

# РЕИНЖИНИРИНГ ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ УНИФИЦИРОВАННОГО ОПИСАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

## *Reinżyniering przekładni zębatych na bazie modelu zunifikowanego opisu parametrów*

### *Reengineering of gear tools on the basis of the unified description of parameters*

V.A. PASICHNYK, B.S. VORONTSOV

**Аннотация:** Представлен оригинальный подход к технологии реинжиниринга зубчатых зацеплений для условий изношенных зубчатых колес. Рассмотрены современные аппаратно-программные комплексы создания электронного эталона зубчатого зацепления. Представлены модели унифицированного описания зубчатых зацеплений, инвариантные к исходному профилю зубчатого зацепления и оригинальное программное обеспечение, их реализующее.

**Ключевые слова:** Реинжиниринг, моделирование, зубчатое зацепление

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono oryginalne podejście do technologii reinżynieringu połączeń zębatych w warunkach zużytych kół zębatych. Przeanalizowano współczesne aparaturowo-programowe kompleksy tworzenia elektronicznego wzorca połączenia zębatego. Przedstawiono modele zunifikowanego opisu połączeń zębatych inwariantowe względem początkowego profilu zębatego zazębienia i oryginalny program ich realizacji.

**Słowa kluczowe:** reinżyniering, modelowanie, zębate zazębienie

**Abstract:** An original approach to the technology of gear reengineering for the conditions of worn gears is presented. The modern hardware and software complexes for creating an electronic standard for gearing are considered. Models of the unified description of gearing invariant to the initial profile of the gearing and original software that implements them are presented.

**Keywords:** reengineering, modeling, gearing

#### Введение

Реинжиниринг (обратный инжиниринг) – интенсивно развивающаяся технология, которая имеет широкие практические перспективы, требует научного подхода к его изучению для решения целого ряда проблем: рационального обоснованного выбора метода обратного инжиниринга, оборудования и программного обеспечения с учетом особенностей промышленных изделий. [1].

В зависимости от задачи реинжиниринга и исходного состояния зубчатых колес к измерительному оборудованию предъявляются различные требования. Если необходимо получить информацию по измерениям нового зубчатого колеса и потом его воспроизвести с максимальной точностью, необходимы координатно-измерительные машины высокой точности. Если мы получаем геометрическую информацию по изношенной детали, то точность измерения может быть на порядок меньше, но не превышать величину износа поверхности зубьев.

**Целью** данной работы является демонстрация возможностей реинжиниринга зубчатых зацеплений на базе современных аппаратно-программных комплексов и оригинального программного обеспечения.

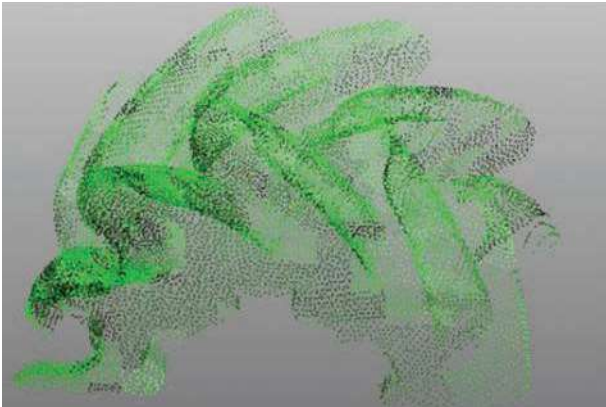
**Получение первичной информации.** Для получения первичной информации использовалась КИМ FARO Edge ScanArm HD (рис. 1) [2].



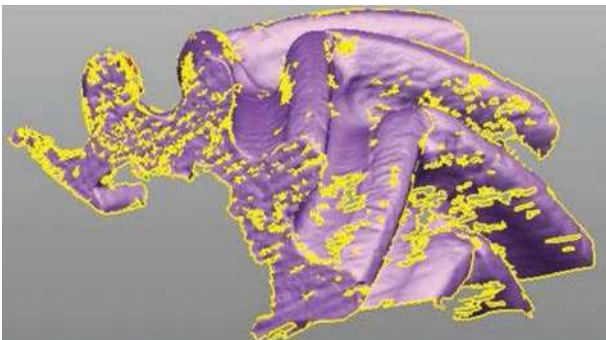
Рисунок 1. КИМ FARO Edge ScanArm HD  
Fig. 1. CIM FARO Edge ScanArm HD



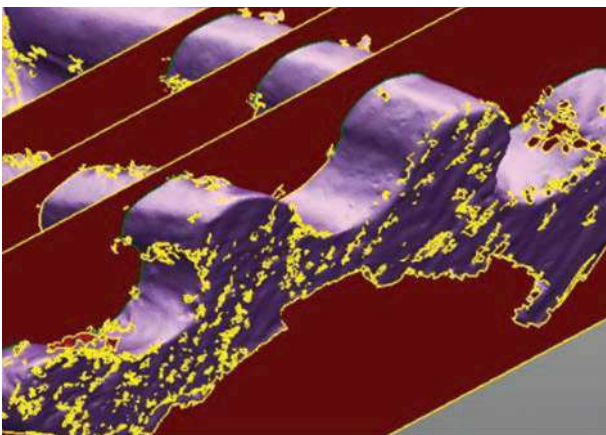
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2. Процесс получения исходной информации  
Fig. 2. The process of obtaining the initial information

Процесс получения исходной информации предусматривает этапы, в общем виде представленные на рис. 2).

После подготовки поверхности зубчатого колеса выполняется процесс его оптического сканирования (рис. 2,а). Бесконтактный лазерный сканер за один проход сканирует зону определенной фиксированной ширины. Чтобы оцифровать всю деталь, делается несколько сканирующих проходов с разных ракурсов, чтобы луч лазера мог добраться до затененных зон.

На следующем этапе (рис. 2,б) мы получаем облако точек. Необходимо отметить, что любая координатно-измерительная машина или 3D-сканер в результате сканирования выдает дискретный набор 3D-точек. Поскольку для работы с триангулированными данными применяются особые методы математического описания, отличающиеся от используемых для поверхностных или твердотельных САД-моделей, появился особый класс САПР, ориентированный на обработку и редактирование именно сканированных облаков точек.

Далее (рис. 2,в) формируется обволакивающая [3] поверхность, которая в случае изношенных зубчатых колес должна быть подвержена процедуре восстановления («лечения»).

На следующем этапе (рис. 2,г) для определения профиля зубьев шевронного колеса разбиваем построенную триангуляционную модель сечениями, параллельными торцу модели с шагом 5 мм. Для этого на торце выбираем три точки и через них проводим торцевую плоскость. В каждой из секущих плоскостей строим линии пересечения плоскостей и модели. Удаляем триангуляционную модель, получаем профили зубьев колеса в секущих плоскостях. После удаления секущих плоскостей получаем кривые, описывающие профили зубьев в различных сечениях. Удаляем случайно отклоненные кривые, соединяем разрывы и сглаживаем кривые в точках контакта. Для того, чтобы получить более достоверную информацию о профиле нескольких зубьев, мы поворачиваем все сечения вокруг оси колеса и сводим их к проекции на один зуб (рис. 3).

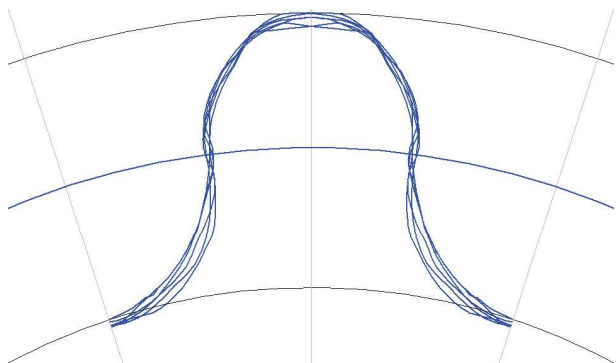


Рисунок 3. Совмещение профилей в один зуб  
Fig. 3. Combining the profiles into one tooth

**Формирование профиля зуба.** Подставляя значения координат полученных точек исходного контура в программу аппроксимации точек кривыми Безье получаем значения координат управляющих точек кривых. Для кривой, описывающей головку зуба имеем следующие значения:

$$x_0 = 0, y_0 = 0; x_1 = 0,028, y_1 = 0,735;$$

$$x_2 = 0,455, y_2 = 0,919; x_3 = 0,637, y_3 = 1.$$

Аналогичным образом получаем значения координат управляющих точек кривой Безье, описывающей профиль ножки зуба:

$$x_0 = 0, y_0 = 0; x_1 = -0,022, y_1 = -0,372;$$

$$x_2 = -0,162, y_2 = -0,670; x_3 = -0,735, y_3 = -1.$$

Найдем профиль производящей поверхности для сопряженного зубчатого колеса, используя тот же алгоритм. В нашем случае в зацеплении с передаточным отношением  $u=1$  участвуют одинаковые зубчатые колеса. Поэтому кривая, описывающая профиль, при повороте на  $180^\circ$  вокруг полюса зацепления должна взаимно накладываться. Кроме того, для колеса и для шестерни должен быть один исходный контур. В противном случае не будет выполняться основной закон зацепления, мгновенное передаточное отношение будет колебаться, что вызовет динамические нагрузки в точках контакта. Также не удастся обеспечить

линейный контакт в зацеплении, что снизит контактную прочность зубьев. Как видно из рис. 3, профили не совпадают, но известна область, ограничивающая профиль, который максимально соответствует заданному зацеплению.

Поэтому необходимо проанализировать граничные и внутренние профили по показателям, отражающим функциональные возможности зубчатого зацепления и выбрать наиболее подходящий.

Поворачиваем профиль до совпадения полюса с началом системы координат. По внешнему контуру строим точки и снимаем значения их координат. Затем полученные значения в программу аппроксимации точек кривыми Безье и получаем значения координат управляющих точек кривых. Для кривой, описывающей головку зуба имеем следующие значения:

$$x_0 = 0, y_0 = 0; x_1 = 0,01, y_1 = 0,25;$$

$$x_2 = 0,05, y_2 = 0,72; x_3 = 0,71, y_3 = 1.$$

Аналогичным образом получаем значения координат управляющих точек кривой Безье, описывающей профиль ножки зуба:

$$x_0 = 0, y_0 = 0; x_1 = -0,01, y_1 = 0,08;$$

$$x_2 = -0,01, y_2 = -0,81; x_3 = -0,87, y_3 = -1,12.$$

На рис. 4 показаны результаты расчета и отрисовки профиля зуба.

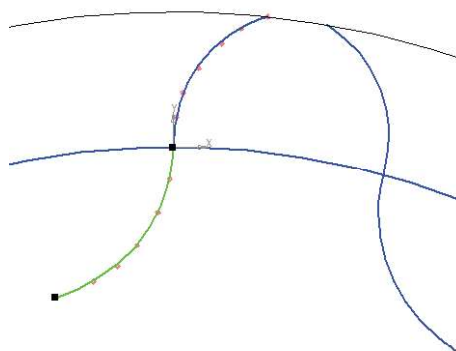
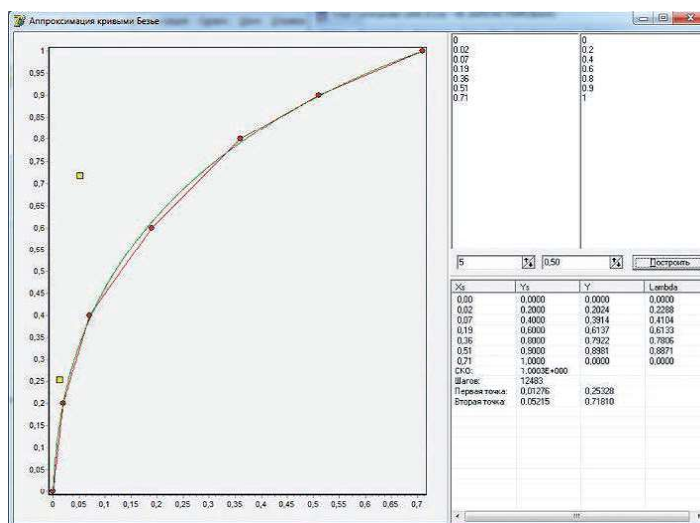


Рисунок 4. Результаты расчета  
 Fig. 4. Calculation results



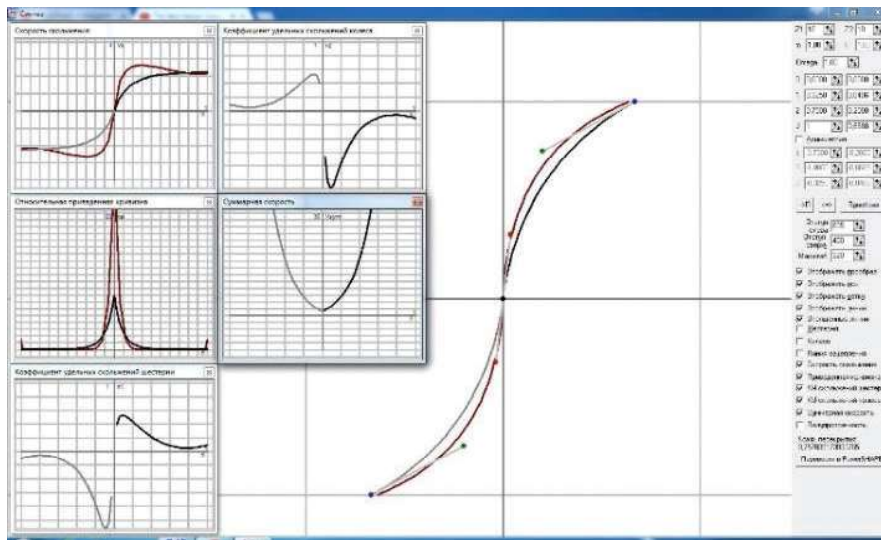


Рисунок 5. Сравнительный анализ исходных контуров  
 Fig. 5. Comparative analysis of source loops protocol

Синтез электронного эталона зубчатого зацепления. Синтез электронного эталона зубчатого зацепления выполнялся с помощью программного обеспечения «SAIAT» [4], предназначенного для многокритериального оптимизационного синтеза зубчатых зацеплений. Оно основана на унифицированном математическом описании профиля производящей поверхности для формообразования зубчатых колес. Это описание выполнено на основе теории сплайнов. В программе также используются математические зависимости для определения геометро-кинематических показателей синтезируемых зубчатых зацеплений. Сплайновая кривая Безье 3-го порядка позволяет интерактивно управлять

синтезом зацепления для получения требуемого результата.

Возможны два варианта управления формой кривой, описывающей производящую поверхность. Первый вариант, когда в качестве прообраза выбрана произвольная кривая для данных параметров зубчатых передач. Перемещая с помощью курсора управляющие точки, подбираются такие геометро-кинематические показатели, которые наиболее полно соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к передачам.

Второй вариант синтеза используется, когда необходимо улучшить показатели уже существующего профиля производящей поверхности. В этом случае

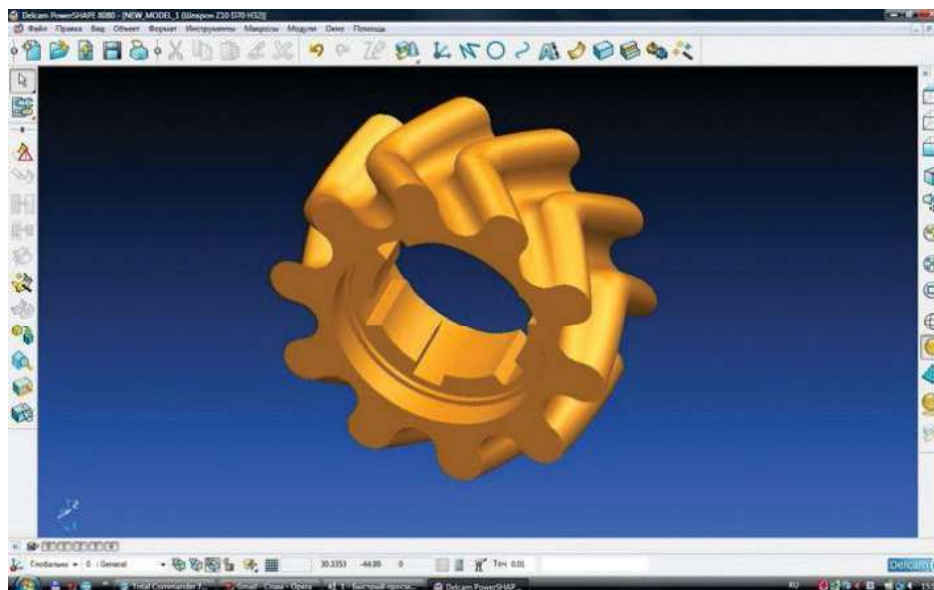


Рисунок 6. 3D-модель в PowerSHAPE  
 Fig. 6. 3D model in PowerSHAPE

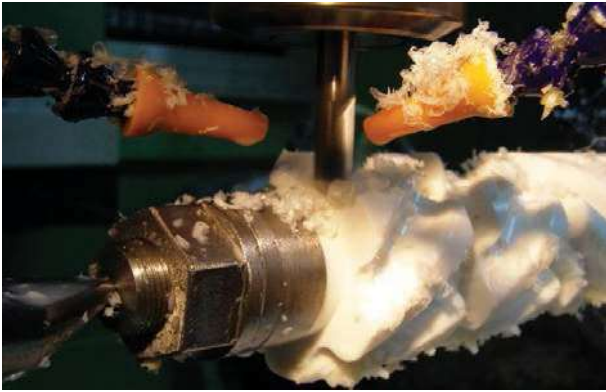


Рисунок 7. Обработка на станке с ЧПУ  
Fig. 7. Machining on the CNC machine

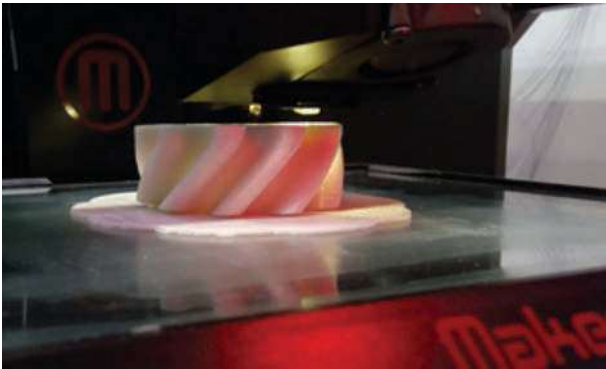


Рисунок 8. Изготовление колеса на 3D-принтере  
Fig. 8. Making a wheel on a 3D printer



Рисунок 9. Изношенное и изготовленное зубчатые колеса  
Fig. 9. Worn and manufactured gears

в качестве прообраза выбирается кривая, аппроксимирующая известный профиль производящей поверхности. Далее, с помощью управляющих точек, осуществляется сравнительный анализ геометро-кинематических показателей синтезируемой и известной передач.

С помощью этого программного обеспечения были проанализированы полученные результаты и внесены коррективы в геометрию компьютерных моделей зубчатых колес [5].

На рис. 5 приведены результаты сравнительного анализа граничных симметричных профилей зубьев производящей поверхности, полученных выше.

В результате интерактивного управления профилем, с помощью управляющих точек кривой Безье, удалось значительно улучшить геометро-кинематические показатели синтезируемого зацепления.

Как видно из рисунков, в результате синтеза удалось снизить относительную скорость скольжения зубьев в 1,5–2 раза, что благоприятно повлияет на износостойкость зацепления и более чем в 2 раза снизить приведенную кривизну зубьев в околополюсной зоне, что повысит контактную прочность зубьев в точках контакта.

Далее, для создания эталонной модели зубчатого колеса, кривые автоматически переносятся в систему твердотельного моделирования.

На основе синтезированного контура зубьев в системе PowerSHAPE [6] создана твердотельная компьютерная модель (рис. 6). По модели на станке с ЧПУ (рис. 7) и на 3D-принтере (рис. 8) были изготовлены зубчатые колеса (рис. 9).

Далее на рис. 10 показан процесс проведения окончательного контроля геометрии полученного шевронного колеса.



Рисунок 10. Контроль геометрии зубчатого колеса  
Fig. 10. Checking the geometry of the gear

Отсканированное облако точек поверхностей зубьев автоматически накладывается на поверхность эталонной модели зубчатого колеса. Причем базирование осуществляется по облаку точек в компьютерной программе PowerINSPECT. Результаты контрольной операции оформляются в виде протокола, в котором отражаются координаты точек и величины отклонений от номинального размера с указанием точек на поверхности колеса в графическом отчете (рис. 11).

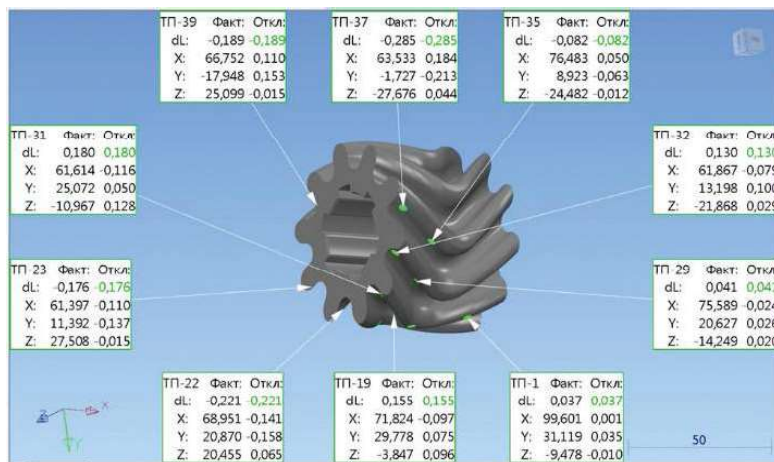


Рисунок 11. Пример протокола измерений  
Fig. 11. Example of a measurement protocol

## Выводы

Показана возможность реализации оригинального подхода к технологии реинжиниринга зубчатых зацеплений для условиях изношенных зубчатых колес с использованием современных аппаратно-программных комплексов создания электронного эталона зубчатого зацепления и оригинального программного обеспечения в основе которого лежит модель унифицированного описания зубчатых зацеплений инвариантные к исходному профилю зубчатого зацепления.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Доброскок В.Л. Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric Iscan / В.Л. Доброскок, С.И. Чернышов, Я.Н. Гаращенко, Д.П. Сидорчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010 – Вип. 4. – С. 123–135.
- [2] Обзор продуктов FARO. – Режим доступа <http://www.faro.com/products>
- [3] Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел: монография / Г.И. Шевелева. – М.: МГТУ, 1999. – 494 с.

- [4] Свідчення про реєстрацію авторського права на твір №70765. Комп'ютерна програма «SAIAT»/ Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова, Д.О. Чаплинський. – №71355; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.
- [5] Воронцов Б.С. Использование унифицированных параметров при автоматизации проектирования зубчатых передач // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: вид-во Львівська політехніка, 2012. – вип. №746. – С.180–185.
- [6] Белькович А. PowerSHAPE Pro: новые возможности реверсивного инжиниринга / А. Белькович, В. Власов, К. Евченко // САПР и графика. – 2009. – №1 – С. 16–22.

Д.т.н., профессор Виталий Анатольевич Пасечник – заведующий кафедрой интегрированных технологий машиностроения НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», e-mail: [vitaliy.pasichnyk@gmail.com](mailto:vitaliy.pasichnyk@gmail.com).

К.т.н., доцент Борис Сергеевич Воронцов – старший научный сотрудник кафедры интегрированных технологий машиностроения НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», e-mail: [voronts@gmail.com](mailto:voronts@gmail.com)

Украина, 03056, Киев-56, пр-т Победы, 37. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»