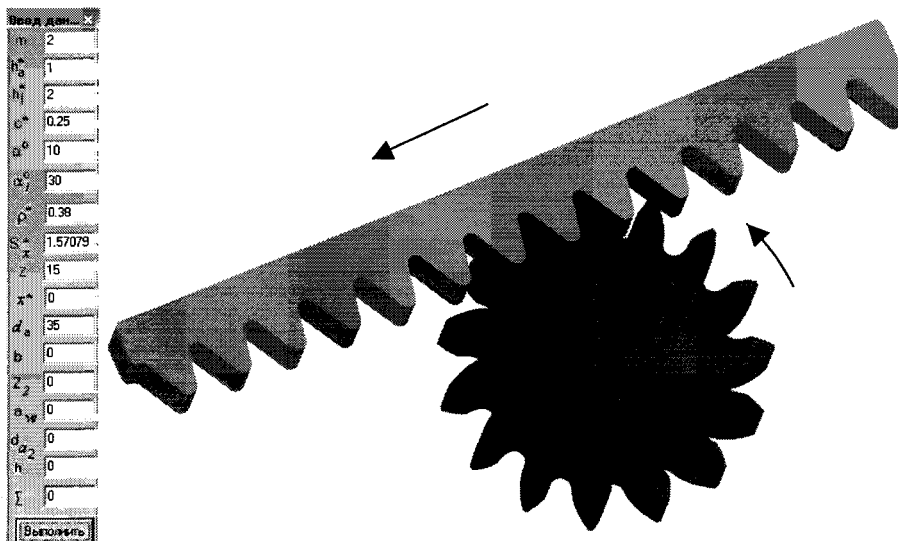


Рис. 3. Пример нарезания зубчатого колеса производящей рейкой с несимметричным профилем ( $m=2, z=15, x=1$ )

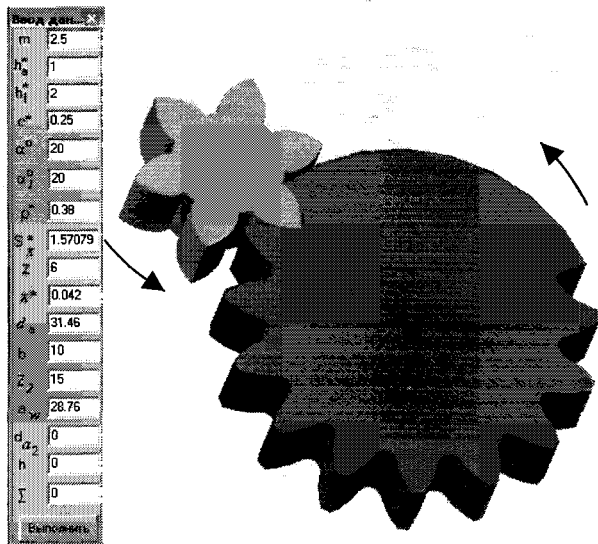


Рис. 4. Пример нарезания зубчатого колеса долбяком ( $m=2,5, z_0=6, x_0=0,042, z=15, a_w=28,76$ )

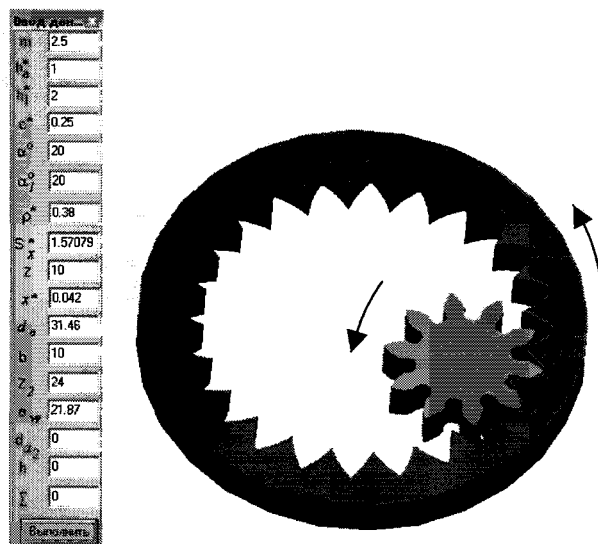


Рис. 5. Пример нарезания зубчатого колеса долбяком ( $m=2,5, z_0=10, x_0=0,042, z=24, a_w=21,87$ )

3. Программа для эмуляции процесса формообразования неэвольвентных конических зубчатых колес (рис. 6) долбяком с внешними зубьями и межосевым углом  $\Sigma$  [3].

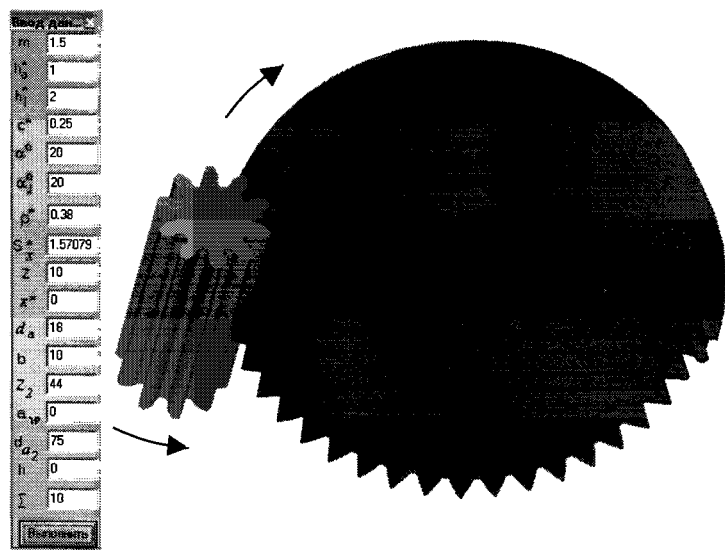


Рис. 6. Пример нарезания конического зубчатого колеса долбяком с внешними зубьями ( $m=1,5, z_0=10, x_0=0, z=44, \Sigma=10^\circ$ )

4. Программа для эмуляции процесса формообразования неэвольвентных плоских зубчатых колес (рис. 7) долбяком [4].

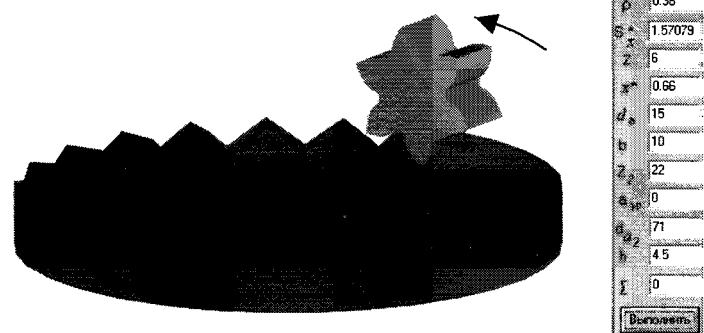


Рис. 7. Пример нарезания неэвольвентного плоского зубчатого колеса долбяком ( $m=2, z_0=6, x_0=0,66, z=22$ )

5. Программа для эмуляции процесса формообразования неэвольвентных зубчатых колес с внешними зубьями (рис. 8) производящим реечным контуром, перемещаемым по задаваемой траектории [5].

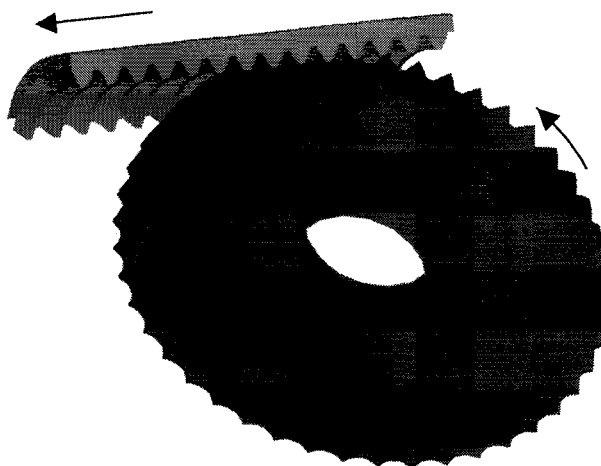
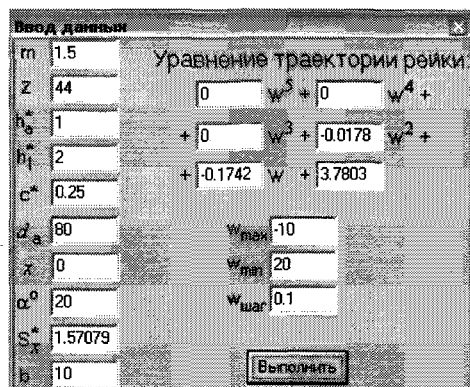


Рис. 8. Пример нарезания неэвольвентного зубчатого колеса производящим реечным контуром, перемещающимся по заданной траектории ( $m=1,5, z=44$ , уравнение траектории  $y(w)=-0,0178w^2-0,1742w+3,7803$ )

6. Программа для эмуляции процесса формообразования неэвольвентных зубчатых колес с внешними зубьями (рис. 9) долбяком с внутренними зубьями.

Разработанные программы дают возможность получать твердотельные модели различных зубчатых колес.

Преимуществом представленной автоматизированной системы являются возможности синтеза и анализа зубчатых передач, построенных на основе полученных компьютерных твердотельных моделей стандартными средствами CAD.

Так, например, с помощью программ, представленных в пунктах 1 и 2 данной статьи был разработан программно-методический комплекс «Эмуляция зацеплений волновых и планетарных зубчатых передач» [6]. Он предназначен для компоновки волновых и планетарных зубчатых передач. В его состав входят: программа для получения компьютерной модели гибкого зубчатого колеса [1]; программа для получения компьютерной модели жесткого зубчатого колеса [2]; файл шаблона Microsoft Excel предназначенный для подготовки данных для построения кулачка; программа для получения компьютерной модели кулачка; алгоритм взаимного расположения гибкого и жесткого колес передачи; алгоритм компоновки волнообразователя; алгоритм компоновки волновой передачи.

После формирования зубчатых колес и кулачка осуществляется компоновка передачи. Для этого комплекс содержит описания действий для достижения необходимого взаиморасположения зубчатых колес, экспорта компьютерных моделей в пакет САПР SolidWorks и компоновки гибкого колеса на кулачек.

После компоновки передачи возможен просмотр интересующей зоны зацепления в требуемом масштабе, например, для оценки многопарности зацепления (рис. 10, а) и интерференции зубьев на выходе из зацепления (рис. 10, б), с возможностью выдачи на печать.

Аналогичным образом может осуществляться анализ планетарных передач (рис. 11).

Данный комплекс был использован при анализе геометрии волновых зубчатых передач электромеханических приводов космической техники на предприятии РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара). Были проанализированы 32 волновые передачи электромеханических приводов раз-

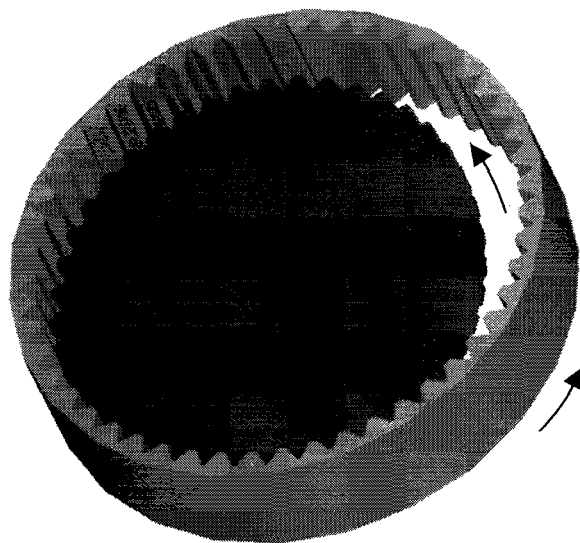


Рис. 9. Пример нарезания неэвольвентного конического зубчатого колеса долбяком с внутренними зубьями ( $m=1,5, z_0=52, x_0=2,516, z=46, \Sigma=10^\circ$ )

личной геометрии. В ходе анализа были выявлены конструктивные и технологические ошибки элементов передач, приводящие к интерференции зубьев в зацеплении. В результате были выданы рекомендации по доводке приводов с учетом выявленных ошибок.

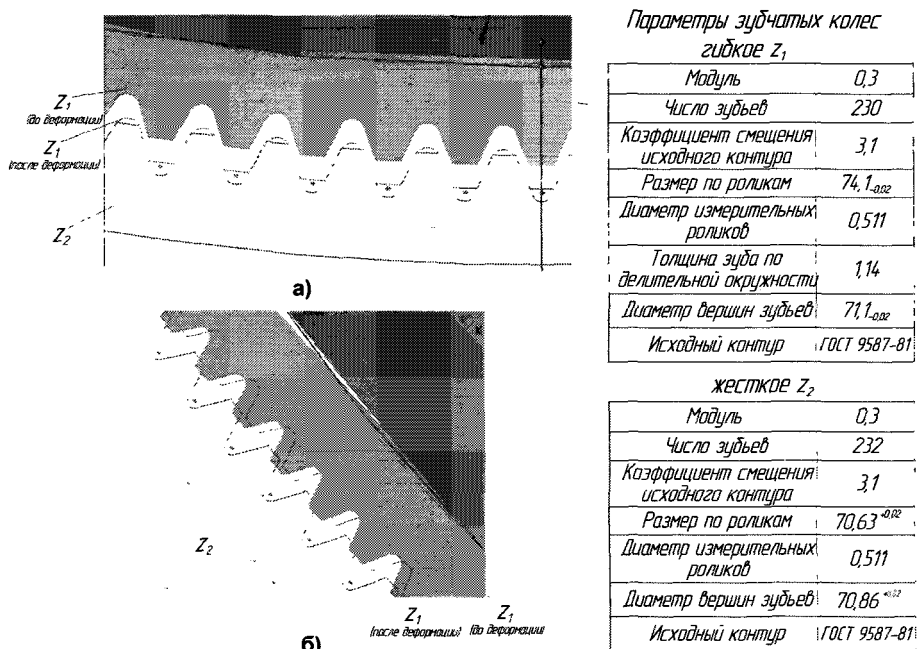


Рис. 10. Пример анализа геометрии волновой передачи

Программа, представленная в пункте 4 статьи, была использована при проектировании плоскоколесных передач самоблокирующегося дифференциала автомобиля [7]. Полученные твердотельные модели колес применялись для анализа напряженно-деформированного состояния зубьев колес [8].

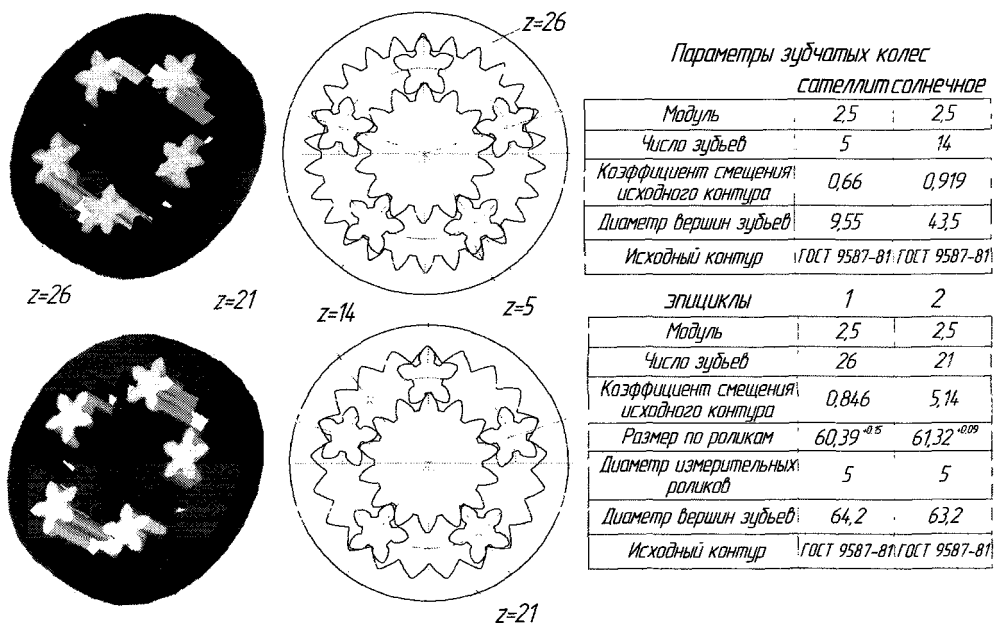


Рис. 11. Пример анализа геометрии планетарной передачи

При проектировании планетарных редукторов с внутренними цилиндрическими зацеплениями электромеханических приводов космической техники (рис. 12) использовались программы, представленные пунктами 5 и 6. Программа эмуляции обработки неэвольвентного конического зубчатого колеса долбяком позволила получить теоретические профили зубьев в каждом торцовом сечении, а программа эмуляции обработки неэвольвентного конического зубчатого ко-

леса производящим реечным контуром, перемещаемым по криволинейной траектории [5] способствовала практической реализации способа нарезания конических колес с неэвольвентным профилем эвольвентной червячной фрезой [9].

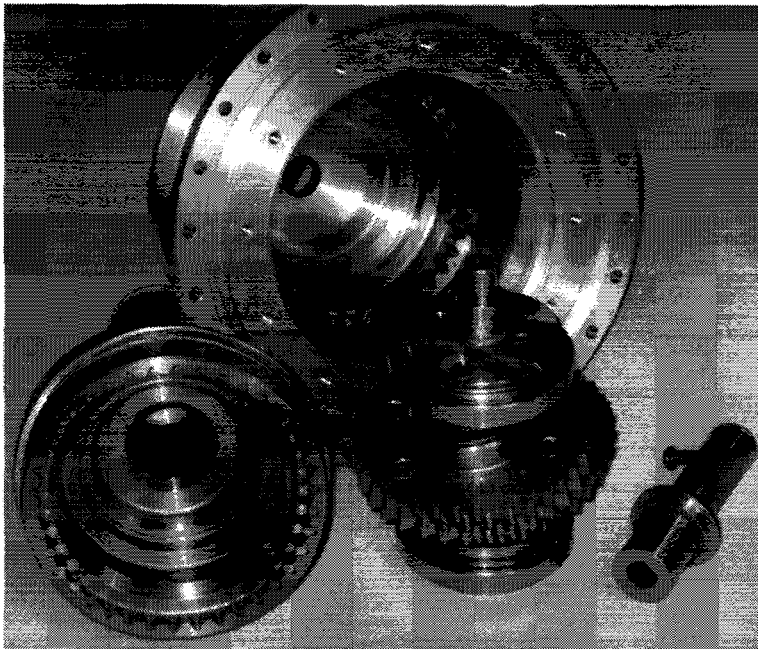


Рис. 12. Элементы планетарного редуктора с цилиндроконическими зубчатыми зацеплениями

Приведенные примеры подтверждают универсальность и эффективность предложенной автоматизированной системы моделирования и анализа способов формирования зубьев зубчатых колес.

#### Литература

1. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6853. Эмуляция нарезания эвольвентного цилиндрического зубчатого колеса производящим реечным контуром / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов // ОФАП. - 2006.
2. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6854. Эмуляция обработки зубчатого колеса с внешними и внутренними зубьями долбяком / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов // ОФАП. - 2006.
3. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7141. Эмуляция обработки неэвольвентного конического зубчатого колеса с внешними зубьями долбяком с внешними зубьями / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов // ОФАП. - 2006.
4. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6855. Эмуляция обработки плоского зубчатого колеса долбяком / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов. // ОФАП. - 2006.
5. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7230. Эмуляция обработки зубчатого колеса производящим реечным контуром, перемещаемым по задаваемой траектории / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов // ОФАП. - 2006.
6. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7079. Эмуляция зацеплений волновых и планетарных зубчатых передач / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов // ОФАП. - 2006.
7. Патент на полезную модель № 581196. Самоблокирующийся дифференциал / Б.А. Лопатин, Р.И. Зайнетдинов, ВТ. Сапрыкин и др. - Б.И. - 10.11.2006. № 31.
8. Калашников, Д.Б. Автоматизация расчета на прочность зубьев плоскоколесных передач с применением метода конечных элементов / Д.Б. Калашников // Технология машиностроения. - М; Машиностроение, 2007. - №10. - С.67-69.
9. Патент на изобретение № 2175593. Способ нарезания зубьев конической шестерни цилиндро-конической передачи / Б.А. Лопатин, Р.И. Зайнетдинов, О.Н. Цуканов, СВ. Плотникова. - Б.И. - 10.11.2001. - М 31.