

# Валы и механические передачи 3D —

## отлаженный механизм развития машиностроительного проектирования в КОМПАС-3D



**Леонид Платонов,**  
инженер-конструктор,  
сертифицированный  
преподаватель  
по КОМПАС-3D

На словах доказывать эффективность ПО можно бесконечно долго, но только демонстрация реальных результатов становится ее неоспоримым подтверждением. Крайне важно, что развитию приложения Валы и механические передачи 3D для КОМПАС-3D сопутствует его практическая апробация и диалог разработчика (инженера-аналитика и программиста Валерия Голованёва, г. Курган) с производителями зубчатых колес. Еще до выхода обновленной версии в массы приложение проходит натурные испытания на предприятиях-заказчиках АСКОН.

Машиностроительный завод в Казахстане ТОО «Казцинкмаш» послужил площадкой для изготовления на универсальном оборудовании с ЧПУ червячных колес, модели которых были построены при помощи обновленного модуля генерации геометрически корректных 3D-моделей зубчатых венцов червячных колес. По результатам опытной промышленной эксплуатации обновленного приложения были изготовлены три различных червячных колеса для оборудования завода.

Необходимость изготовления точных моделей червячных колес существовала на предприятии и ранее. Модели колес требовались для написания управляющих программ для обработки их на многокоординатных станках с ЧПУ. С решением этой задачи конструкторы завода были вынуждены справляться самостоятельно, прибегая к достаточно трудоемкому построению модели методом подгонки зуба червячного колеса под зуб червяка вручную.

Применив приложение Валы и механические передачи 3D для генерации зубчатых венцов червячных колес, специалисты завода полностью доверились результатам его работы. При этом они отметили, что время, затрачиваемое на генерацию, сократилось более чем в 10 раз, а точность полу-

ченной трехмерной модели значительно повысилась.

На одном из предприятий Нижнего Новгорода с помощью приложения Валы и механические передачи были изготовлены шестерня и зубчатое колесо конической передачи с круговыми зубьями.

Далее речь пойдет о генерации геометрически корректных зубчатых венцов и о том, какую практическую пользу дают высокоточные модели при проектировании, прототипировании, производстве и контроле размеров.

Оперировать деталями и их элементами в процессе разработки в КОМПАС-3D, а не геометрическими примитивами поможет приложение Валы и механические передачи 3D

Приложение Валы и механические передачи 3D является важным дополнением к системе КОМПАС-3D и входит в состав комплекта Механика. Оно позволяет конструкторам при проектировании оперировать не геометрическими примитивами плоскости или элементами пространства, а объектами и деталями в целом, а также их элементами. Важным преимуществом



приложения является возможность построения высокоточных моделей зубчатых венцов с геометрически корректными поверхностями зубьев.

Если для конструкторов, разрабатывающих детали типа вал, диск, втулка, Валы и механические передачи 3D — удобное средство проектирования, то для разработчиков зубчатых передач приложение — просто незаменимый инструмент.

Приложение имеет интерфейс для проектирования и в плоскости (2D), и в пространстве (3D). Однако результатом работы всегда является высокоточная 3D-модель. Конструктор оперирует понятием «модель» даже при работе с приложением на плоскости.

Работа в плоскости позволяет оформлять чертежи проектируемых элементов — проставлять размеры в автоматическом или полуавтоматическом

## Бесконечно наслаждаться работой обновленного приложения не получится, так как генерация сложных поверхностей, образующих зубчатый венец, происходит за считанные минуты

режиме, строить виды, разрезы, сечения, оформлять таблицы параметров.

Недаром говорят, что можно бесконечно наблюдать за тем, как течет вода, горит огонь и как работают другие. К этим процессам можно добавить еще один — автономное выполнение части человеческой работы компьютером. Бесконечно наблюдать за работой обновленного приложения не получится,

так как генерация сложных поверхностей, образующих зубчатый венец, происходит за считанные минуты.

Приложение располагает функционалом построения геометрически корректных венцов колес всех видов зубчатых, червячных и ременных передач. Среди них:

- цилиндрические передачи внешнего и внутреннего зацепления;
- реечные цилиндрические передачи;



Червячное колесо. От виртуального моделирования к реальному



Результат изготовления червячного колеса по модели, построенной усилиями приложения Вали и механические передачи 3D

- винтовые эвольвентные зубчатые передачи;
- конические передачи с прямыми и круговыми зубьями;
- планетарные зубчатые передачи;
- червячные цилиндрические и ортогональные передачи;
- зубчатоременные передачи.

Важным достижением разработчиков стало ускорение работы приложения при генерации высокоточных моделей. Скорость повысилась благодаря двум факторам: окончательной реализации приложения на базе ядра системы КОМПАС-3D — С3D, выделенного в самостоятельный продукт, а также внедрению уникальной методики построения зубчатых венцов методом имитации зубофрезерования (для червячных колес и конических передач с круговым зубом).

Практическая необходимость и важность построения точных 3D-моделей элементов механических передач

Возможность построения корректных пространственных моделей зубчатых колес имеет большое практическое значение. 3D-модели необходимы для изготовления зубчатых колес на станках с ЧПУ, изготовления прототипов опытных образцов и учебно-демонстрационных моделей. Кроме того,

## Отзыв предприятия

Специалисты и руководство ТОО «Казцинкмаш» выражают искреннюю благодарность сотрудникам компании АСКОН за помощь в построении точной математической модели червячного колеса с помощью обновленного приложения КОМПАС Вали и механические передачи 3D, которое в скором будущем, как обещают разработчики, будет доступно всем пользователям САПР КОМПАС.

Наше предприятие периодически производит изготовление червячных колес на универсальных станках с ЧПУ. Не секрет, что для этого необходимы управляющие программы, которые базируются на точных моделях изделий. До сегодняшнего дня эти модели приходилось строить вручную методом подгонки зуба червячного колеса под зуб червяка, осуществляя взаимосвязанное их перемещение в пространстве в среде САПР. Этот

метод позволяет получить приемлемую модель червячного колеса для написания управляющей программы, но все-таки не обеспечивает ее точную математическую модель. Некоторые из представленных на рынке программного обеспечения САПР позволяют строить наглядные модели червячных колес для визуализации изделий, которые, к сожалению, не пригодны для написания по ним управляющих программ.

С помощью обновленного приложения КОМПАС Вали и механические передачи 3D построение точной математической модели червячного колеса будет производиться автоматически. По предварительным оценкам, с помощью приложения трудозатраты по построению модели червячного колеса уменьшатся более чем в 10 раз. Невероятный результат при наилучшем качестве!

Профессионализм, доброжелательность, открытость, готовность оказать консультативную и техническую помощь руководителю отдела продаж АСКОН-Казахстан Григория Ковалю и менеджера по строительному направлению АСКОН-Усть-Каменогорск Дарьи Даниловой определяют высокое качество, своевременность и эффективность решения возникающих вопросов. Подобное отношение к клиентам характерно для всех сотрудников АСКОН независимо от подразделений, в которых они работают, будь то разработчики, сотрудники службы поддержки или отдела продаж. Компания не просто разрабатывает специализированные программные продукты, но стремится учесть все замечания и пожелания клиентов по работе своих программ и постоянно их совершенствует.

Заместитель директора  
ТОО «Казцинкмаш» П. В. Кавун

3D-модели используются при контроле точности изготовления деталей с помощью 3D-сканеров и других средств 3D-измерений.

Ключевым преимуществом корректных 3D-моделей является возможность их передачи в САМ-системы с целью подготовки управляющей программы для обработки зубчатых колес на станках с ЧПУ.

Стандартные методики изготовления червячных и зубчатых колес предполагают использование дорогостоящих узкоспециализированных зуборезных и зубошлифовальных станков. Применение таких станков целесообразно, оправдано и экономически эффективно в условиях крупносерийного и массового производства. Однако если необходимо изготовить небольшие штучные партии, использование специализированных станков приводит к удорожанию выпускаемой продукции и долгой окупаемости самого оборудования. В этих случаях многофункциональные многокоординатные станки с ЧПУ значительно выигрывают. Быстрота и гибкость их переналадки, широкие возможности изготовления при минимальных дополнительных затратах — все это относится к преимуществам применения станков с числовым программным управлением при мелкосерийном и штучном производстве.

Генерация корректных 3D-моделей зубчатых и червячных колес средствами приложения Вали и механические передачи 3D расширяет возможности использования многокоординатных станков с ЧПУ, т.к. контуры поверхностей зацепления, полученные при генерации, могут быть использованы при разработке управляющих программ для обработки деталей.

Особенно эти преимущества могут быть ощутимы при изготовлении крупногабаритных червячных колес или зубчатых колес с очень большими диаметрами.

**Геометрически корректная 3D-модель как эталонная модель при современных методах измерений и контроля точности изготовления**

Требования к точности изготовления зубчатого венца определяются эксплуатационными требованиями к зацеплению — прочности, надежности, износостойкости, плавности, бесшумности и т. д. Конкурентная борьба производителей и эксплуатационщиков ведет к ужесточению этих требований, что, в свою очередь, порождает повышенное внимание к вопросам точности изготовления деталей и методам контроля качества.

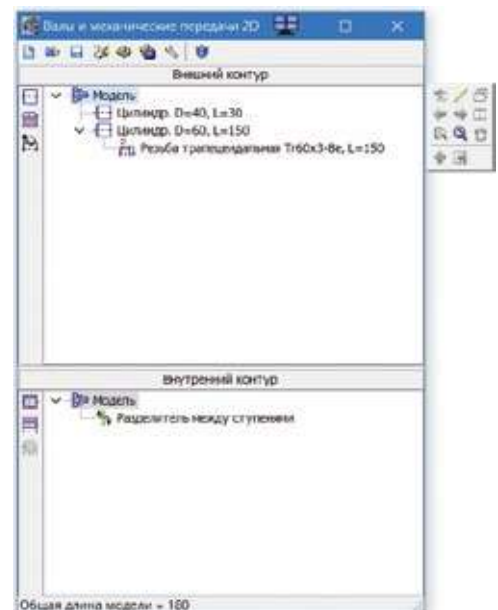


*Элементы конической передачи с круговыми зубьями*

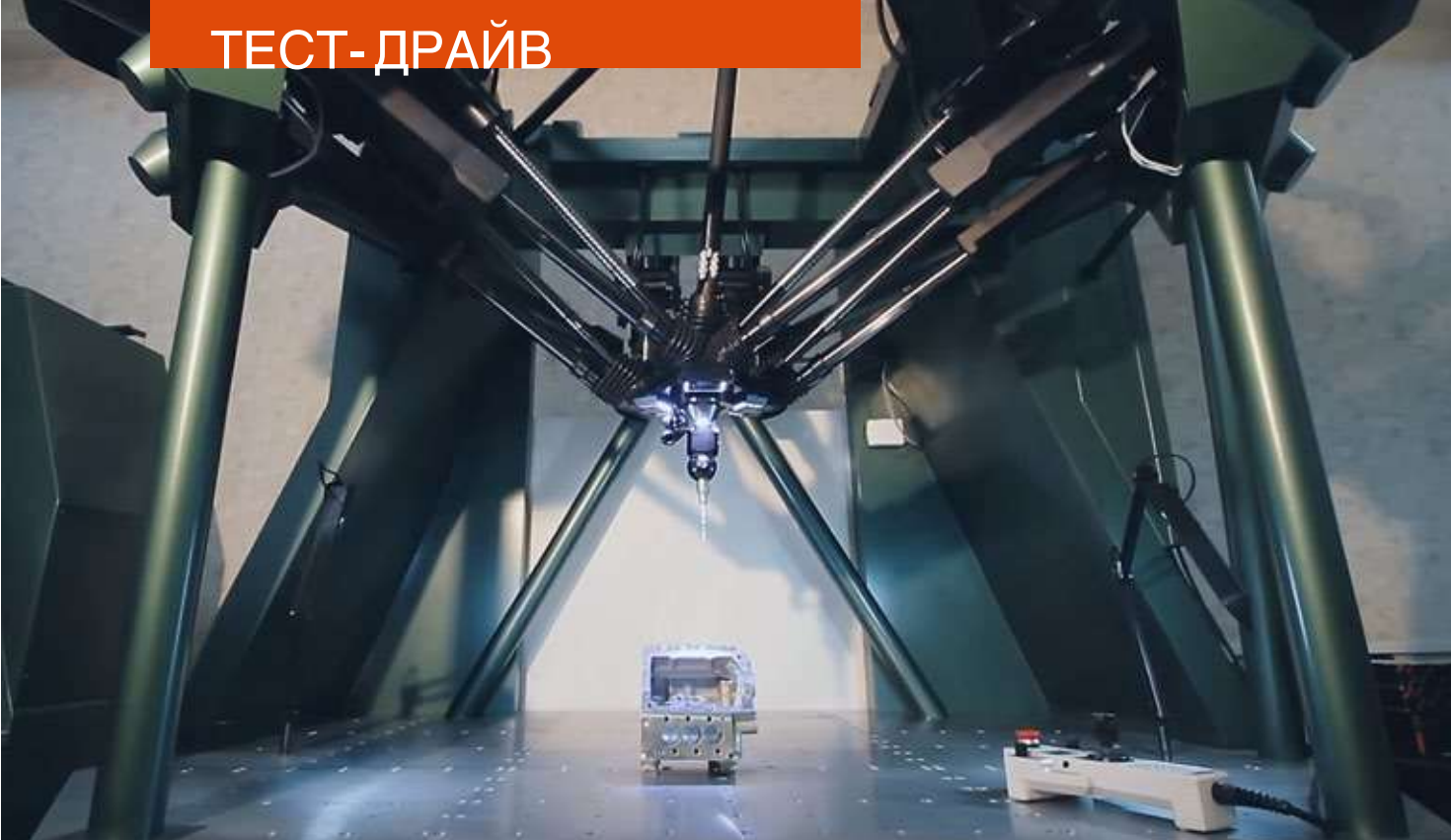
Применение числовых программных систем управления позволяет напрямую применять результаты измерения зубчатых колес для повышения качества. Так, например, для станков с ЧПУ достаточно ввести в корректоры значения погрешности обработанной детали, и при обработке следующей детали погрешности будут скомпенсированы.

Таким образом, значения отклонений, полученные в результате измерения зубчатого венца, применяются в современной технологии для корректировки наладки станка. Целью этой корректировки может быть не только повышение качества обработанного венца, но и оптимизация параметров зубчатого зацепления. В связи с этим методы и оборудование для контроля зубчатых венцов все глубже интегрируются в производственный процесс механической обработки. Ну а для контроля геометрии зубчатых колес с помощью 3D-сканеров геометрически корректная 3D-модель выступает как эталонная.

Контрольно-измерительные машины (КИМ), к которым и относятся 3D-сканеры, решают задачи измере-



*Диалоговое окно для построения и редактирования модели в 2D*



Контрольно-измерительная машина с технологией шестимерного сканирования «Лапик»

ния и контроля расположения точек поверхностей зубчатого венца в пространстве. КИМ бывают портальной, мостовой компоновки, а также других видов. На рисунке выше представлена прогрессивная контрольно-измерительная машина отечественного производства «Лапик» с технологией шестимерного сканирования.

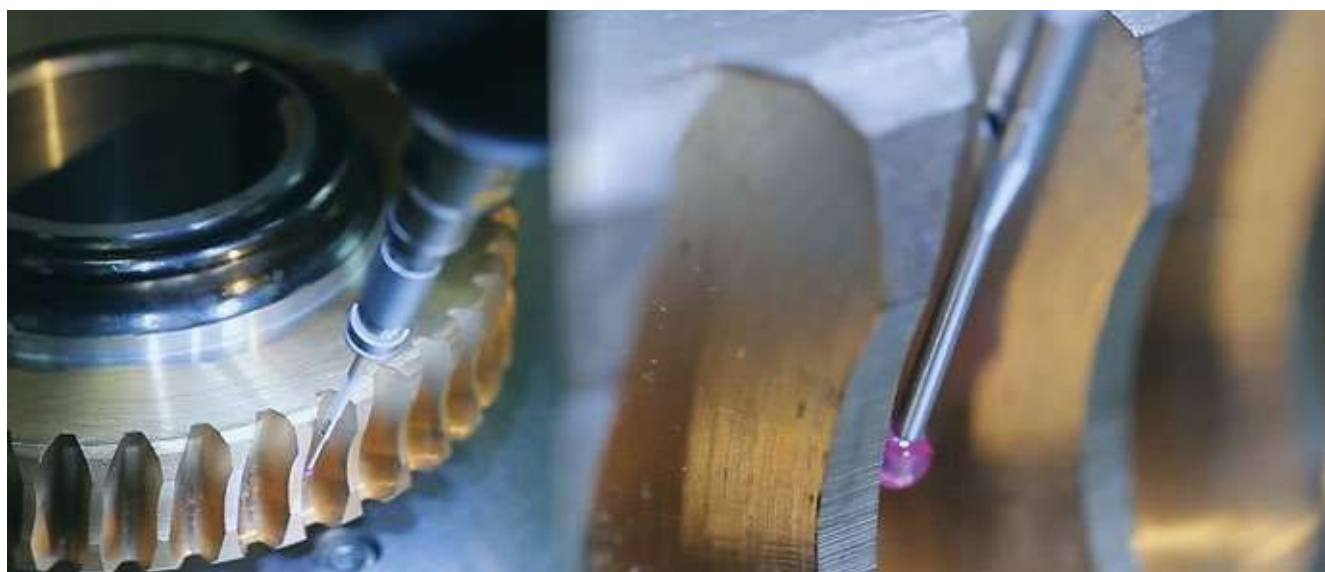
Помимо размеров такие машины определяют математическую модель формы изделия, которая с помощью специальной программы сравнивается с эталонной моделью, полученной, например, в КОМПАС-3D средствами приложения Вали и механические передачи 3D.

При измерении зубчатых и червячных колес с помощью КИМ не требуется поворотный стол, следовательно, неточности базировки и погрешности изготовления стола при измерении исключены. Измерительная головка «Лапик» работает по принципу токов утечки, обеспечивает чувствительность датчика менее 0,05 мкм.

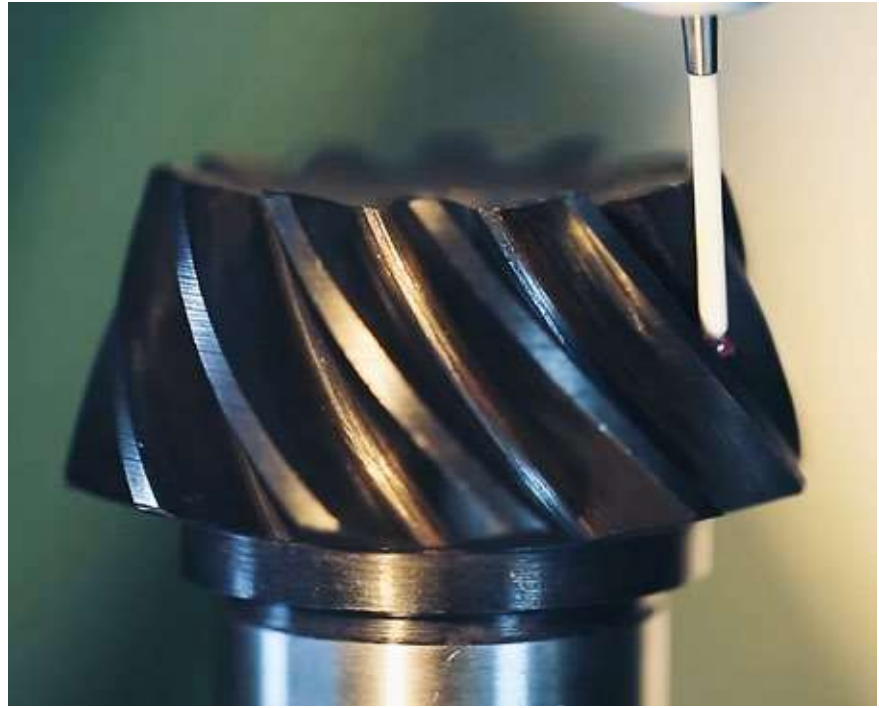
Для контроля зубчатых колес, спроектированных в обновленном приложении Вали и механические передачи 3D, использовалась КИМ «Лапик». На рисунках представлен результат измерений — карты отклонений полученных размеров при изготовлении конических колес с

круговыми зубьями от теоретических. На основании этих карт были внесены корректировки в настройки ЧПУ оборудования.

Несмотря на то, что приложение Вали и механические передачи 3D позволяет выполнить геометрический и проектный расчеты, а также расчеты на прочность и выносливость, для анализа действующих изгибных напряжений зуба и контактных напряжений на поверхности зуба необходимо выполнять расчеты методом конечных элементов, используя средства САЕ-систем. Достоверность и корректность результатов в этом случае также обеспечит правильная



Измерение червячных зубчатых колес на КИМ



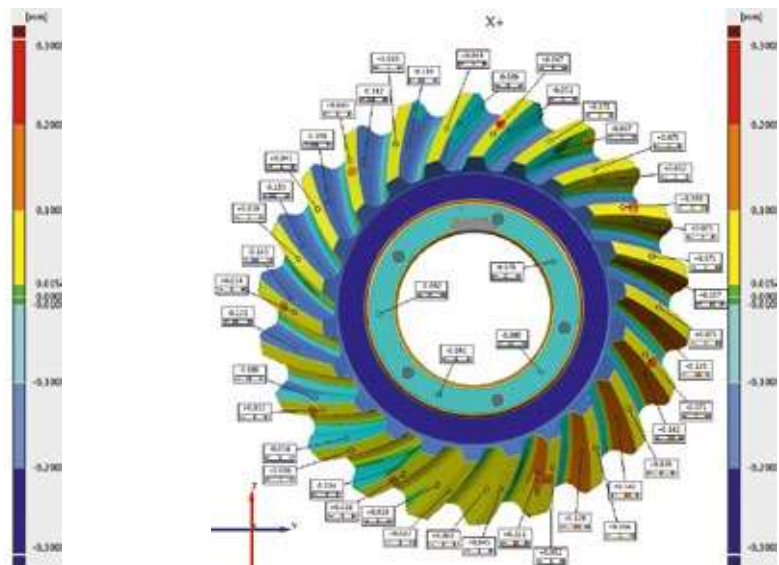
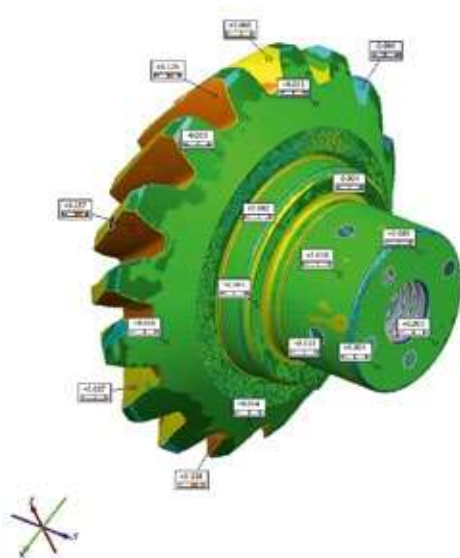
Измерение конического вала-шестерни с круговыми зубьями на КИМ «Лапик»

геометрически корректная модель зубчатого венца.

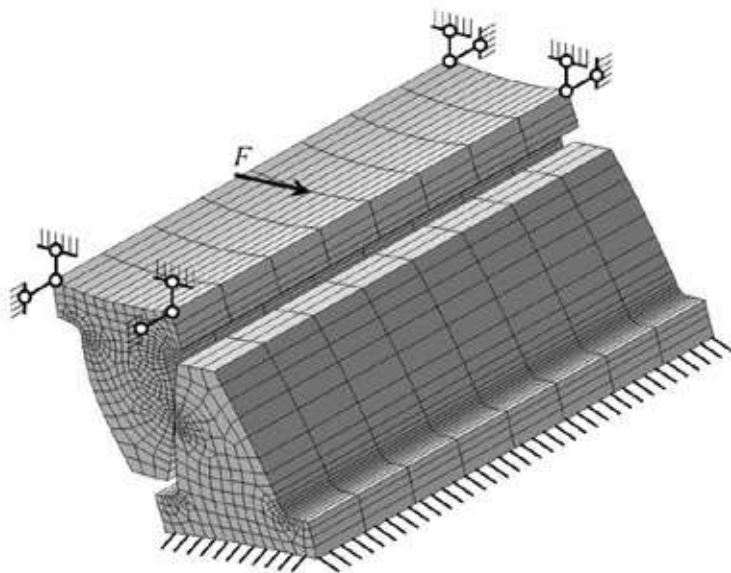
Здесь приведен пример расчетной модели для анализа зубьев в зацеплении на контактную прочность, а также пример карты распределения главных напряжений от изгиба в зубьях с различным смещением исходного контура.

Результаты моделирования других процессов, происходящих в зацеплении, например, моделирование охлаждения зубчатых колес разбрызгиванием масла, моделирование различных динамических процессов, также зависит от корректности геометрии исследуемой модели.

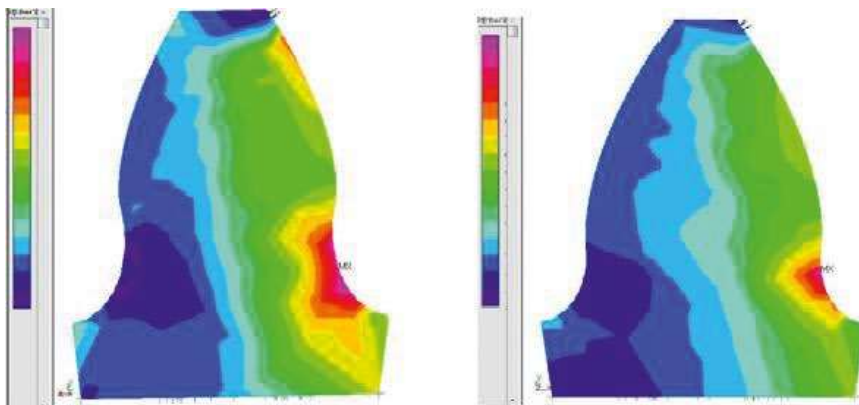
Возможность построения корректных пространственных моделей зубчатых колес имеет большое практическое значение. Они необходимы для изготовления зубчатых колес на станках с ЧПУ, изготовления прототипов опытных образцов и учебно-демонстрационных моделей



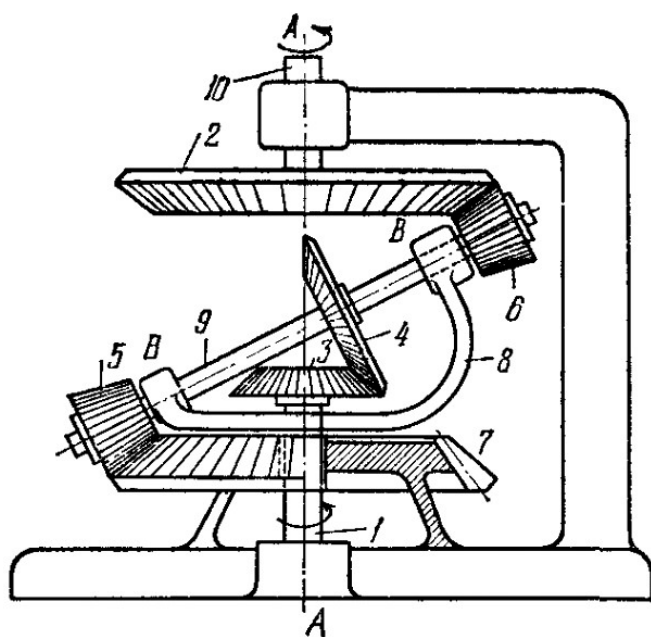
Цветовые карты отклонения размеров изготовленных зубчатых колес от эталонных 3D-моделей



Расчетная модель для определения контактных напряжений зубчатого зацепления



Пример распределения главных напряжений в зубьях с различным смещением исходного контура



Кинематическая схема зубчатого планетарного механизма трехступенчатого редуктора с коническими колесами

Еще один небольшой практический опыт использования результатов работы приложения Вали и механические передачи 3D

Современные средства быстрого прототипирования открывают перед инженерами неограниченные возможности для инженерного творчества, а также делают процесс обучения увлекательным. Так, например, нет смысла отрицать важность реальных механизмов в студенческих лабораториях. Эти механизмы используются при изучении основных базовых технических дисциплин — «Теория машин и механизмов» и «Детали машин». Наличие же 3D-принтера позволяет значительно расширить коллекцию механизмов, отличающихся по типу, назначению, количеству деталей и т.д.

В качестве примера приведу свою учебную модель планетарного редуктора с коническими зубчатыми колесами с круговыми зубьями, которая была создана в системе КОМПАС-3D с использованием приложения Вали и механические передачи 3D. Идею модели и ее кинематическую схему я увидел в справочнике И. И. Артоблевского «Механизмы в современной технике».

Приведу краткое описание кинематики механизма. С валом 1, вращающимся вокруг неподвижной оси А-А, жестко связано коническое зубчатое колесо 3, входящее в зацепление с коническим сателлитом 4. Он, в свою очередь, жестко связан с валом 9. С этим валом также жестко связаны конические сателлиты 5 и 6. Вал 9 вращается в подшипниках водила 8, свободно вращающегося вокруг оси 1. Сателлит 5 входит в зацепление с неподвижным коническим зубчатым колесом 7, а сателлит 6 входит в зацепление с коническим зубчатым колесом 10. Оно вращается вокруг неподвижной оси А-А. Передаточное число и такого редукторного механизма можно определить по формуле, приведенной ниже.

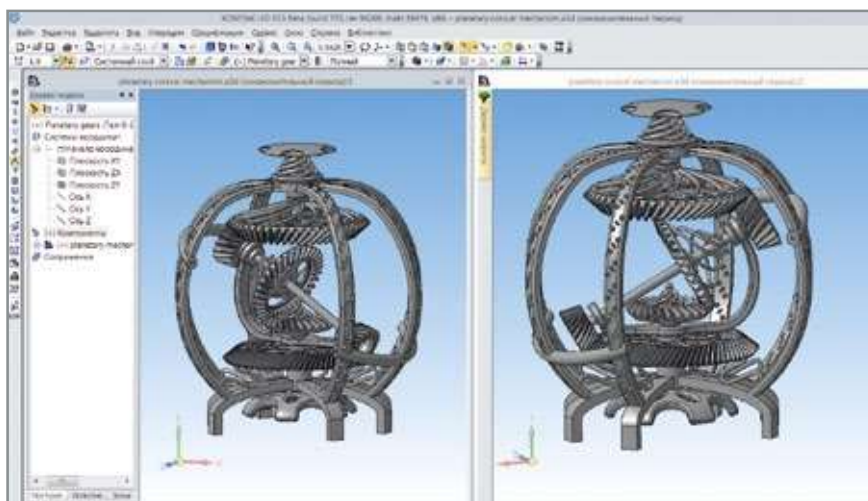
$$u = \frac{z_3 (z_2 z_5 - z_6 z_7)}{z_2 (z_3 z_5 + z_4 z_7)}$$

где  $z$  — числа зубьев зубчатых колес с индексом, соответствующим обозначению на кинематической схеме.

Имея в арсенале пробную версию приложения Вали и механические передачи 3D, я немного усложнил задачу, решив применить не просто конические зубчатые колеса, а конические зубчатые колеса с круговыми зубьями, тем более что приложение позволяет строить такие колеса точно. Поскольку целью построения данной модели я ставил наглядность, в результате у меня получилась модель, которую вы видите...



*Прототип модели планетарного механизма с коническими зубчатыми колесами с круговыми зубьями в процессе сборки*



*Модель планетарного редуктора с коническими зубчатыми колесами с круговыми зубьями*

Впоследствии эта модель редуктора была воспроизведена на 3D-принтере одним из преподавателей университета и продемонстрирована студентам.

Приложение Вали и механические передачи 3D позволяет исключить погрешность геометрического моделирования и служит фундаментом для CAE-анализа и САМ-подготовки производства. Созданные средствами приложения модели являются эталоном для 3D-измерений, гарантией

успешной «материализации» модели на оборудовании с ЧПУ, а также наглядным образцом для современных средств прототипирования.

Возможность изготовления высокоточных зубчатых передач особенно важна при разработке и производстве механизмов подачи станков, механизмов контрольно-измерительных приборов, а также механизмов, используемых в оборонной промышленности. ▲

Вали и механические передачи 3D позволяют исключить погрешность геометрического моделирования и служат фундаментом для CAE-анализа и САМ-подготовки производства