

## **Автоматизированное проектирование волновых редукторов с телами качения<sup>1</sup>**

Н.В. Крылов, С.Л. Самсонович, В.С. Степанов

### **Аннотация**

Рассмотрена возможность автоматизации проектирования редукторов электромеханических приводов на основе волновых передач с телами качения. Определены основные принципы, положенные в основу создания унифицированного модуля передачи. Рассмотрена автоматизация проектирования трехмерных моделей основных и вспомогательных деталей волновой передачи с телами качения, сборочной единицы и чертежей. Приведен пример автоматизированного проектирования двухступенчатого редуктора на основе унифицированного модуля.

### **Ключевые слова**

электромеханические приводы; волновые передачи с телами качения; модульное построение редуктора; автоматизированное проектирование редуктора

### **Введение**

В настоящее время отечественной авиационной промышленностью разрабатываются и проходят испытания электромеханические приводы на основе вентильных электродвигателей и волновых передач с телами качения, предназначенные для управления рулевыми и вспомогательными аэродинамическими поверхностями, а также другими объектами регулирования, в том числе для резервированных и многоприводных систем управления [1, 2, 3].

Накопленный опыт сотрудников кафедры «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского авиационного института по разработке редукторов таких приводов для различных объектов управления свидетельствует о возможности

---

<sup>11</sup> Работа выполнена в рамках реализации ФПЦ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

создания унифицированных конструкций волновых передач с телами качения. Использование унифицированных конструкций значительно сокращает конструкторскую работу и объем проверочных расчетов, а также позволяет использовать отработанную технологию изготовления и сборки таких передач, обеспечивающую заданные технические характеристики.

Унификация конструкции рассматриваемых волновых передач с телами качения проводится с учётом следующих принципов:

- детали должны быть как можно проще и дешевле в изготовлении;
- должна обеспечиваться простая сборка-разборка редуктора;
- в конструкции должны по возможности использоваться одинаковые подшипники;
- соединения валов должны быть на эвольвентных шлицах (т.к. они наиболее компактны), причём на входном и выходном валах шлицевые соединения должны иметь одинаковые модули и наружные диаметры;
- валы редуктора должны быть полыми, причём внутренний диаметр полых валов должен быть равен или больше наружного диаметра шлицевого соединения.

Конструкторская работа в данном случае сводится к созданию трехмерных твердотельных моделей деталей и сборочных единиц унифицированного модуля волновой передачи с телами качения, построенного по перечисленным выше принципам, а также чертежей по этим моделям.

Для проектирования ступеней редуктора под конкретные параметры используется возможность параметризации моделей, реализованная в большинстве систем трехмерного твердотельного проектирования, позволяющая быстро конструировать однотипные или подобные друг другу детали и сборочные единицы, различающиеся только значениями параметров.

Параметризация позволяет представлять характерные размеры геометрии детали, расположение деталей в сборке и их количество в виде изменяемых параметров. Однажды привязав размер или количественное значение к параметру, можно быстро редактировать деталь или сборку в режиме реального времени, изменяя параметр в таблице. Это избавляет от необходимости редактирования исходного контура, эскиза, операции, что значительно сокращает время проектирования и снижает трудоёмкость. Более того, параметризация позволяет быстро создать подобную конструкцию, используя исходную в качестве прототипа, редактируя значения параметров.

Построение редуктора привода по приведенным выше принципам на основе параметризованной трехмерной модели унифицированного модуля волновой передачи с телами качения позволяет достичь:

- возможности построения привода, в состав которого входят редукторы такой конструкции, по модульной схеме;
- гибкости конструкции, которая позволяет, используя базовый блок, быстро и легко подогнать редуктор под разрабатываемый привод. Например, возможны следующие конструктивные доработки:
  - а) оснащение редуктора необходимыми креплениями и фланцами;
  - б) использование в качестве выходного вала жёсткого колеса при зафиксированном сепараторе;
  - в) для снижения массогабаритных показателей возможно объединение нескольких валов и корпусов в конструкции с двумя редукторами с целью исключить некоторые соединения и подшипники и сократить общую длину привода;
  - г) наличие полого вала позволяет пропускать через него другие валы (например, при сопряжении нескольких редукторов, расположенных на расстоянии друг от друга, одним общим валом) или провода;
  - д) эвольвентные шлицевые соединения позволяют использовать как обычные муфты, так и муфты, компенсирующие неточность позиционирования, а также разжимные муфты для устранения люфта;
  - е) конструкция позволяет, после незначительных доработок, устанавливать датчики угла любого типа.
- простоты при изменении конструктивных элементов, влияющих на передаточное число и нагрузочную способность редуктора:
  - а) количества периодов жёсткого колеса;
  - б) количества отверстий в каждом ряду сепаратора;
  - в) диаметров и длин роликов и дисков волнообразователей;
  - г) наружного диаметра редуктора;
  - д) диаметра и модуля шлицевого соединения;
  - е) размер подшипников.

Унифицированный модуль волновой передачи с телами качения может быть спроектирован одной сборочной единицей, состоящей из деталей, являющихся функциональными элементами волновой передачи, и вспомогательных деталей. К функциональным элементам относятся волнообразователь, состоящий из эксцентрикового

вала и дисков, сепаратор, тела качения и жесткое колесо[3]. Вспомогательными элементами являются кольца, втулки, а также стандартные изделия – подшипники и крепеж.

### **Построение параметрических моделей деталей унифицированного модуля**

Основными вспомогательными элементами редуктора и, пожалуй, самыми распространёнными деталями в конструкции волновой передачи с телами качения являются кольца и втулки, которые обычно служат в качестве проставочных элементов между основными деталями: подшипниками, валами, корпусом и сепаратором. Диски волнообразователя также обычно имеют форму кольца, поэтому детали именно такой формы требуют параметризации в первую очередь.

Простейшее кольцо создаётся с помощью операции «выталкивание», применённой к созданному на плоскости профилю. Профиль в данном случае представляет две концентрических окружности, например, с диаметрами 40 и 46 мм (см. рис. 1).

Чтобы сделать эти размеры переменными, достаточно всего лишь вместо числа ввести в соответствующее поле буквенное обозначение переменной. Такое обозначение может состоять из одной или нескольких букв латинского алфавита, цифр, знаков подчёркивания и тире (см. рис. 2). Обозначим наружный диаметр кольца буквой « $D$ », а внутренний диаметр буквой « $d$ » и оставим эти значения 46 и 40 мм соответственно. Затем используем операцию «выталкивание», чтобы придать будущему кольцу толщину. В поле значения длины выталкивания вместо числа снова вписываем буквенную переменную « $l$ », которая будет контролировать толщину кольца, задаём ей значение 3 мм и подтверждаем операцию (см. рис. 3). Получилась параметризованная модель кольца с тремя переменными:  $d$ ,  $D$  и  $l$ . Все эти переменные и их текущие значения отображаются в левом нижнем углу окна программы во вкладке «Переменные» (см. рис. 4). Здесь можно переименовать переменную, изменить её значение и назначить её «внешней», что означает возможность изменения её значения в контексте сборки, в которую будет входить деталь. Если переменная внешняя, то флажок напротив неё будет показан зелёным. Также можно написать комментарий, поясняющий назначение переменной. Для сложных деталей с большим количеством переменных настоятельно рекомендуется заполнять графу комментария для последующего удобства работы.

Опционально можно создать фаски на кромках кольца, задав величины катетов фасок, опять же, переменными.

Рассмотрим создание параметризованной модели втулки. Здесь требуется создать втулку с внутренним буртиком, в который будет упираться подшипник.

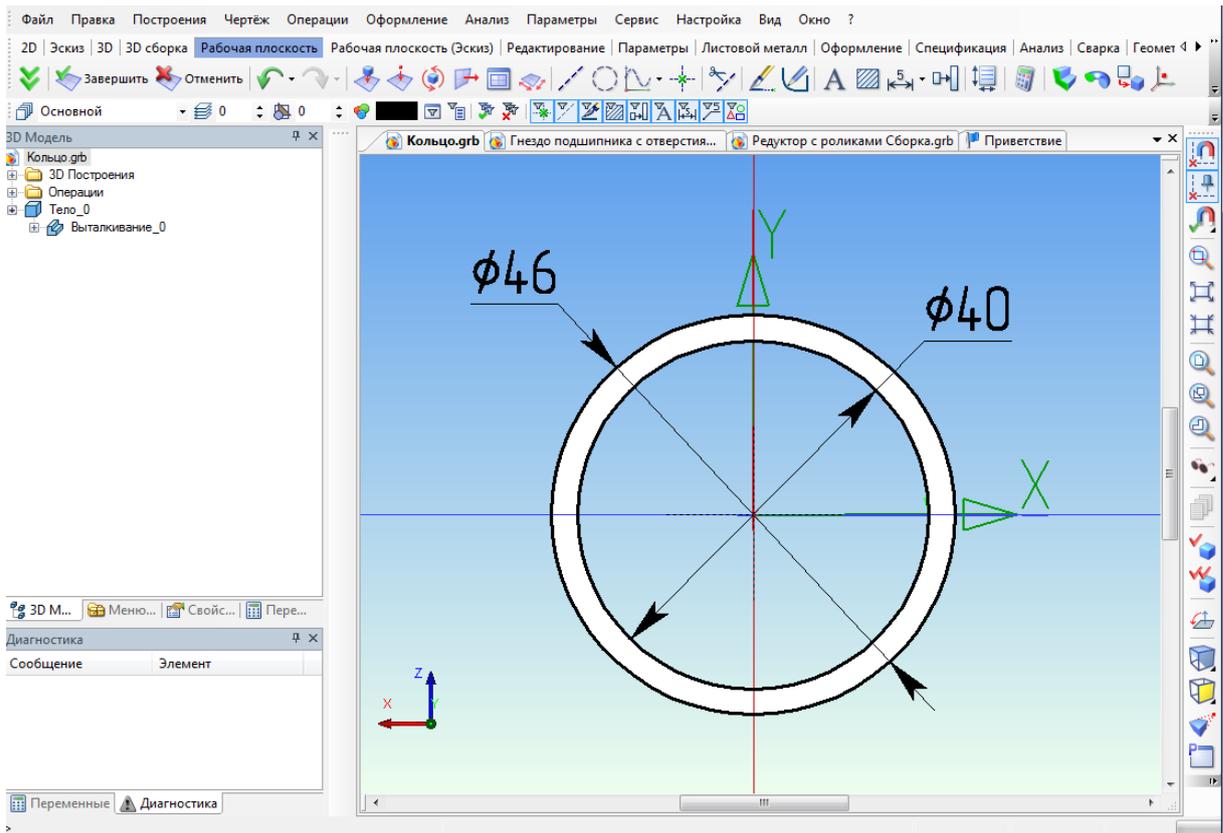


Рис. 1. Эскиз проставочного кольца

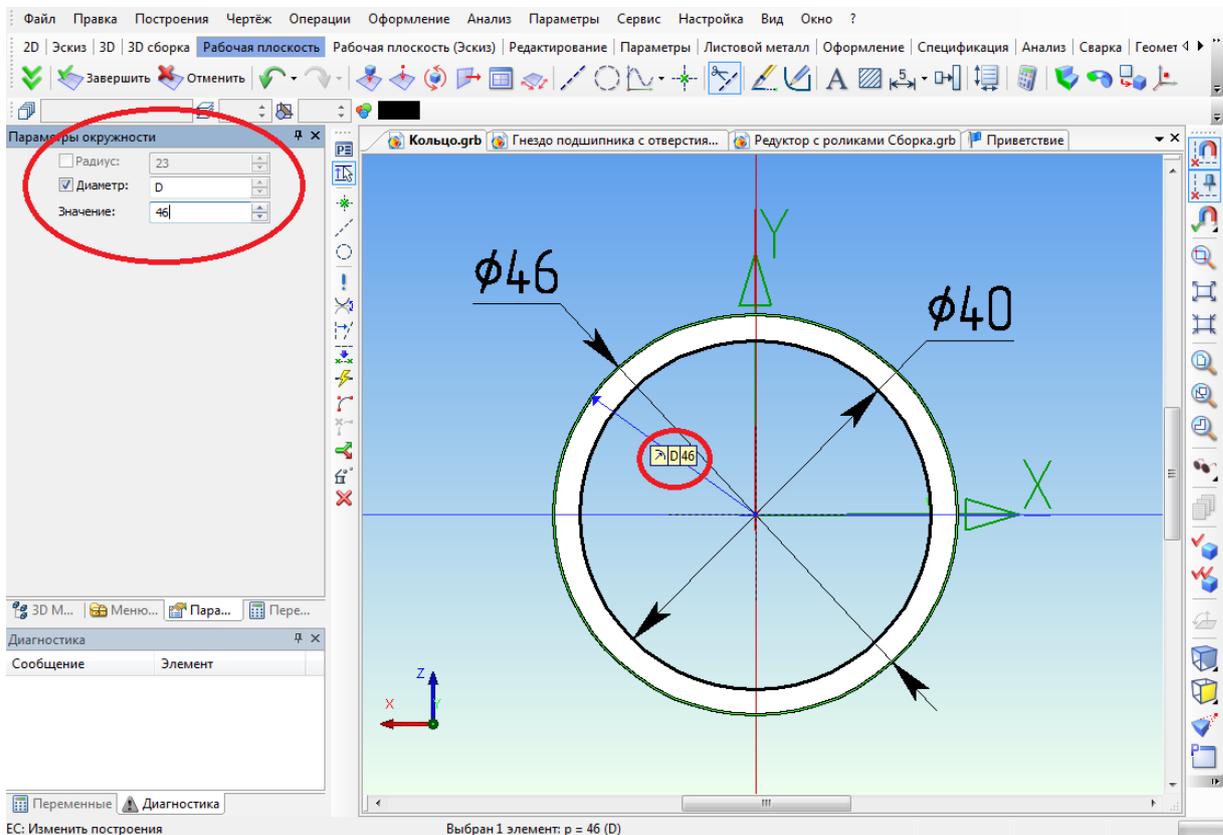


Рис. 2. Параметризация эскиза проставочного кольца

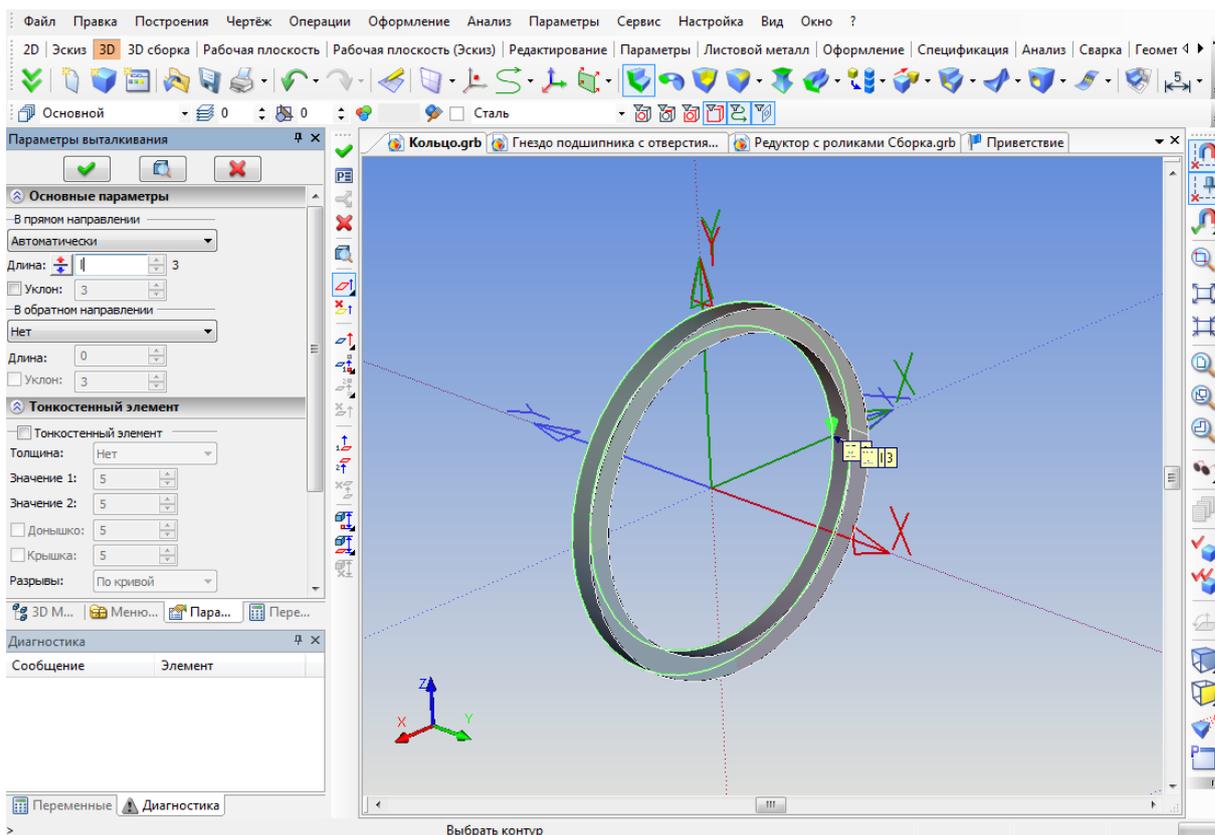


Рис. 3. Параметризация длины выталкивания эскиза проставочного кольца

Переменные				
	?	Выр...	Зн...	Комментарий
	D	46	46	Наружный диаметр
	d	40	40	Внутренний диаметр
	l	3	3	Толщина

Рис. 4. Окно «Переменные» с текущими значениями параметров проставочного кольца

Для создания такой детали начертим на плоскости одностороннее сечение втулки и заменим численные значения характерных размеров переменными (см. рис. 5). После этого с помощью операции «вращение» создадим тело вращения относительно выбранной оси по начерченному профилю (см. рис. 6).

Втулки с другой геометрией, диски волнообразователей, а также тела качения (ролики), создаются подобным образом – с назначением переменных каждому размеру.

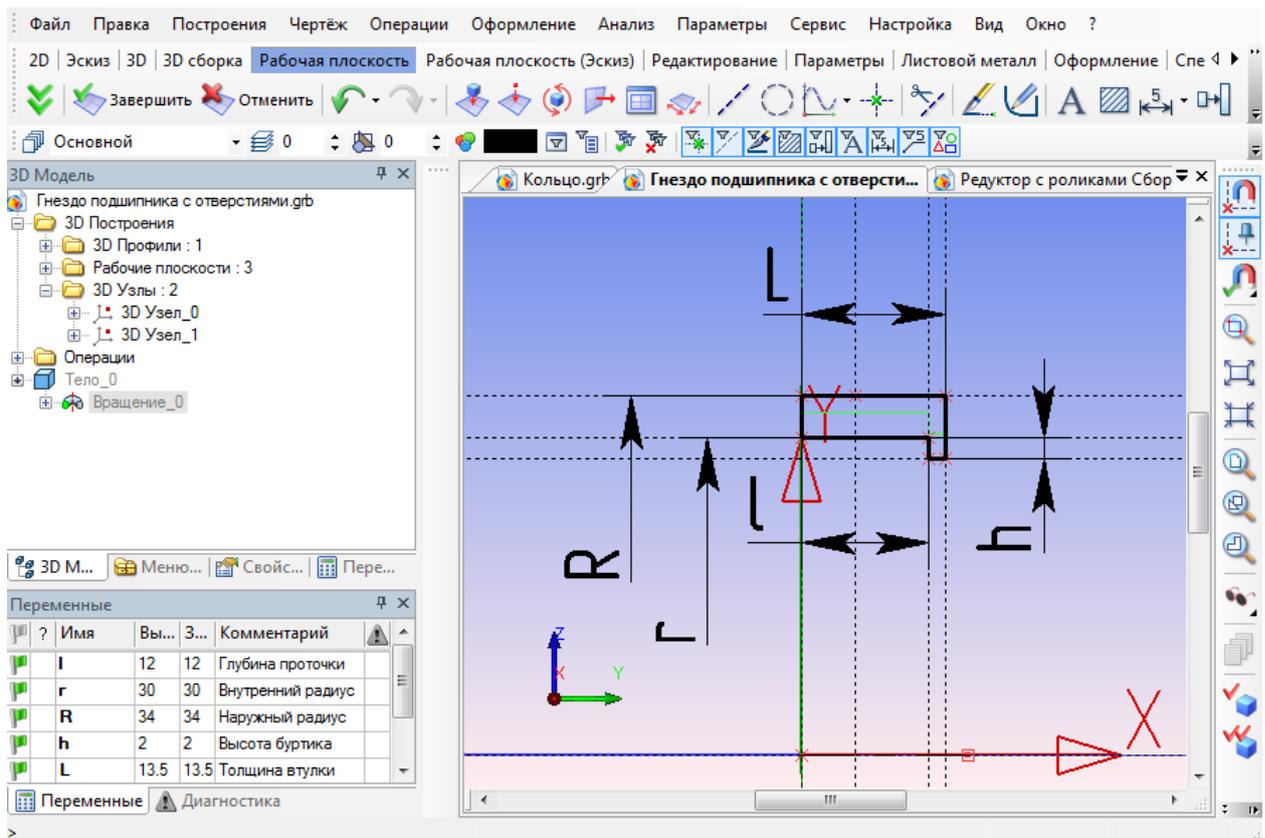


Рис. 5. Параметризованный эскиз втулки с внутренним буртиком

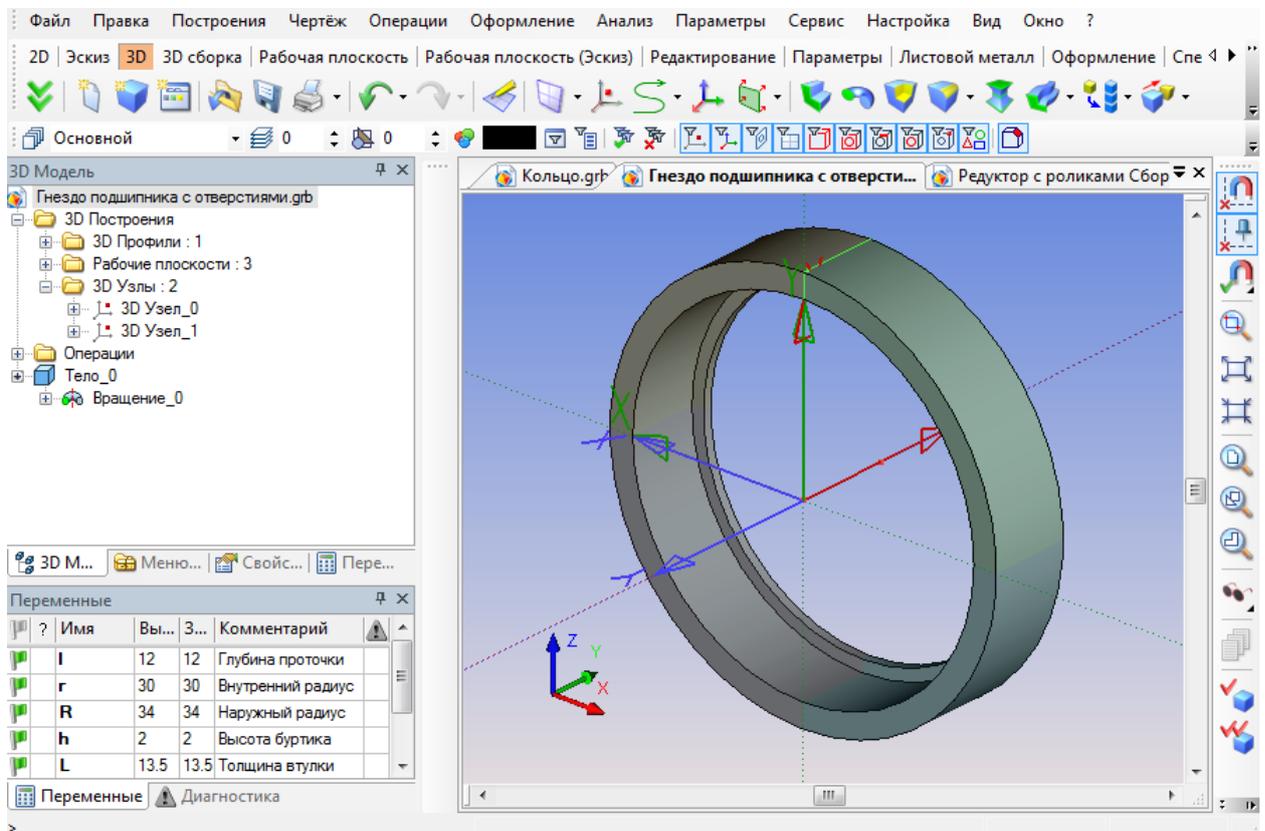


Рис. 6. Вращение эскиза втулки с внутренним буртиком

Для построения модели волновой передачи с телами качения требуется создать несколько основных деталей со специальной геометрией: эксцентриковый вал, сепаратор и жёсткое колесо. Топология таких деталей является более сложной, и далее мы рассмотрим приёмы для создания их параметрических моделей.

Создание модели эксцентрикового вала целесообразно начинать с отрисовывания на рабочей плоскости цилиндрических элементов без смещения относительно предполагаемой оси вращения и со смещением от оси в одну и в другую сторону на величину эксцентриситета. При этом следует пользоваться возможностью создания нескольких независимых профилей на одной рабочей плоскости (см. рис. 7). Эта функция реализуется с помощью заштрихованных по-разному областей, ограниченных вспомогательными параметрическими линиями или окружностями.

Основными переменными, которые задаются для этой модели, являются эксцентриситет, ширина подшипников (правого и левого) и их внутренние радиусы, длина роликов эксцентриковых подшипников, ширина и высота буртиков, радиус цилиндрической поверхности эксцентриковых подшипников, внутренний и наружный диаметры шлицевого соединения, его длина и количество шлицев, диаметр внутреннего отверстия. Как видно из рис. 7, в поле задания любых размеров можно записывать не только числа и буквенные значения переменных, но и целые выражения. Такие выражения могут содержать арифметические, тригонометрические, степенные, логарифмические и экспоненциальные действия с числами и переменными. Например, если, необходимо указать точный размер, являющийся дробным числом с бесконечным периодом после запятой в десятичном представлении, то его можно указать в виде простой дроби как выражение вида  $a/b$ . Это весьма удобно для создания дробных углов: если необходимо отложить одну одиннадцатую от 360 градусов, то в выражении для задающей угловой линии следует всего лишь указать  $360/11$ .

В данном примере использовано выражение « $-8*l_{burt}-4*l_{rol}$ » для задания вертикальной линии, от которой далее строится правая область вращения без смещения от оси, где  $l_{burt}$  – обозначение переменной ширины буртика,  $l_{rol}$  – переменной длины ролика. После того, как все нужные области построены и закрашены, следует применить операцию «вращение» для получившихся трёх профилей: синего – вращение задаётся относительно главной оси, светло-зелёного – относительно оси, смещённой относительно главной на величину эксцентриситета в плюс, зелёного – относительно оси, смещённой на величину эксцентриситета в минус. После этого создаётся отверстие в валу с помощью операции «выталкивание». Результат операций показан на рис. 8.

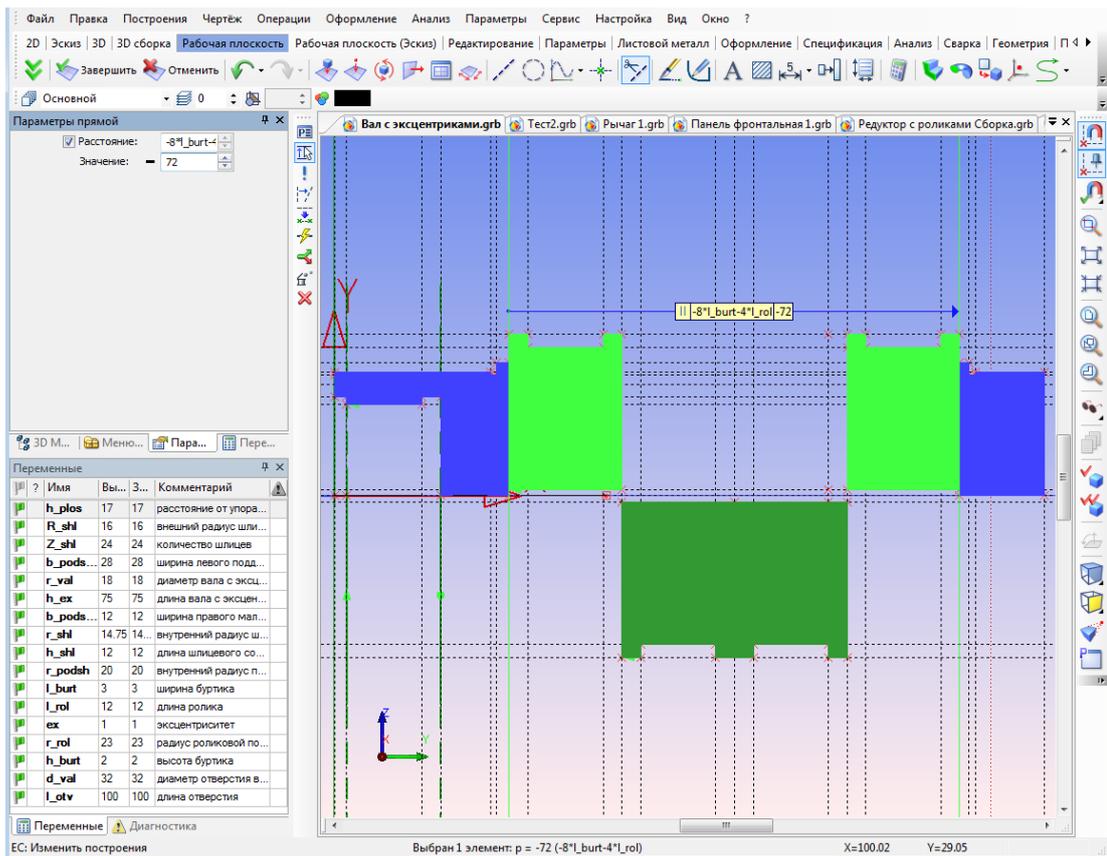


Рис. 7. Параметризованный эскиз эксцентрикового вала

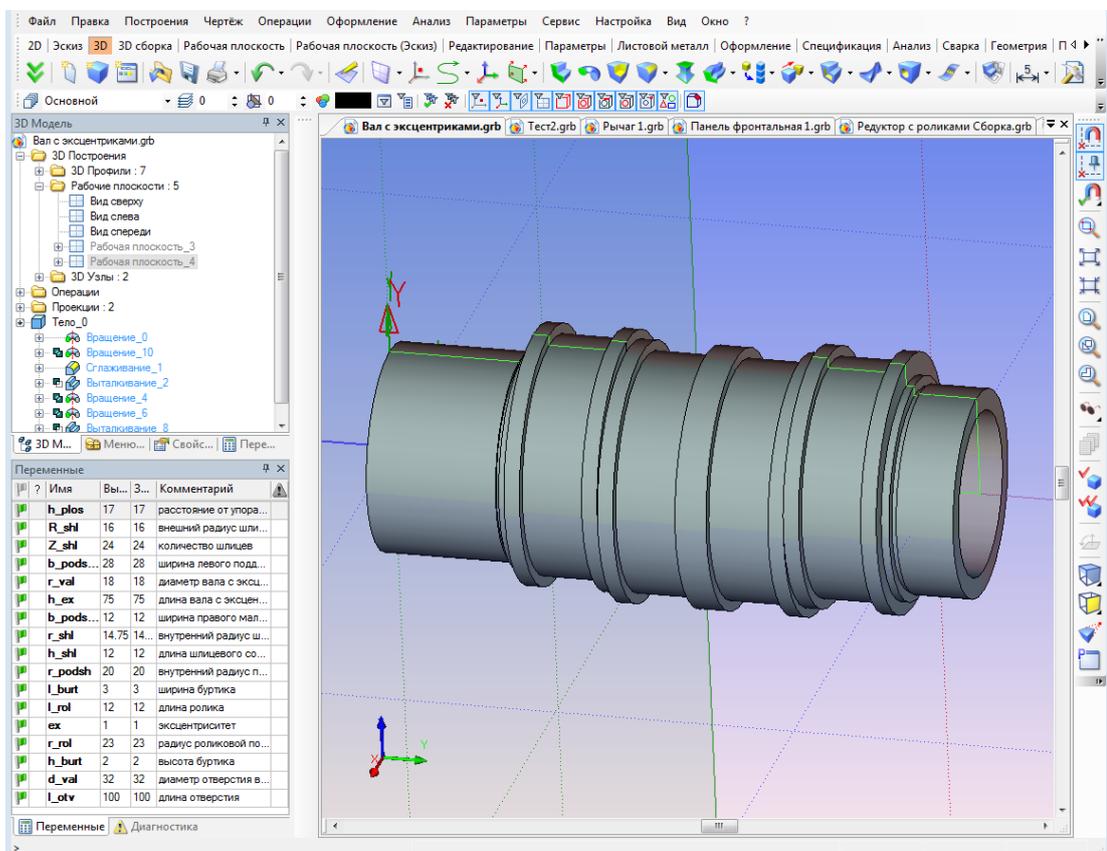


Рис. 8. Вращение эскиза эксцентрикового вала и создание отверстия в нем путем операции «ВЫТАЛКИВАНИЕ»

Далее следует выполнить шлицевое соединение. Создаём рабочую плоскость, располагающуюся на торце будущих шлицев. На ней прорисовываем профиль эвольвентных зубьев с помощью функции построения параметрической линии по заданным выражениям, которые могут быть заданы в явном, параметрическом, полярном или полярном параметрическом видах. В данном случае используется встроенная в программу функция эвольвенты (рис. 9), зависящая от диаметра вершин зубьев. По параметрической линии эвольвенты и окружностям, задающим диаметры вершин и впадин шлицевого зацепления, прочерчиваем профиль одного зуба. С помощью функции «круговой массив» создаём окончательный профиль внутренних шлицев, после чего применяем к нему операцию «выталкивание». Результат операции показан на рис. 10.

Создадим модель жёсткого колеса. Сама по себе эта деталь не является сложной для выполнения в 3D, но её особенность заключается в сложной периодической внутренней поверхности, которая будет взаимодействовать с телами качения волновой передачи. Есть два способа построить эту поверхность. Первый – создать массив точек по соответствующим формулам в программе, позволяющей это сделать (*MathCAD, Maple, Excel*) и импортировать этот массив в систему трехмерного моделирования. Далее с помощью функции построения сплайна по точкам создать желаемый профиль. Но как показывает практика, такой способ является весьма «тяжёлым» для программы, из-за чего работа с такой моделью затрудняется – процесс открытия и редактирования замедляется и могут возникать проблемы с переносом файла модели в другие папки. Поэтому для быстрого проектирования рекомендуется применять упрощённые модели жёсткого колеса, где его внутренний профиль строится из дуг окружностей. При этом задаются в качестве параметров диаметр впадин, диаметр гребней и число периодов. Профиль на рабочей плоскости создаётся с помощью дуги, две крайних точки которой лежат на пересечении окружности гребней с двумя линиями, угол между которыми  $360/Z$  градусов (где  $Z$  – число периодов), и которая касается окружности впадин (см. рис. 11). После этого строится круговой массив этих дуг из  $Z$  элементов, и полученный профиль выталкивается соответствующей операцией. При этом радиусы этих дуг полностью определяются параметрами внутреннего и наружного диаметров профиля и количеством периодов. Эта операция применяется к заранее созданному телу, полученному из операции вращения по профилю. Результат этих операций показан на рис. 12. Помимо уже названных, в этой модели назначаются переменными наружный диаметр жёсткого колеса, диаметры под подшипниковые втулки и их ширина.

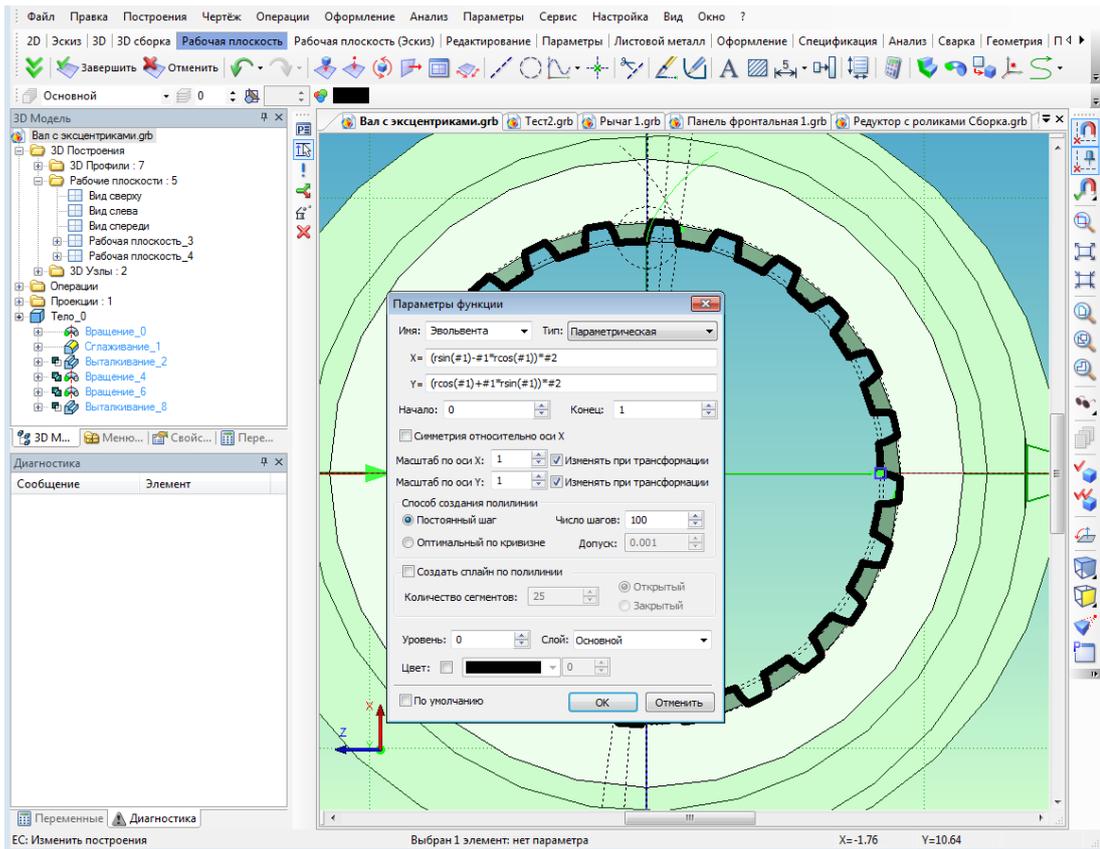


Рис. 9. Построение профиля эвольвентных зубьев внутреннего шлицевого соединения

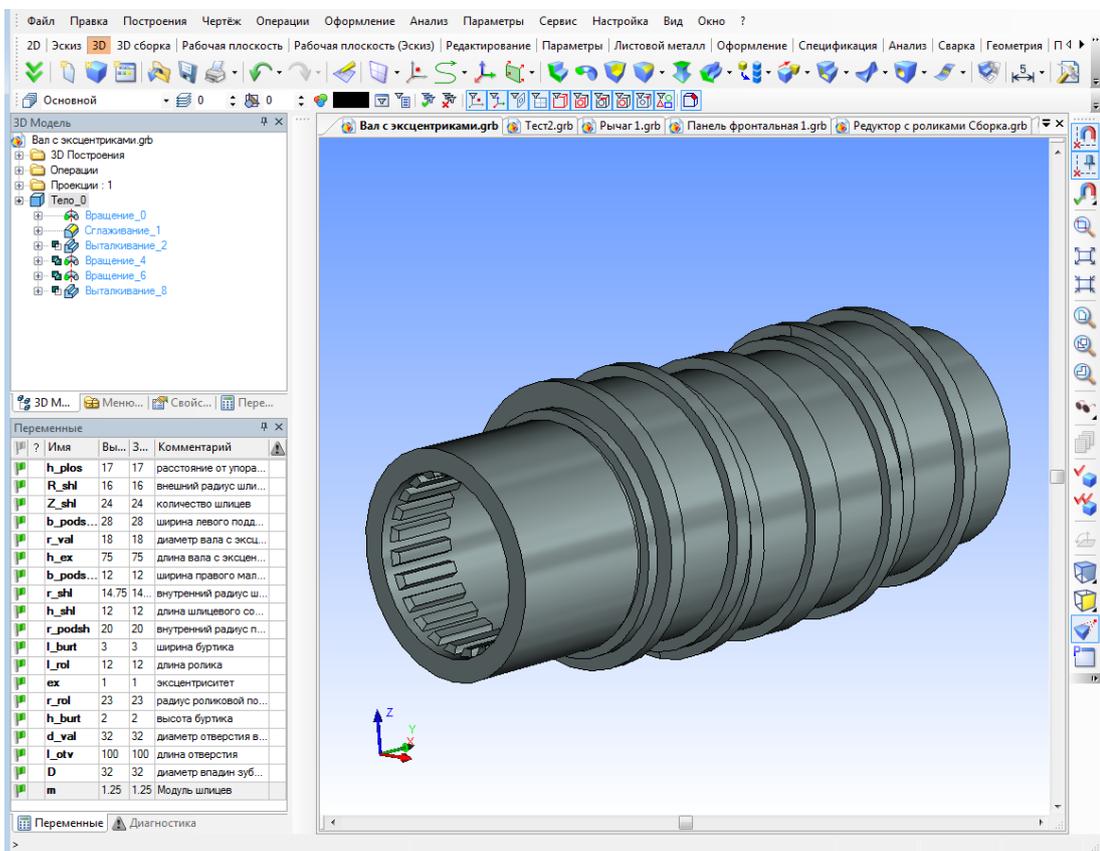


Рис. 10. Вытапливание профиля эвольвентных зубьев внутреннего шлицевого соединения

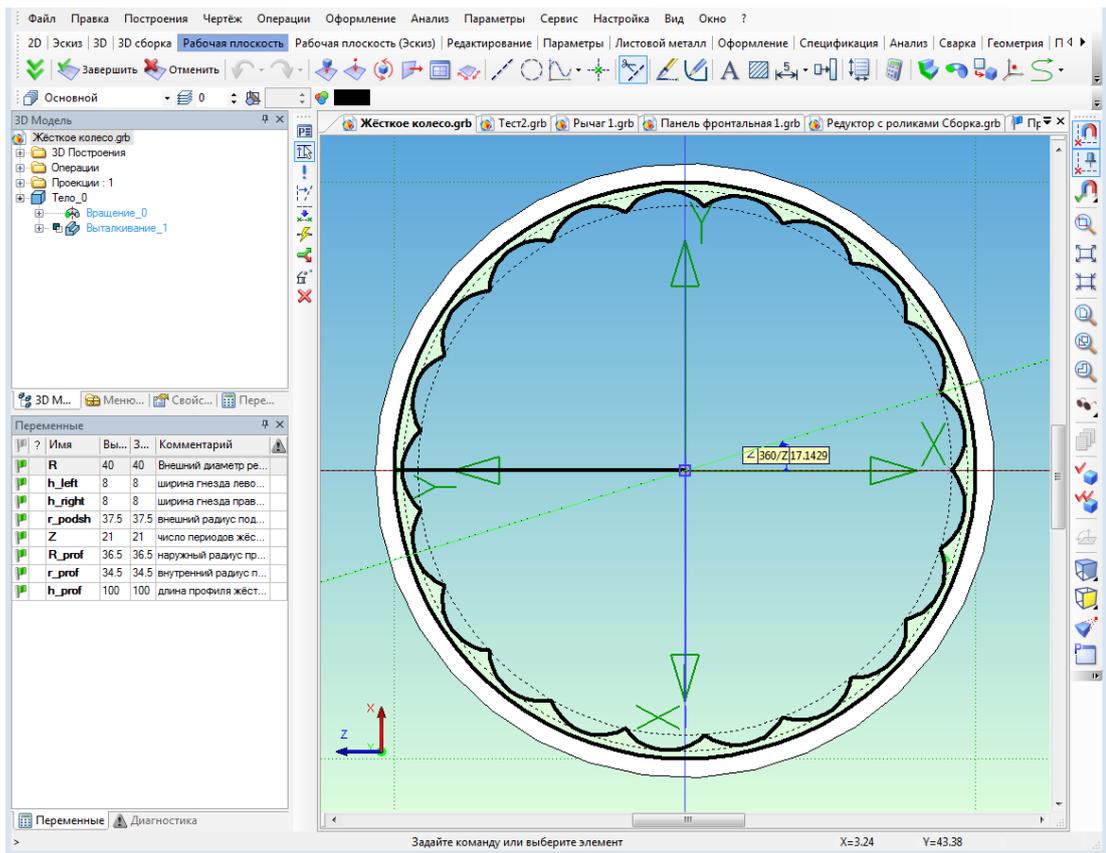


Рис. 11. Создание упрощенного профиля жесткого колеса

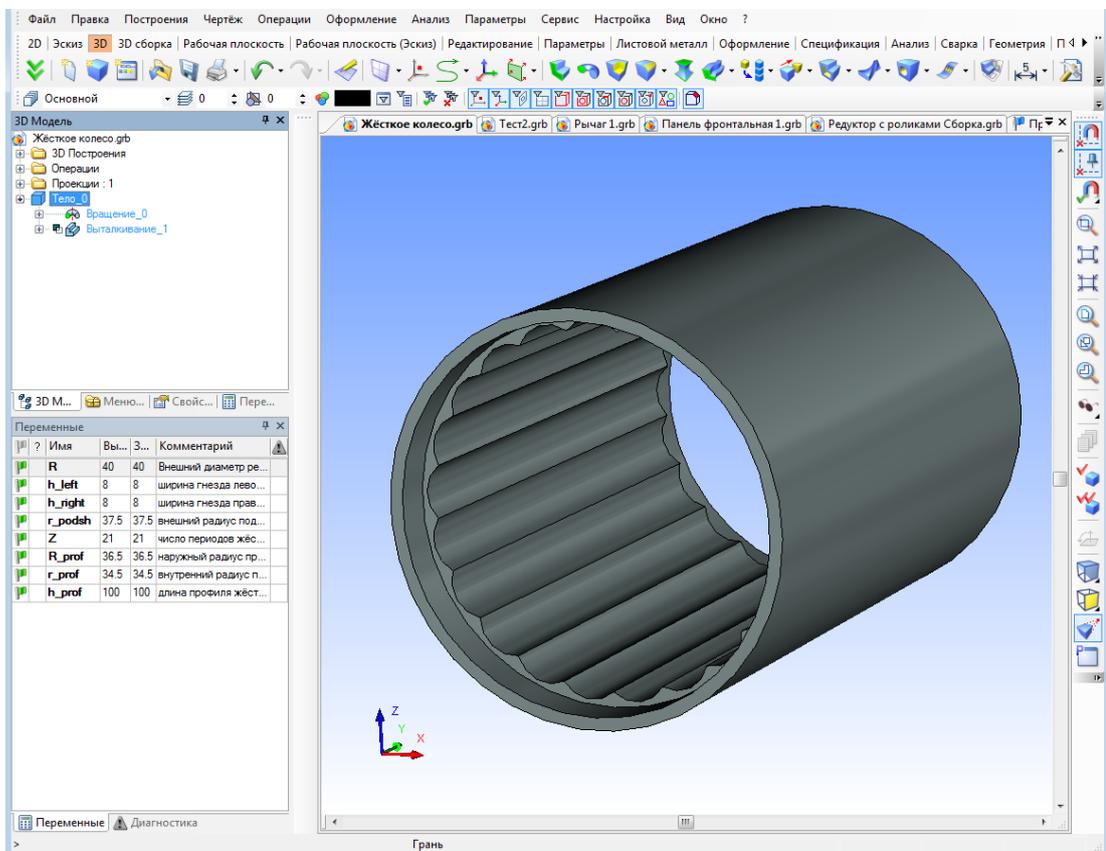


Рис. 12. Результат выталкивания упрощенного профиля жесткого колеса

Наиболее сложной деталью в волновой передаче с телами качения является сепаратор, модель которого содержит наибольшее количество переменных данных: длины и диаметры цилиндрических поверхностей, параметры посадочных мест под подшипники, параметры шлицевого соединения, количество и размеры отверстий под ролики.

Вначале, с помощью операции «вращение» по параметризованному эскизу, делается основа для модели сепаратора (см. рис. 13). После этого создаётся две плоскости. Одна из них совпадает с базовой плоскостью «сверху». Другая – повернута на угол  $180/z$  относительно общей оси вращения (где  $z$  – число отверстий под ролики в одном ряду). На обеих плоскостях создаются эскизы прямоугольного отверстия под ролик. Здесь в качестве переменных указываются расстояние от края цилиндра до стенки отверстия, ширина и длина отверстия, радиус и дистанция между осями скруглений (см. рис. 14). Далее на основе построенных эскизов создаются булевы операции «вычитание», после которых в стенке сепаратора появляются два гнезда под ролик. Создаём массив операций «вычитание» по кругу вокруг общей оси, указывая количество ( $z$ ) и общий угол (360 градусов). Получаем два ряда отверстий, смещённых друг относительно друга в продольном направлении и повернутых друг относительно друга на угол  $180/z$  градусов. Далее создаём продольный массив для массива ряда отверстий. Здесь мы можем задавать переменную, указывающую количество рядов, но на практике, более четырёх рядов отверстий в одном сепараторе делать не целесообразно. Шлицы выполняются в том же порядке, как и в модели эксцентрикового вала. Результирующая модель сепаратора показана на рис. 15.

### **Построение параметрической модели сборочной единицы унифицированного модуля**

Процедура создания модели сборочной единицы осуществляется в 3D окне программы путём добавления необходимых деталей, сборок и стандартных элементов и закрепления их либо с помощью привязки системы координат добавляемого элемента к уже существующим в сборке телам, точкам, граням или рёбрам, или с помощью функции «сопряжения». Если используется закрепление с помощью системы координат, то добавленный элемент будет жёстко закреплён относительно связанного с ним объекта. Такой способ довольно прост и требует значительно меньше вычислительных ресурсов компьютера. Если же необходимо вращать или перемещать в сборке одно тело относительно другого в реальном времени, то для этого используются сопряжения. Сечение и общий вид собранного редуктора показаны на рис. 16 и 17.

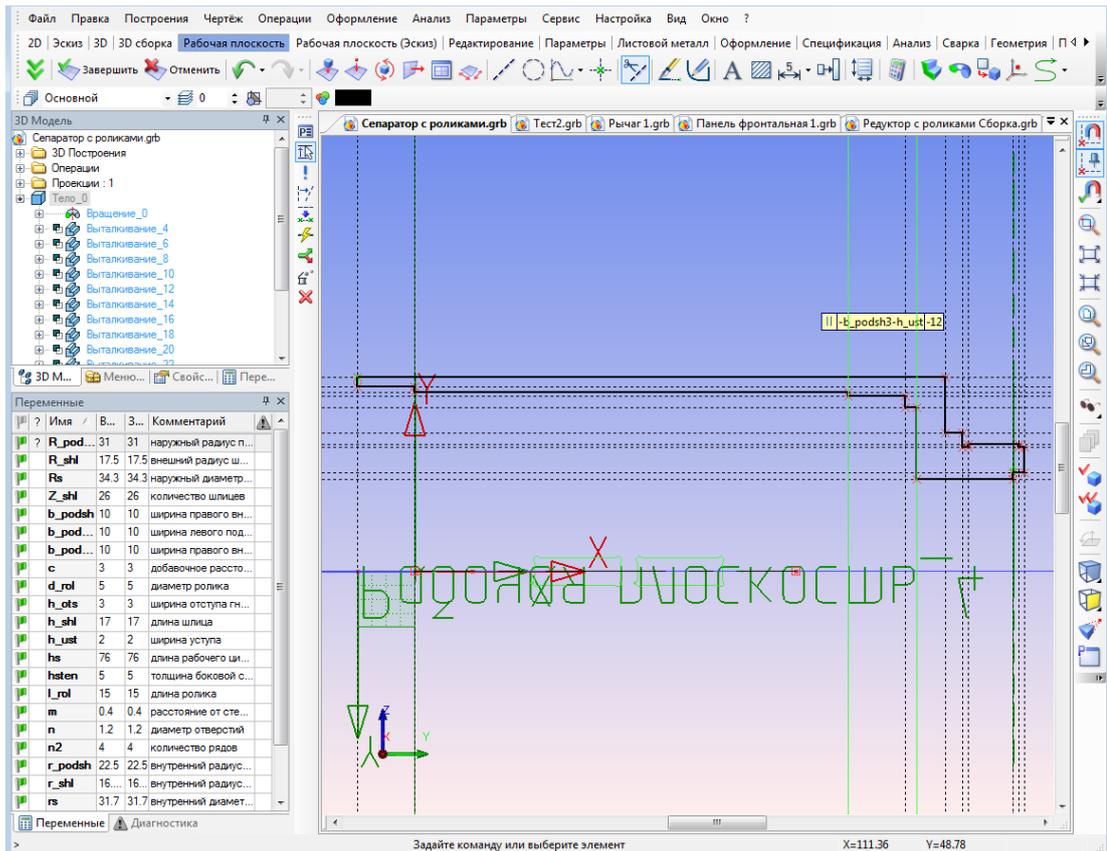


Рис. 13. Параметризованный эскиз сепаратора

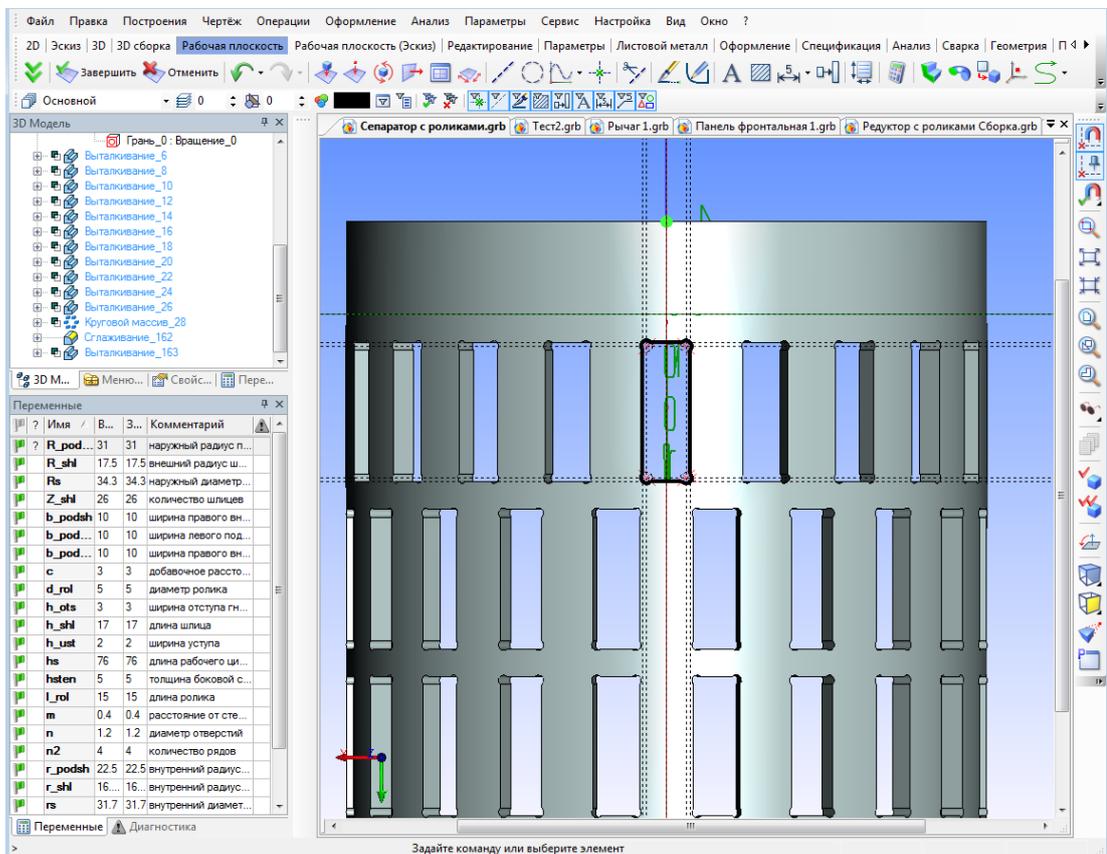


Рис. 14. Параметризованные отверстия для тел качения в сепараторе

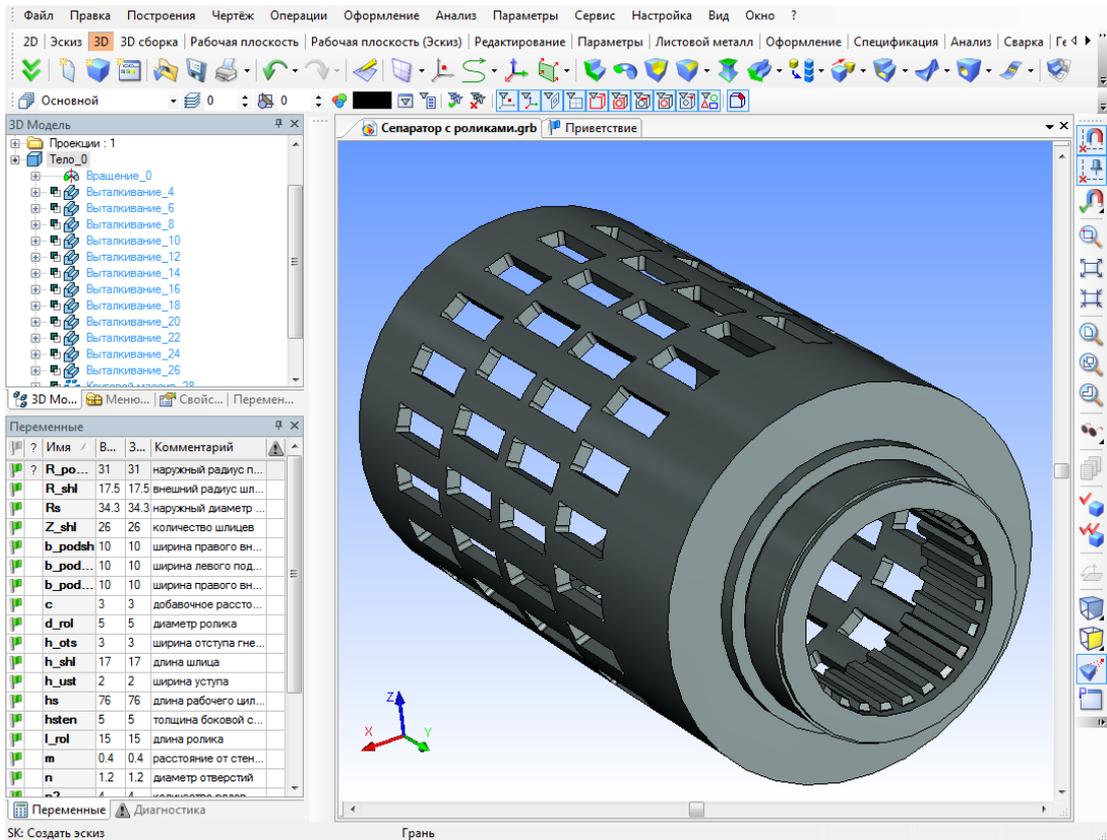


Рис. 15. Результирующая модель сепаратора

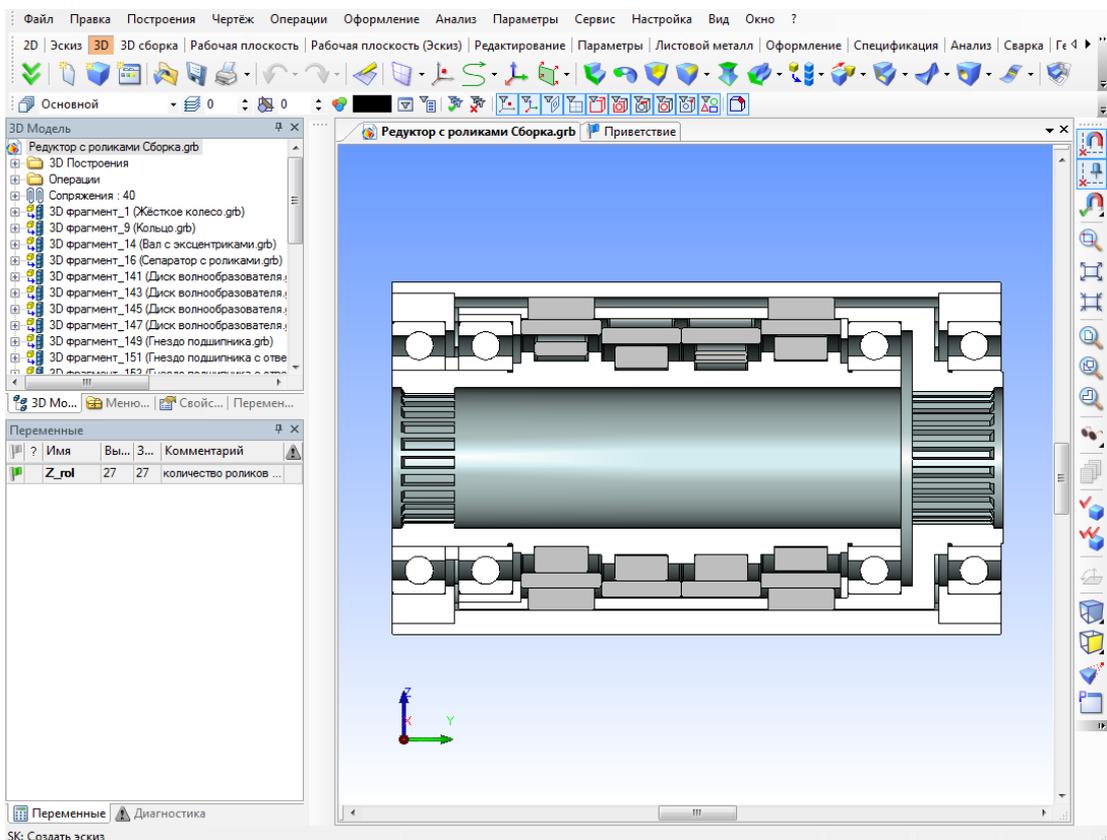


Рис. 16. Сечение параметризованной сборочной единицы унифицированного модуля волновой передачи с телами качения

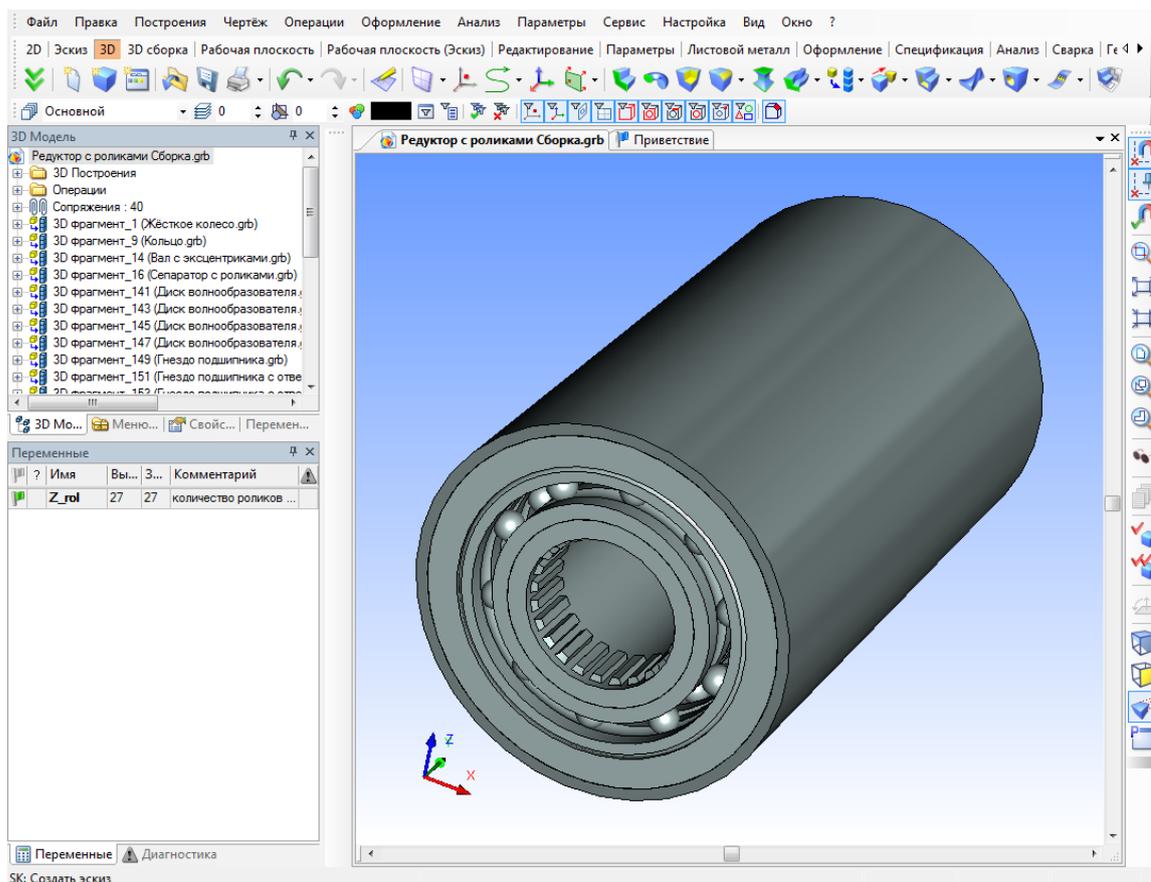


Рис. 17. Общий вид параметризованной сборочной единицы унифицированного модуля волновой передачи с телами качения

Хотя переменные параметры задаются в контексте детали, редактировать их имеет смысл именно в контексте сборки. Это удобно тем, что не нужно открывать модель детали, чтобы изменить её размеры. Достаточно в сборке выделить нужную деталь или подсборку и выбрать в контекстном меню «Переменные». Появится весь список переменных детали, значения которых можно менять. После подтверждения сборка автоматически пересчитывается. При этом изменённые значения переменных будут актуальны только для текущей сборки. В файле самой детали значения переменных останутся прежними. Это удобно при создании нескольких различных сборок с одними и теми же параметризованными деталями. После пересчёта сборки можно сразу видеть, как изменился вид детали, и на основании этого редактировать другие детали таким же образом.

Любая сборка позволяет работать с переменными точно так же, как и в контексте детали. То есть, открывая таблицу переменных какой-либо детали, вместо численного значения можно вписать буквенное значения – тогда программа предложит создать переменную с таким значением, или можно вписать целое математическое выражение. Таким образом, осуществляется взаимосвязь между переменными различных деталей в контексте сборки, при этом эти переменные будут зависеть от новых параметров, присущих

только сборке. Параметры сборки можно назначать внешними, что позволит редактировать их уже в контексте надсборки, в которую войдёт текущая сборка. В параметризованной модели роликово-волнового редуктора зависимости рационально назначать между числом отверстий под ролики в сепараторе и числом периодов профиля жёсткого колеса; диаметрами роликов, дисков волнообразователей и зависящих от них диаметров сепаратора и профиля жёсткого колеса; модулем и наружным диаметром шлицевого соединения входного и выходного валов.

Для того чтобы показать возможности автоматизации конструирования в среде САПР, на базе параметрической модели унифицированного модуля волновой передачи с телами качения, показанной на рис. 17, была построена модель двухступенчатого редуктора. На рис. 18 показано продольное сечение, а на рис. 19 – общий вид редуктора. Конструкция как первой, так и второй ступени была доработана. Так, жёсткое колесо первой ступени получило крепёжные фланцы и продольное крепление, сама ступень стала двухрядной с большим передаточным числом, при этом изменился способ продольной фиксации дисков волнообразователей – они получили буртики на внутренней поверхности, а ролики подшипников волнообразователей стали закрываться прикручивающимися к эксцентриковому валу кольцами. Во второй ступени к сепаратору был добавлен фланец, чтобы он жёстко крепился к общему корпусу, а выходным звеном стало жёсткое колесо, также получившее продольное крепление для передачи крутящего момента; втулки были видоизменены. Все эти изменения делались в контексте деталей с добавлением новых переменных, соответствующих размерам новых конструктивных узлов. В общую сборку были также добавлены промежуточная шлицевая муфта, фланец и элементы крепежа. Передаточное число первой ступени составляет 35, второй ступени – 21. Выходной момент редуктора 2800 Нм, наружный диаметр – 80 мм, длина – 316 мм, масса – 7,6 кг.

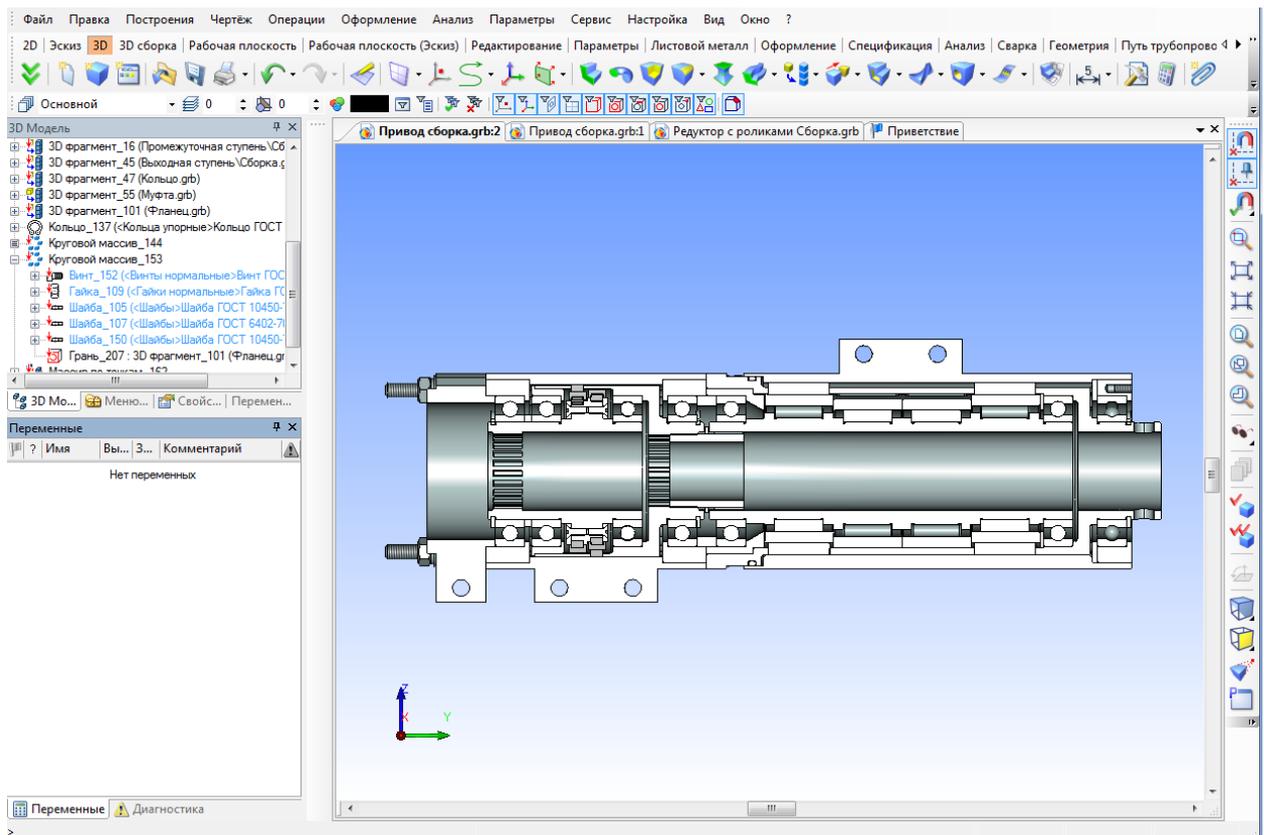


Рис. 18. Сечение двухступенчатого редуктора на основе параметризованных унифицированных модулей волновой передачи с телами качения

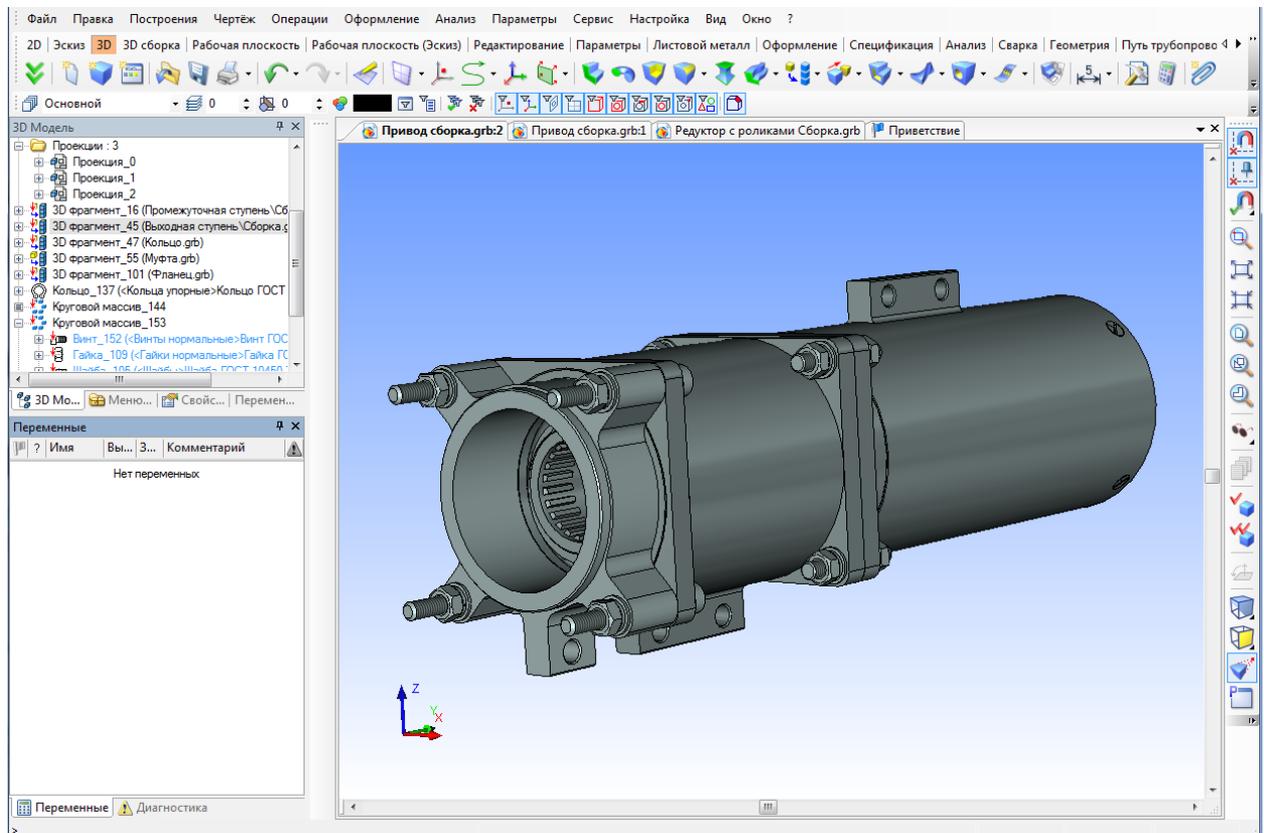


Рис. 19. Общий вид двухступенчатого редуктора на основе параметризованных унифицированных модулей волновой передачи с телами качения

## Разработка чертежей по параметризованным моделям деталей и сборочных единиц унифицированного модуля волновой передачи с телами качения

Чертежи деталей создаются на основе проекций трёхмерных моделей. Процедура создания чертежа сводится к выбору проекций детали – главного и второстепенных видов, на которые вручную наносятся размеры. Номиналы размеров определяется программой автоматически, от конструктора же требуется поставить допуски на размеры и формы. При изменении модели в 3D, её чертёж автоматически пересчитывается, номиналы изменённых размеров также меняются. Если размеру присвоен стандартный допуск, то при изменении номинала качество остаётся неизменным, при этом пределы допуска автоматически пересчитываются в зависимости от номинала. Это позволяет быстро выпускать чертежи однотипных параметризованных деталей и сборочных единиц с минимальными корректировками. Однако, если к параметризованной детали добавляется новый элемент, то изменения в чертеже могут быть существенными.

На рис.20 приведен чертеж сепаратора волновой передачи с телами качения, созданный по параметризованной модели.

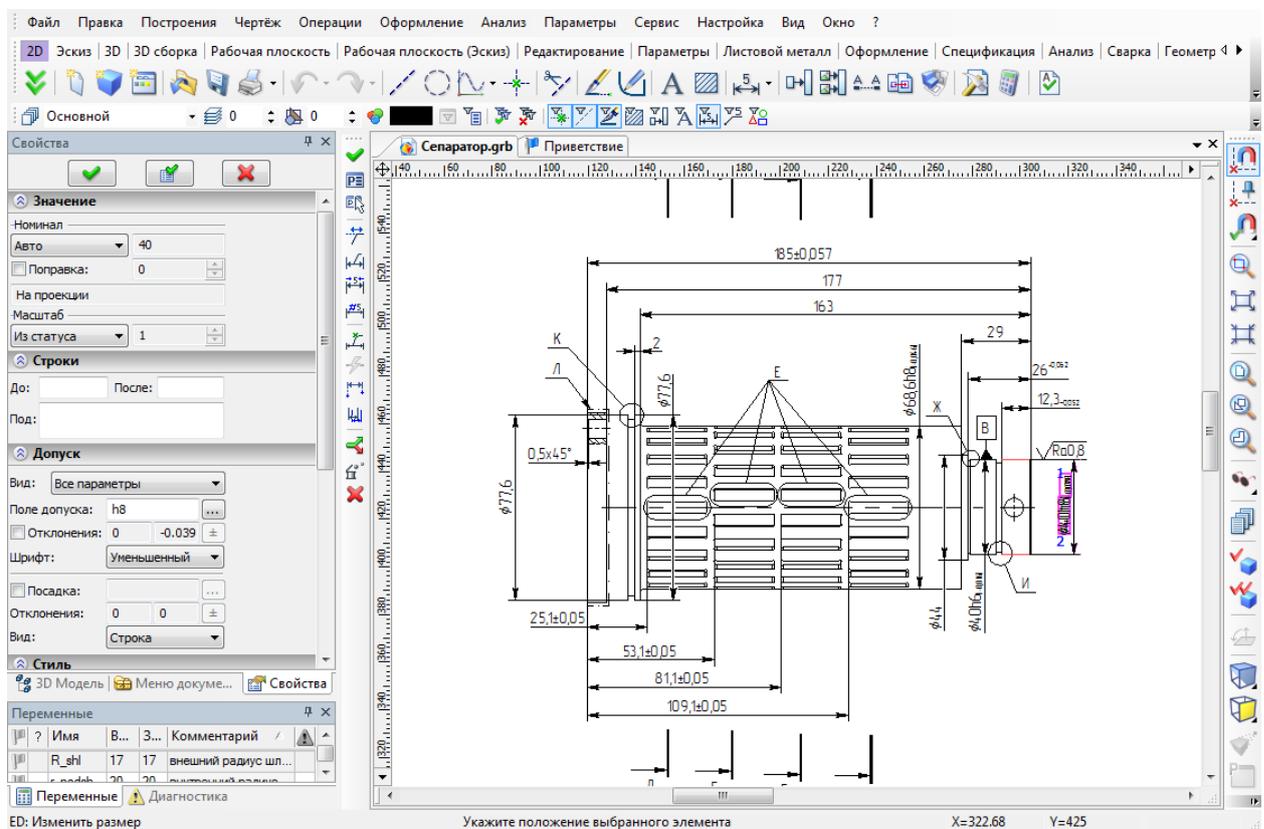


Рис.20. Чертеж детали «Сепаратор» на основе ее параметризованной модели

## **Заключение**

В результате проведенной работы показаны возможности автоматизированного конструирования редукторов приводов на основе волновых передач с телами качения.

Параметризация моделей деталей и сборочных единиц унифицированного модуля волновой передачи с телами качения позволила, создав один раз модели и чертежи всех деталей и сборок, получить целый ряд волновых передач, различающихся:

- передаточным числом (за счет параметризации количества периодов жесткого колеса, отверстий в одном ряду сепаратора и количества тел качения в сборочной единице);
- нагрузочной способностью (за счет параметризации количества рядов отверстий в сепараторе, количества дисков волнообразователя и количества тел качения в сборочной единице и их длины);
- наружным диаметром редуктора (за счет геометрических параметров всех деталей);
- диаметром и модулем шлицевого соединения.

Редукторы, спроектированные на основе унифицированного модуля волновой передачи с телами качения, отвечают требованиям, предъявляемым к редукторам электромеханических приводов, при значительном сокращении конструкторской, проверочной и технологической работы по сравнению со стандартными методами проектирования.

## **Библиографический список**

1. Оболенский Ю.Г., Самсонович С.Л., Степанов В.С. Силовой мини-привод подвижной аэродинамической поверхности летательного аппарата. Патент РФ № 2408125. Опубл. 27.12.2010 Бюл. №36.
2. Кузьмичев Р.В., Ситин Д.А., Степанов В.С. Исполнительные механизмы петлеобразной формы для приводов самолетов с повышенным уровнем электрификации / Труды МАИ, №45 (07.06.2011) <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25426>.
3. Геращенко А.Н., Постников В.А., Самсонович С.Л. Пневматические, гидравлические и электрические приводы летательных аппаратов на основе волновых исполнительных механизмов: Учебник. – изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010

### **Сведения об авторах**

Крылов Николай Валерьевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: 8-965-149-16-17; e-mail: artsunday@mail.ru

Самсонович Семён Львович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-50-00, 8-910-414-07-26

Степанов Вилен Степанович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-50-00, 8-916-280-27-21; e-mail: stevilen@mail.ru