

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИНТЕЗА ЗАЦЕПЛЕНИЙ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Патрушев Б.А.

ООО «Научно-Технологический центр «Редуктор», Санкт-Петербург

Ключевые слова: программное обеспечение, математическое 3D-моделирование, численные алгоритмы, сферическая эвольвента, эвольвентно-коническая поверхность, коническая передача с круговыми зубьями, локализация пятна контакта, зубофрезерование с ЧПУ, САПР.

Аннотация. В работе изложены основополагающие принципы и алгоритмы, на которых базируется специализированное программное обеспечение для проектирования, 3D-моделирования и анализа работы конических зубчатых передач с эвольвентным зацеплением. В частности, представлены результаты применения, описание функций и возможности новой многофункциональной программы, позволяющей проводить базовые и специальные расчеты конических зубчатых передач и генерировать высокоточные трехмерные модели с возможностью варьирования параметрами синтеза для локализации пятна контакта. Реализована методика построения переходной кривой для конических передач и вследствие поверхности неактивной части впадины зубьев, основанная на определении параметров кривой Безье. Осуществлено применение программного обеспечения на производстве, для проектирования и изготовления по 3D-моделям, на четырехосевых станках с ЧПУ, конических зубчатых пар с круговым, равновысоким зубом.

ENGINEERING SOFTWARE FOR DESIGN, 3D MODELING AND SYNTHESIS OF BEVEL GEARS

Patrushev B.A.

ООО “Scientific and Technological Center “Reductor”, Saint- Petersburg

Keywords: software, mathematical 3D modeling, numerical algorithms, spherical involute, involute - conical surface, spiral bevel gear, contact patch localization, CNC gear hobbing, CAD.

Abstract. The paper presents the fundamental principles and algorithms on which specialized software for design, 3D modeling and analysis of the operation of bevel gears with involute engagement is based. In particular, it presents the application results, description of functions and capabilities of a new multifunctional program that allows performing basic and special calculations of bevel gears and generating high-precision three-dimensional models with the ability to vary synthesis parameters to localize the contact patch. A method for constructing a transition curve for bevel gears and, as a result, the surface of the inactive part of the tooth gullet, based on determining the parameters of the Bezier curve, has been implemented. The software has been applied in production for designing and manufacturing spiral bevel gear with constant tooth taper using 3D models on 4-axis CNC machines.

Введение

Этапы жизненного цикла продукции любой машиностроительной отрасли, в частности зубообрабатывающей, на стадиях конструкторской и технологической подготовки изделия, подразумевают активное использование систем трехмерного автоматизированного проектирования (САПР) и специальных вычислительных программ высшего уровня для ЭВМ. Использование указанных инструментов позволяет находить решения в ряде весьма значимых и ответственных задач, начиная от геометрических расчетов зубчатого венца и заканчивая анализом зацепления, определения формы и положения пятна контакта под нагрузкой.

Как правило, для проектирования зубчатых передач САПР обладают дополнительными расчетными модулями, позволяющими проводить простые, приемлемые для разработки конструкторской документации, базовые расчеты геометрии зубьев и прочностных характеристик, с последующей генерацией твердотельной 3D-модели зубчатой пары. Технологические аспекты производства, от которых будет зависеть микрогеометрия

контактирующих поверхностей, определяющая качество зацепления (локализация пятна контакта, отсутствие кромчатого контакта, вибро-акустические показатели и т.п.), что особенно важно для конических и гипоидных передач с криволинейными зубьями [1], в этом приложении не рассматриваются. Поэтому более значимым и трудоемким этапом будет являться выбор технологического сценария формообразования зацепляющихся поверхностей зубьев [2], включающей в себя расчеты наладок зубообрабатывающего оборудования и геометрии зуборезного инструмента, основанные на проведении предварительного синтеза передачи, обеспечивающего правильную локализацию пятна касания, подтвержденную решением задачи геометро-кинематического анализа зацепления [3]. Указанные методы позволяют добиться согласования формы контактирующих поверхностей с требуемым законом передачи движения, а также произвести анализ зацепления под нагрузкой с использованием алгоритма численного решения контактной задачи теории упругости [4, 5]. Реализация программных решений таких методов включает в себя и другие функции, возможности, позволяющие полностью проработать технологию изготовления и определить результирующее качество изделия в металле, с учетом предполагаемых условий работы и погрешностей монтажа. Программные комплексы такого уровня зачастую поставляются в комплекте с соответствующим зубообрабатывающим оборудованием одноименного завода изготовителя, их совокупное применение находит свое место на предприятиях, специализирующихся на производстве непосредственно самих зубчатых колес и шестерен [6, 7].

Имеющиеся на российском рынке цифровых продуктов САПР для проектирования механических передач зацеплением обладает весьма скудным набором функций, крайне низкой производительностью при генерации твердотельной 3D-модели конической пары, отсутствием возможности проведения расчетов по зарубежным стандартам, декорреляции проводимых расчетов с технологией изготовления и другими существенными недостатками [8].

Материалы и методы исследований

Приемы виртуального трехмерного формообразования любой поверхности, обладающей сложной геометрической формой полученной при помощи резания методами обката или копирования, могут быть реализованы различными способами. Один из них предполагает симуляцию технологического процесса формообразования с использованием базовых функций САПР, например, для чистовой зубофрезерной операции нарезания конических колес с круговым зубом двойным двусторонним способом [9], зная схему образования зубьев, геометрию заготовки и зуборезного инструмента, координаты их взаимного расположения и законы изменения траекторий их движения, можно смоделировать весь процесс резания, в ходе которого будет определено пересечение тел инструмента и заготовки. Используя функцию вычитания одного тела из другого, на каждой фазе станочного зацепления в ходе симуляции процесса обката будет сформирована поверхность зубьев на модели заготовки. Такой прием симуляции зуборезных операций автоматизирован и реализован в виде встроенного модуля у некоторых импортных САПР [10]. Еще один способ, о котором будет идти речь в данной работе, заключается в определении координат поверхностей зубчатых венцов при помощи численных алгоритмов расчета соответствующих векторно-параметрических уравнений.

Несмотря на разнообразие цифровых продуктов, предназначенных для проектирования зубчатых передач, в каждом из них заложены базовые, расчетные выражения и функции. В настоящей работе при разработке исходного кода программного обеспечения для расчета геометрических параметров, проверки зацепления на их основе и определения прочностных характеристик конической зубчатой пары были использованы положения из зарубежного [11] и доработанного отечественного [12] стандартов, а также монографии [13]. Таким образом, первым этапом является расчет геометрии и проверки на её основе работоспособности передачи. Проведение расчетов на этом этапе может проводиться без подключения модуля трехмерной визуализации с целью сокращения времени вычислений. Положительный результат исчислений используется при разработке РКД, а также сохраняется и используется программой для дальнейшего синтеза передачи и генерации трехмерных моделей.

Численный алгоритм формирования теоретической поверхности зуба заключается в процессе построения пространственно сложной формы объекта, изменение которой вдоль определенного вектора может быть описано математически и соответственно может быть реализовано на определении и дальнейшем преобразовании массива сечений этого объекта. Указанные принципы моделирования используются для построения цифровых 3D-моделей многих нетипичных деталей машин, в частности являются одним из способов виртуального формообразования зубчатых передач.

Поскольку конические передачи в своём подавляющем большинстве имеют сферически эвольвентное зацепление (рис. 1), то активные части профилей их зубьев представляют собой эвольвентно-коническую поверхность, сечение которой на поверхности сферы заданного радиуса r , с центром в вершине базового конуса, образующая которого является тем же радиусом r , представляет собой пространственную трехмерную кривую, именуемую сферической эвольвентой.

Используя векторно-параметрическое уравнение для определения координат точной сферической эвольвенты в трехмерном пространстве системы XYZ , записанное на основе фундаментальной эвольвентной геометрии [14], проводится его доработка до следующих видов:

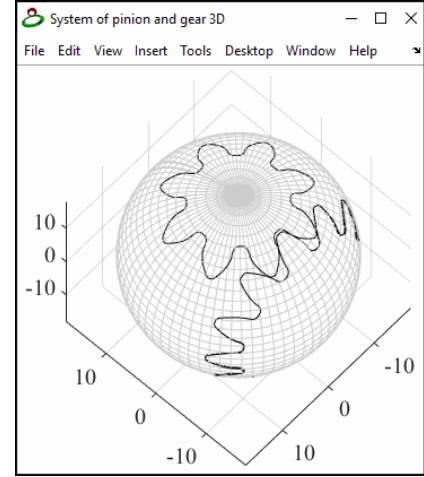


Рис. 1. Ортогональная зубчатая коническая пара, усеченная сферой

$$M_C = \begin{bmatrix} r(j) \left(\cos(\psi_b(i)) \sin(\delta_b) \cos(\psi_c(i)) + \sin(\psi_b(i)) \sin(\psi_c(i)) \right) \\ r(j) \left(\cos(\psi_b(i)) \sin(\delta_b) \sin(\psi_c(i)) - \sin(\psi_b(i)) \cos(\psi_c(i)) \right) \\ r(j) \left(\cos(\psi_b(i)) \cos(\delta_b) \right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_D = \begin{bmatrix} r(j) \left(\cos(\psi_b(i)) \sin(\delta_b) \cos(\psi_d(i)) + \sin(\psi_b(i)) \sin(\psi_d(i)) \right) \\ r(j) \left(\sin(\psi_b(i)) \cos(\psi_d(i)) - \cos(\psi_b(i)) \sin(\delta_b) \sin(\psi_d(i)) \right) \\ r(j) \left(\cos(\psi_b(i)) \cos(\delta_b) \right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\psi_b(i) = \psi(i) \sin(\delta_b)$, $r(j)$ – образующая базового конуса, ограниченная внутренним и внешним базовым конусным расстоянием $r_i \leq r \leq r_o$, $\psi(i)$ – угол поворота плоскости, катящейся без скольжения по базовому конусу. Величина δ_b и параметры $\psi_c(i)$, $\psi_d(i)$ определены следующими выражениями:

$$\delta_b = \arcsin(\sin(\delta) \cos(\alpha_n)), \quad (3)$$

$$\psi_c(i) = \psi(i) + \xi_p - \varphi(n) - \bar{\theta}(j), \quad (4)$$

$$\psi_d(i) = \psi(i) + \xi_p + \varphi(n) + \bar{\theta}(j), \quad (5)$$

здесь δ – угол делительного конуса, α_n – угол главного профиля, ξ_p – половинный угол сектора основания базового конуса, дуга которого образована начальными точками эвольвент правой и левой сторон зуба, $\varphi(n)$ – угловое расстояние между одноименными поверхностями двух соседних зубьев, $\bar{\theta}(j)$ – угол разворота сечения для формирования заданной линии зуба (для прямой линии зуба $\bar{\theta}(j) = 0$).

На рисунке 2 представлена трехмерная математическая модель впадины зубчатого венца шестерни, вогнутая и выгнутая части образованы массивом сферических эвольвент, координаты которых определены при помощи выражений (1)-(5), и отображены в виде поверхности сетки, ленточка впадины и переходная поверхность отображены в виде кривых каждого сечения.

Программным интерфейсом предусмотрены функции настройки точности построения математических моделей, заключающиеся в редактировании количества переменных в массивах с индексами i и j , что в свою очередь определяет задавать количество генерируемых сечений поверхности и количество точек, используемых при построении кривой каждого сечения соответственно. Индексы C и D обозначают принадлежность выражения к левой и правой сторонам зуба, от англ. “Coast side”, “Drive side”. Определение отдельно стоящих выражений эвольвентно-конической поверхности для каждой из сторон зубьев позволяет минимизировать использование матриц преобразования и поворота, а также является актуальным для передач, в которых угол профиля разноименных сторон зуба имеет разные значения – гипоидных.

Используя выражения (1)-(5) можно также определить координаты активных частей боковых поверхностей всех зубьев шестерни и зубчатого колеса. Для правильного сопряжения элементов зубчатой пары в пространстве с учетом межосевого угла E используется матрица поворота в трехмерном пространстве вокруг оси ординат OY :

$$M_y(E) = \begin{bmatrix} \cos(E) & 0 & \sin(E) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(E) & 0 & \cos(E) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

На рисунке 3 представлена окончательно сформированная математическая модель введенных в зацепление поверхностей зубчатого венца шестерни и колеса не ортогональной спиральной конической передачи.

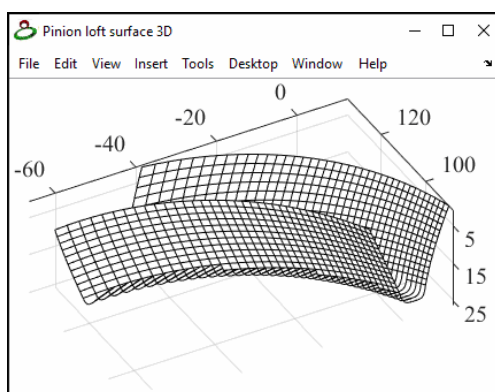


Рис. 2. Поверхность впадины зубчатого венца шестерни спиральной конической передачи

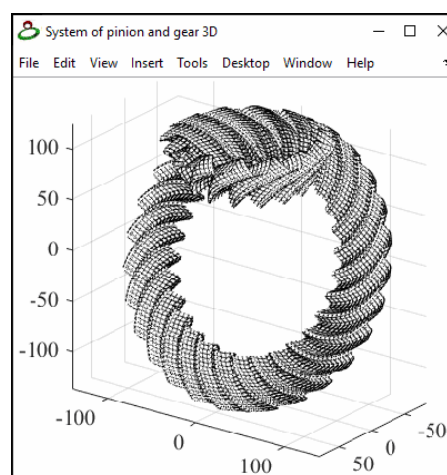


Рис. 3. Сопряженные поверхности зубчатых венцов спиральной конической передачи

Схема образования боковых поверхностей зубьев по выражениям (1) и (2) определяющих их координаты в пространстве, позволяет реализовать теоретически точное зацепление, в котором боковые поверхности являются сопряженными. Зубчатая передача с таким типом зацепления, без учета погрешностей изготовления и монтажа, обладает постоянством передаточного отношения на каждой его фазе, то есть передает строго равномерное вращение. Но поскольку более актуальным и надежным является приближенный тип зацепления [15], с несопряженными боковыми поверхностями, необходимо преднамеренно ввести отклонения формы этой поверхности, например, с помощью профильных и продольных отводов. Такого рода модификации боковой поверхности позволяют в первую очередь избежать кромчатого контакта, возникающего вследствие погрешностей изготовления, монтажа, деформаций валов и их опор под нагрузкой, чреватых преждевременным выходом передачи из строя. В некоторых случаях применение модификаций позволяет улучшить прочностные и ресурсные характеристики зацепления, повысить контактную и изгибную прочность зубьев. Параметры микрогеометрии, определенные профильной модификацией, дают возможность

проконтролировать величину ошибки углового положения ведомой шестерни [16], улучшить качество процесса пересопряжения зубьев – повысить плавность работы и соответственно снизить показатели уровня шума. Модификация профиля зуба также позволяет избежать кромчатого контакта у его вершины, уменьшить энергетические потери в зацепление, отсрочить начало процессов микропиттинга и износа боковой поверхности [17].

В программном обеспечении, описываемом в настоящей работе, реализованы функции определения параметров микрогеометрии боковых поверхностей при помощи корректировок углов профиля и линии зубьев, двойной модификации по линии зуба – бочкообразности и параболического фланкирования, и модификации профиля зуба с использованием бочкообразности. Численный алгоритм реализации указанных функций заключается в угловом смещении всех точек исходной, не модифицированной боковой поверхности на определенное значение. Необходимый разворот осуществляется с использованием матрицы поворота (6). Численное значение угла поворота каждой точки вычисляется по формулам:

$$\varphi_{lc} = [a_{lc}(r(j) + b_0 - r_e)^2], \quad (7)$$

$$\varphi_{pc} = [a_{pc}(\psi(i) - \psi((i_{\max} - i_{\min})/2 + p_c))^2], \quad (8)$$

$$\varphi_{sac} = [a_{sac}(r(j) - r(1))^2], \quad (9)$$

$$\varphi_{pac} = [a_{pac}(\psi(i) - \psi(1))^2], \quad (10)$$

$$\varphi_{iper} = [a_{iper}(r(1) - r(i) + r_{fi})^2], \quad (11)$$

$$\varphi_{oper} = [a_{oper}(r(i) + r_{fo} - r_e)^2], \quad (12)$$

где b_0 – значение ширины зубчатого венца с установленным центром концентричности продольной модификации, p_c – отклонение от срединного номера элемента массива, состоящего из значений углов развертки эвольвенты, в котором необходимо установить центр концентричности профильной модификации, r_{fi} и r_{fo} – длина фланкированного участка, отсчитанная от малого и большого торца соответственно, коэффициенты a_{lc} – параболы линии зуба, a_{pc} – параболы профиля зуба, a_{sac} – корректировки угла линии зуба, a_{pac} – корректировки угла профиля зуба, a_{iper} – параболы фланка малого торца, a_{oper} – параболы фланка большого торца. Идеология выражений (11) и (12) при необходимости может быть использована для реализации профильного фланкирования.

Расшифрованные выше параметры синтеза зацепления, характеризующие величины отводов, их форму и координаты центра концентричности нулевой модификации, в разработанном ПО могут задаваться индивидуально для каждой из сторон зубьев, а также отдельно для шестерни и зубчатого колеса.

Любую точную математическую 3D-модель зубчатой передачи можно проверить на тип сопряжения ее зацепляющихся поверхностей. Для более наглядной демонстрации необходимо преднамеренно осуществить поворот одного из элементов зубчатой пары, при неподвижном втором, на небольшой угол ($\sim 0,01^\circ$) вокруг своей оси, тем самым вызвав незначительное врезание поверхностей, находящихся в контакте. Как видно из рисунка 4, а результат пересечения представляет собой линейный контакт, свидетельствующий о точном зацеплении и сопряжении боковых поверхностей. На рисунке 4, б изображена та же самая передача при том же пространственном положении её элементов, но с тем лишь отличием, что боковые поверхности шестерни модифицированы. Как можно видеть области пересечений представляют собой некое подобие мгновенных контактных площадок характерной эллиптической формы, что доказывает наличие модификаций зацепляющихся поверхностей одного из элементов зубчатой пары (или обеих сразу) и гарантирует приближенный тип зацепления.

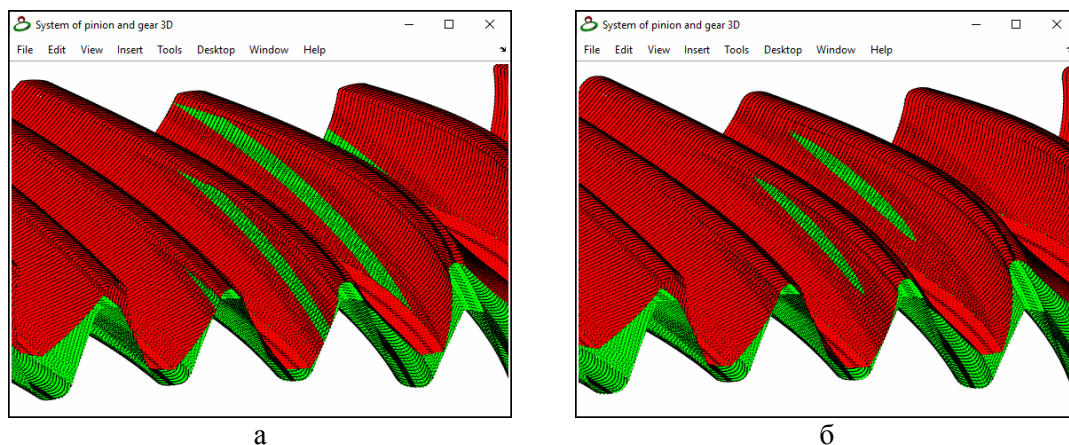


Рис. 4. Визуальное сравнение зацепления конической передачи с линейным (а) и точечным (б) контактами

Изменение и контроль параметров микрогеометрии осуществляется путем включения соответствующего модуля программы для синтеза зацепления, результатом работы которого являются представление пользователю информации о модификациях в виде соответствующих двухмерных графиков, эскизов полей зазоров и трехмерных эскизов впадины зубьев. Графики зависимости расстояния между каждой парой двух эквивалентных точек модифицированной и номинальной поверхности от соответствующего углового положения по высоте зуба или значения ширины для линии зуба (рис. 5), позволяют проводить количественную оценку изменения микрогеометрии. Для качественной оценки используются эскиз боковой поверхности (рис. 6, а) и трехмерная поверхность впадины зубчатого венца (рис. 6, б) с подсвеченной областью поля зазора между номинальной и модифицированной поверхностями, значение которого не превышает заданное пользователем. Настройками интерфейса (рис. 7) также предусмотрен выбор необходимых к отображению графических результатов, например, графических представлений суммарного поля зазоров образованного применением всех модификаций сразу или же только одной из них.

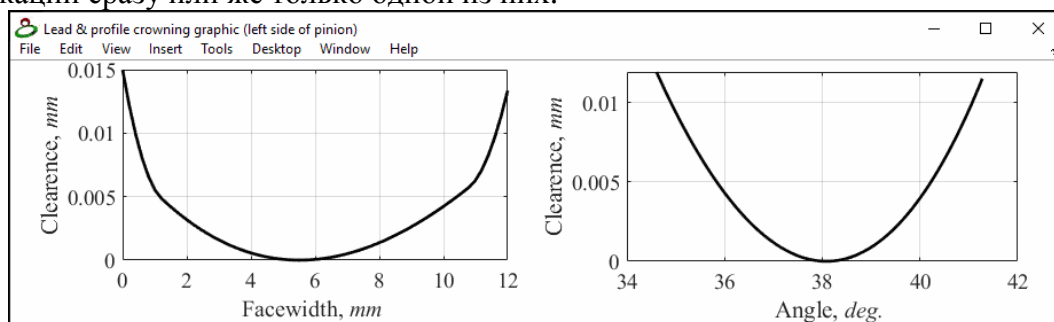


Рис. 5. Графики оценки величины профильной и продольной модификаций

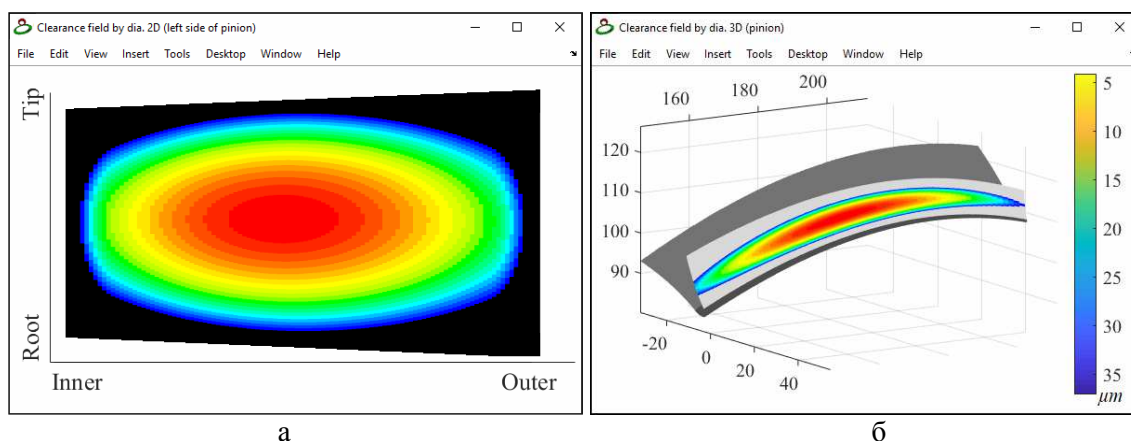


Рис. 6. Проекция активной части боковой поверхности зуба (а) и математическая 3D модель поверхности впадины с градиентной шкалой (б)

Необходимые для полного замыкания контура зуба кривые сечения вершинной ленточки, дна впадины и переходной кривой также реализованы в настоящем программном решении на поверхности одноименной сферы, используемой для развертки самой эвольвенты. Идеология образования кривой ленточки вершины и впадины не представляет интереса, поскольку, используя расчеты геометрических параметров зубчатого венца в совокупности с параметрической формой записи окружности, можно рассчитать координаты поверхностей соответствующих конусов.

Взаимодействие пользователя с функциями представленной программы осуществляется через разработанный интерфейс, включающий в себя вкладки с различными настройками работы самого приложения и его модулями, а также меню выбора необходимых расчетов и подключаемых компонентов, ячейки ввода исходных геометрических параметров и отображения конечных рассчитанных, кнопки запуска построения математических моделей и экспорта полученных данных, индикацию корректности исходных параметров и прочие опции. В силу присутствия принципиальных различий в численных алгоритмах, разработанных для моделирования переходной поверхности зубьев передач, проектируемых по разным осевым формам, а также наличия различных вариаций теоретической линии зубьев, в большей степени присущих для конических пар с равновысоким зубом, были сформированы отдельные версии программ для каждой из конструктивных осевых форм.

Представленный на рисунке 7 интерфейс относится к версии программы предназначенной для работы с коническими передачами, проектирование и расчет геометрии которых осуществляется по стандарту ANSI/AGMA ISO 23509-A08 с конструктивной формой зуба характеризующейся расположением в одной точке вершин делительного конуса и впадин. Версия, предназначенная для работы с передачами, обладающими равновысоким зубом, для которых характерна параллельность образующих конусов делительного, впадин и вершин зубьев, использована для создания иллюстраций (рис. 1-6) настоящей статьи.

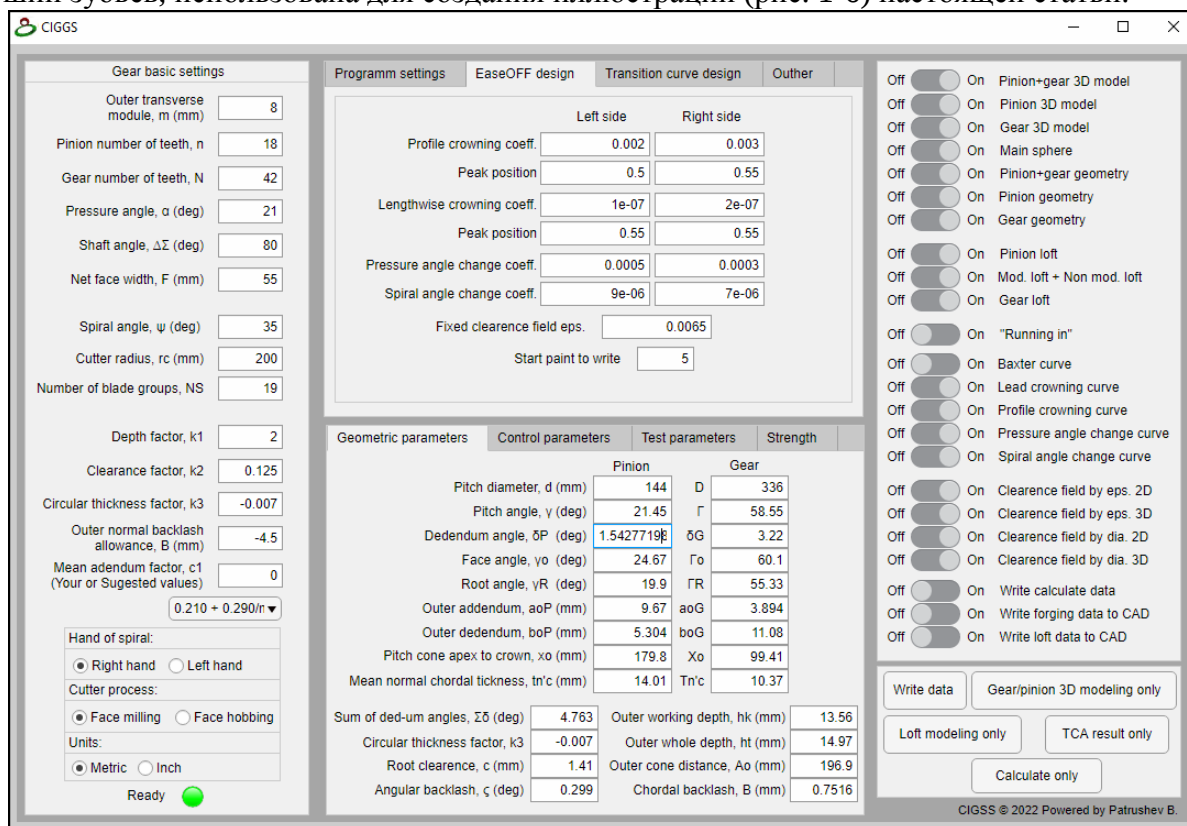


Рис. 7. Общий вид программного интерфейса

Запуск программного интерфейса и работа в нем осуществляется после установки необходимых библиотек для функционирования автономных приложений разработанных в среде MatLab. Таким образом, скомпилированный программный код включен в

установочный файл, предназначенный для инсталляции на операционных системах Windows не старше 10 версии.

Вопросы виртуального формообразования переходной кривой основания зуба, как правило, не рассматриваются в работах, связанных с тематикой синтеза зацепления и анализа контакта зубьев конических передач [18, 19]. Однако задача, посвященная определению численных алгоритмов, с помощью которых можно смоделировать поверхность ножки зуба является актуальной и имеет место быть обсуждаемой [20], особенно с учетом того, что форма и размеры галтели определяют фактический коэффициент запаса прочности ножки зуба при изгибных напряжениях.

В настоящем ПО была применена идея использования кривой Безье, популярной в векторной и компьютерной графике, в качестве переходной кривой. Поскольку всё программирование и компиляция исполняемого файла автономного приложения программы проводились в среде MatLab, которая обладает встроенным вычислительным модулем матриц Бернштейна для формирования кривой Безье, реализуется численный алгоритм определения опорных точек, служащих для построения кубической кривой Безье в пространстве. Притом важно отметить, что все опорные точки располагаются на главной сфере и соответственно переходная кривая также формируется на её поверхности. Реализованный функционал позволяет воспроизводить переходную поверхность, форма которой определяется автоматически с учетом параметров исходного контура зуборезного инструмента, а также альтернативным способом путем модернизации стандартной галтели. Альтернативный способ подразумевает интуитивное изменение координат опорных точек в ручном режиме с параллельным визуальным контролем формы поверхности в любом расчетном сечении зуба. Исходя из применения указанного способа на практике, можно отметить его актуальность в вопросах оптимизации переходной поверхности при проектировании конических передач с осевой формой зуба II и III, а также в силу того, что модернизированная форма основания зуба обладает большей несущей способностью, чем стандартная и может быть реализована в металле путем изготовления зубчатой передачи при помощи много координатных станков с ЧПУ.

Для создания трехмерной модели зубчатой пары в САПР используется функция импорта файла формата IGES, генерируемого расчетной программой, и фактически представляющего собой замкнутую поверхность одной впадины зубчатого венца, притом заведомо правильно сориентированную в пространстве. Координаты четырех точек, образующих контур зубчатого венца, также экспортируются расчетной программой и позволяют создать твердотельную модель предполагаемой заготовки, из которой будет проводиться вычитание поверхности впадины. На рисунке 8, а представлена твердотельная модель шестерни с подсвеченной импортированной поверхностью, на экспозиции рисунка 8, б окончательная сборка пары. Вышеописанные действия выполнены в системе Siemens NX, пригодной для создания управляющих программ станков с ЧПУ.

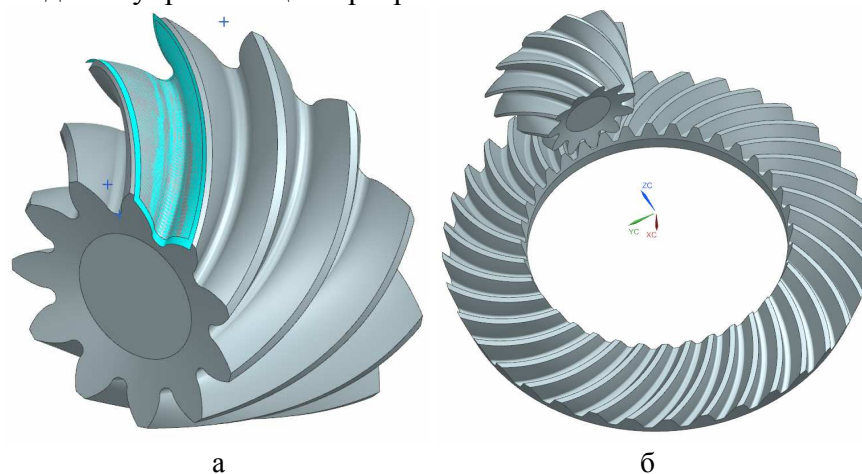


Рис. 8. Твердотельная 3D модель шестерни (а) спаренной с зубчатым колесом (б) конической передачи с круговыми зубьями импортированные в систему Siemens NX

Упомянув выше озвученное оборудование, подразумевается производство конических передач без использования классических технологических процессов формирования поверхности зубьев (протягивание, строгание, фрезерование резцовыми головками и пр.). Такая методика изготовления заключается в использование трехмерной модели передачи для написания управляющей программы многосторонней обработки для фрезерного станка с ЧПУ (CNC). Залогом успешного изготовления по такой методике является грамотно разработанная модель зубчатой пары, обеспечивающая правильное зацепление, а также учитывающая допуски на хордальные размеры и припуск под финишную обработку (в случае её применения). Не менее значимый вклад в успешное изготовление вносит составление управляющей программы оператором – наладчиком станка с ЧПУ с последующим его участием на этом этапе производства.

Несмотря на наличие определенных нюансов в методах зубофрезерования на много координатных станках CNC, такая технология нашла обширное применение в мировой практике изготовления конических передач с криволинейной линией зубьев. В частности, как альтернатива использования парка дорогостоящего зубофрезерного и зубошлифовального оборудования особенно актуальна при мелкосерийном производстве. Начало применения указанных методов совпадает с временным периодом должного этапа в развитие систем CAD и CNC. Окончательная популяризация приходится на 2008 год, характерная активным использованием 5ти осевых станков для изготовления конических передач с круговым зубом и остается востребованной в последующие годы [21-23].

Результаты

В рамках выполнения производственного заказа, с использованием описанного в настоящей работе программного обеспечения, была спроектирована зубчатая пара конической передачи с круговым зубом по осевой форме III. А также сгенерированы высокоточные трехмерные модели элементов пары, использованные для фрезеровки венца зубчатого колеса на 3х координатном станке с ЧПУ и фрезеровки венца ответной шестерни, установленной в 4ой оси. Результат многосторонней обработки зубчатых венцов по вышеописанной методике представлены на рисунке 9.

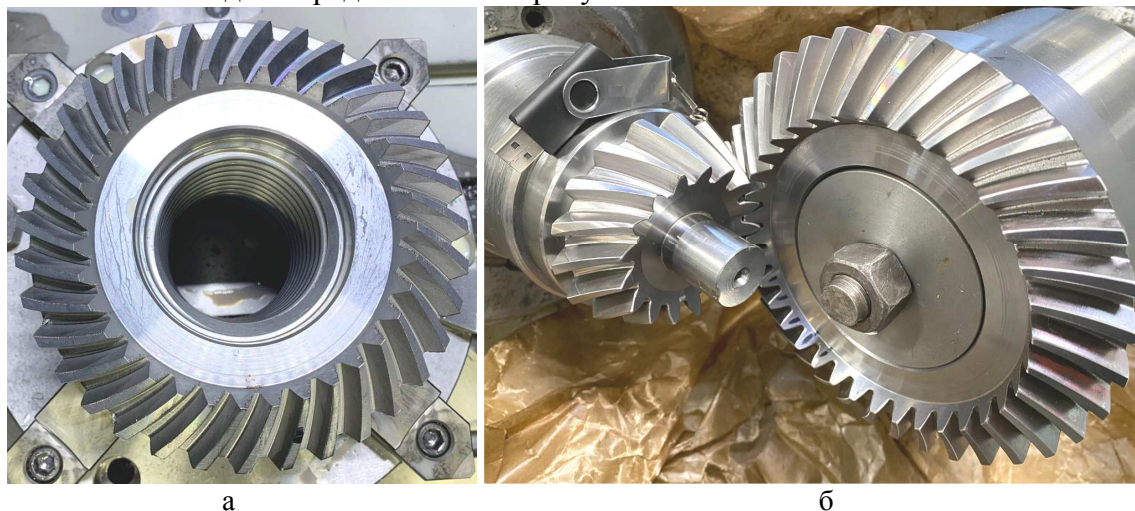


Рис. 9. Изготовленные образцы зубчатого колеса (а) в паре с шестерней (б)

Выводы

К отличительным особенностям предложенного программного обеспечения от отечественных аналогов, помимо всего прочего, можно отнести гибкость проводимых им расчетов и универсальность построения 3D моделей, в частности заключающихся в отсутствие равнозначности терминов «не рекомендовано» и «нельзя». Поэтому предполагается его использование только компетентными пользователями с пониманием дела и осознанием проводимых ими манипуляций. Исходя из практического опыта работы на производственной площадке, специализирующейся на изготовление широкой номенклатуры

зубчатых передач и передаточных механизмов, с помощью предложенного ПО становится возможным проектирование передач, не пригодных к расчету и моделированию, например, в программе фирмы Аскон – Компас Gear.

Заключение

Разработанное программное обеспечение успешно применяется в проектировании и производстве конических передач на 3-5ти осевых станках с ЧПУ. Совместимо с любой CAD/CAM/CAE системой, поддерживающей импорт векторной графики формата IGES. Может являться подспорьем для реализации полноценных программ анализа зацепления без/с нагрузкой (ТСА, LTCA) и решения других технологических задач изготовления конических передач, в том числе и с гипоидным смещением. Позволяет быстро и качественно генерировать высокоточные 3D модели конических зубчатых передач по зарубежным и отечественным стандартам, с осевыми формами зуба I, II, III (standard, duplex (TRL), constant tooth taper), со следующими типами линий зубьев: прямые, тангенциальные, круговые, «зерол», спиральные (логарифмическая спираль), эвольвентные. Обладает самостоятельным интерфейсом, универсальными функциями синтеза зацепления, оптимизации переходной кривой, настройками отображения результатов, экспортом полученных данных в графическом, текстовом и векторном форматах.

Список литературы

1. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф., Сегаль М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.
2. Lunin S.V. Direct Digital Simulation Modeling // Gear Solutions. 2004, vol. May, pp. 32-38.
3. Litvin F.L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory. – Cambridge: Univer Press, 2004. – 800 p.
4. Медведев В.И., Шевелева Г.И. Определение формы поверхностей спирально- конических зубчатых колес и параметров зубообрабатывающих станков из условий контактной прочности зубьев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – №4. – С. 75-82.
5. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Станкин, 1999. – 494 с.
6. Fan Q. Kinematical simulation of face hobbing indexing and tooth surface generation of spiral bevel and hypoid gears // Gear Technology. 2006, vol. January/February, pp. 30-38.
7. Davidson S.R. Simulation of spiral bevel gear tooth manufacturing to aid in one-piece gear shaft design // Gear Technology. 2019, vol. January/February, pp. 70-74.
8. Прилепский В.И. Зубонарезание конических и гипоидных колес в условиях экономического кризиса // Взгляды и мнения "и-Маш". – 2012. – Февраль. – 6 с.
9. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф. Руководство по расчету конических пар с круговыми равновысокими зубьями. СЗТЗС. – Саратов: ЦБТИ, 1963. – 183 с.
10. Vivet M., Libralato A., Verhoogen J., Jiránek P., Tamarozzi T. Advanced modelling of straight bevel gear contact for multibody simulations // Proceedings of ISMA Conference. 2022, pp. 2253-2267.
11. ANSI/AGMA ISO 23509-A08 Bevel and Hypoid Gear Geometry. – Alexandria, VA.: American Gear Manufacturers Association, 2008. – 138 p.
12. ГОСТ 19326-73 Передачи зубчатые конические с круговыми зубьями. Расчет геометрии. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 75 с.
13. Klingelnberg J. Bevel Gear. Fundamentals and Applications. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. – 354 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-43893-0.
14. Al-Daccak M.J., Angeles J., Gonzalez-Palacios M.A. The Modeling of Bevel Gears Using the Exact Spherical Involute // Journal of Mechanical Design. 1994, vol. 116, pp. 364-368. DOI: 10.1115/1.2919387.
15. Wildhaber E. Basic Relationships of Hypoid Gears // American Machinist. 1946, vol. 90, pp. 108-111.
16. Baxter M.L. Basic Geometry and Tooth Contact of Hypoid Gears // Industrial Mathematics. 1961, vol. 11, pp. 19-42.
17. Ulrich Kissling. Layout of the Gear Micro Geometry // Gear Technology. 2015, vol. September, pp. 51-63.
18. Kolivand M., Ligata H., Steyer G., Benedict D.K., Chen J. Actual Tooth Contact Analysis of Straight Bevel Gears // Journal of Mechanical Design. 2015, vol. 137, p. 093302. DOI: 10.1115/1.4031025.
19. Медведев В.И., Волков А.Э., Бирюков С.С. Алгоритмы синтеза и анализа зацепления эвольвентных прямозубых конических колес с локализованным контактом // Вестник МГТУ "Станкин". – 2019. – № 1. – С. 98-105.
20. Zeng H., Wang L., Sun H., Wang T., Gao Q. Optimized design of straight bevel gear tooth root transition surface // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2022, vol. 65, p. 36. DOI: 10.1007/s00158-021-03146-0.
21. Kawasaki K., Tsuji I., Gunbara H., Houjoh H. Method for remanufacturing large-sized skew bevel gears using CNC machining center // Mechanism and Machine Theory. 2015, vol. 92, pp. 213-229. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.05.013.

22. Chu C.H., Zhou Y., Liu E.M., Tang J. Optimal tool path generation and cutter geometry design for five-axis CNC flank milling of spiral bevel gears // Journal of Computational Design and Engineering. 2022, vol. 9, pp. 2024-2039. DOI: 10.1093/jcde/qwac103.
23. Zachert C., Greschert R., Schraknepper D., Brimmers J., Bergs T. Evaluation of the influence of different milling parameters and tool wear on the rim zone of a 5-axis milled large gear // Procedia CIRP. 2022, vol. 108, pp. 43-48. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.013.

References

1. Lopato G.A., Kabatov N.F., Segal M.G. Bevel and hypoid gears with circular teeth. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – 424 p.
2. Lunin S.V. Direct Digital Simulation Modeling // Gear Solutions. 2004, vol. May, pp. 32-38.
3. Litvin F.L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory. – Cambridge: Univer Press, 2004. – 800 p.
4. Medvedev V.I., Sheveleva G.I. Determination of the shape of the surfaces of spiral bevel gears and parameters of gear-processing machines from the conditions of contact strength of teeth // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2002, no. 4, pp. 75-82.
5. Sheveleva G.I. Theory of shape formation and contact of moving bodies. – M.: Stankin, 1999. – 494 p.
6. Fan Q. Kinematical simulation of face hobbing indexing and tooth surface generation of spiral bevel and hypoid gears // Gear Technology. 2006, vol. January/February, pp. 30-38.
7. Davidson S.R. Simulation of spiral bevel gear tooth manufacturing to aid in one-piece gear shaft design // Gear Technology. 2019, vol. January/February, pp. 70-74.
8. Prilepsky V.I. Gear cutting of bevel and hypoid wheels in conditions of economic crisis // Views and opinions of "i-Mash". 2012, vol. February, 6 p.
9. Lopato G.A., Kabatov N.F. Guide to the calculation of bevel pairs with circular teeth of equal height. SZTZS. – Saratov: CBTI, 1963. – 183 p.
10. Vivet M., Libralato A., Verhoogen J., Jiránek P., Tamarozzi T. Advanced modelling of straight bevel gear contact for multibody simulations // Proceedings of ISMA Conference. 2022, pp. 2253-2267.
11. ANSI/AGMA ISO 23509-A08 Bevel and Hypoid Gear Geometry. – Alexandria, VA.: American Gear Manufacturers Association, 2008. – 138 p.
12. GOST 19326-73 Bevel gears with circular teeth. Geometry calculation. – M.: Standards Publishing House, 1974. – 75 p.
13. Klingelnberg J. Bevel Gear. Fundamentals and Applications. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. – 354 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-43893-0.
14. Al-Daccak M.J., Angeles J., Gonzalez-Palacios M.A. The Modeling of Bevel Gears Using the Exact Spherical Involute // Journal of Mechanical Design. 1994, vol. 116, pp. 364-368. DOI: 10.1115/1.2919387.
15. Wildhaber E. Basic Relationships of Hypoid Gears // American Machinist. 1946, vol. 90, pp. 108-111.
16. Baxter M.L. Basic Geometry and Tooth Contact of Hypoid Gears // Industrial Mathematics. 1961, vol. 11, pp. 19-42.
17. Ulrich Kissling. Layout of the Gear Micro Geometry // Gear Technology. 2015, vol. September, pp. 51-63.
18. Kolivand M., Ligata H., Steyer G., Benedict D.K., Chen J. Actual Tooth Contact Analysis of Straight Bevel Gears // Journal of Mechanical Design. 2015, vol. 137, p. 093302. DOI: 10.1115/1.4031025.
19. Medvedev V.I., Volkov A.E., Biryukov S.S. Algorithms for the synthesis and analysis of the engagement of involute spur bevel gears with localized contact // Bulletin of MSTU "Stankin". 2019, no. 1, pp. 98-105.
20. Zeng H., Wang L., Sun H., Wang T., Gao Q. Optimized design of straight bevel gear tooth root transition surface // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2022, vol. 65, p. 36. DOI: 10.1007/s00158-021-03146-0.
21. Kawasaki K., Tsuji I., Gunbara H., Houjoh H. Method for remanufacturing large-sized skew bevel gears using CNC machining center // Mechanism and Machine Theory. 2015, vol. 92, pp. 213-229. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.05.013.
22. Chu C.H., Zhou Y., Liu E.M., Tang J. Optimal tool path generation and cutter geometry design for five-axis CNC flank milling of spiral bevel gears // Journal of Computational Design and Engineering. 2022, vol. 9, pp. 2024-2039. DOI: 10.1093/jcde/qwac103.
23. Zachert C., Greschert R., Schraknepper D., Brimmers J., Bergs T. Evaluation of the influence of different milling parameters and tool wear on the rim zone of a 5-axis milled large gear // Procedia CIRP. 2022, vol. 108, pp. 43-48. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.013.

Сведения об авторах:

Патрушев Богдан Анатольевич – ведущий инженер-конструктор опытно-конструкторского бюро
mostwantedbap@gmail.com

Information about authors:

Patrushev Bogdan Anatolyevich – leading design engineer of the experimental design bureau

Получена 10.02.2025