

УДК 621.7

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, В.А. Фадеев, д-р техн. наук,  
Я.Н. Гаращенко, канд. техн. наук,  
С.И. Чернышов, канд. техн. наук, Харьков, Украина

### **МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*У статті запропоновано на базі морфологічного аналізу моделей промислових виробів, що містить топологічний і морфометричний аналізи, розробити методологію автоматизованого вибору стратегії матеріалізації виробів по їх 3D моделі. Представлено структуру й можливості розроблюваної системи морфологічного аналізу триангуляційних 3D моделей.*

*В статье предложено на базе морфологического анализа моделей промышленных изделий включающего топологический и морфометрический анализы разработать методологию автоматизированного выбора стратегии материализации изделий по их 3D модели. Представлена структура и основные возможности разрабатываемой системы морфологического анализа триангуляционных 3D моделей.*

*V.L. DOBROSKOK, V.A. FADEEV, YA.N. GARAWENKO, S.I. CHERNYSHOV  
THE MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF TRIANGULATED MODELS OF INDUSTRIAL PRODUCTS*

*In article it is offered on the basis of a morphological analysis of models of industrial products including a topological and a morphometrical analyses to develop methodology of a automated choice of strategy a materialization of 3D models. The structure and possibilities of developing system of the morphological analysis triangulated 3D models is presented.*

#### *Введение*

Современное машиностроение характеризуется высокими требованиями к гибкости ресурсосберегающего производства [1]. Однако до настоящего времени отсутствует научно обоснованная методология выбора стратегии материализации изделий на базе анализа их 3D моделей.

Выбор стратегии материализации 3D модели промышленного изделия существенно определяет трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость и себестоимость изготовления с использованием как традиционных, так и генеративных технологий послойного выращивания (Rapid Prototyping) [2, 3]. Такой выбор в основном предопределяется конструкционными особенностями изделия [2, 4].

Для автоматизации выбора стратегии материализации по компьютерной триангуляционной 3D модели промышленного изделия предложено использовать топологический и морфометрический анализ на базе системы безразмерных критериев. Применительно к предметной области машиностроения морфологический анализ можно определить как структурно-количественный анализ строения твердотельного изделия представленного в виде системы элементарных поверхностных объектов, которые ограничивают пространство тела. Морфологический анализ базируется на предыдущей триангуляции, которая унифицирует поверхности изделия и последующем комплексном

анализе полученной системы составляющих треугольников. Анализ 3D модели изделия должен представлять собой определение комплекса статистических показателей позволяющих оценивать ее топологию и прогнозировать технологичность создания интегрированными ресурсосберегающими технологиями.

Для реализации этих подходов на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко НТУ "Харьковский политехнический институт" разрабатывается система морфологического анализа триангуляционных 3D моделей. Система включает следующие основные подсистемы: топологического и морфометрического анализов, корреляционного и функционально-регрессионного анализа взаимосвязи характеристик, анализа разнообразия элементов триангуляционных моделей.

*Система морфологического анализа триангуляционных 3D моделей промышленных изделий*

Система разработана в среде управления базами данных Visual FoxPro.

При разработке системы морфологического анализа решались следующие основные задачи:

- создание базовых элементов поверхностей (плоских и объемных геометрических фигур) для отработки методологических подходов по формированию триангуляционных элементов и созданию сложных математически заданных поверхностей;
- преобразование STL-файлов моделей промышленных изделий в DBF-образы;
- топологический анализ моделей;
- морфометрический анализ моделей;
- регрессионный и корреляционный анализ взаимосвязи исследуемых признаков;
- анализ разнообразия элементов триангуляционных моделей;
- экспорт данных (DBF-образов моделей) в форматы: STL [5, 6] (для материализации с использованием традиционных технологий или Rapid Prototyping) и PLY/OBJ [7] (для визуализации многоцветной модели).

Главная форма системы морфологического анализа представлена на рис. 1. На экранной форме представляется список моделей (расчетов) с возможностью перехода к работе со следующими подсистемами:

- преобразование STL-файла в DBF-образ с заданной точностью округления координат вершин;
- топологический анализ (определение характеристики Эйлера, рода поверхности и анализ смежности граней и ребер), экранная форма представлена на рис. 2;
- интегральные характеристики (определение координатных характеристик, направляющих косинусов нормалей, площадей проекций

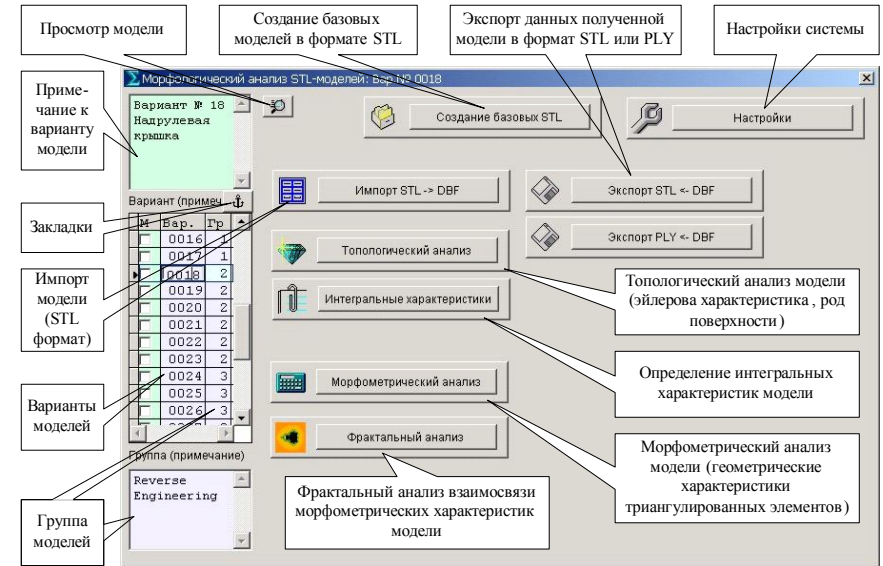


Рисунок 1 - Главная экранная форма системы морфологического анализа триангуляционных моделей

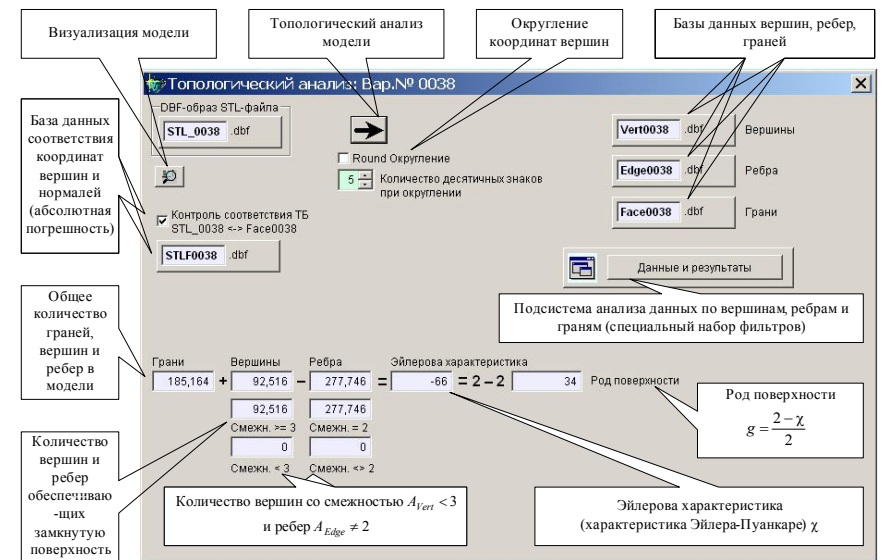


Рисунок 2 – Подсистема топологического анализа триангуляционных моделей

модели и описывающего параллелепипеда, объемов модели и описывающего параллелепипеда);

- морфометрический анализ модели (определение характеристик для вершин, ребер, граней составляющих треугольников и их статистический анализ), экранная форма представлена на рис. 3;

- корреляционный и функционально-регрессионный анализ взаимосвязи исследуемых признаков с использованием заданного набора уравнений регрессии (рис. 4);

- анализ разнообразия составляющих элементов модели;
- экспорт данных (DBF образа) модели в формат STL или PLY/OBJ;
- создание базовых элементов в формате STL для наиболее распространенных модельных поверхностей (рис. 5);
- настройки системы.

Система морфологического анализа предоставляет пользователю следующие основные возможности для работы:

- создавать модели промышленных изделий (до 9999);
- редактировать описания моделей;
- просматривать модели с использованием внешних программ (NotePad, Alteros 3D, MeshLab, Capvidia 3D, STL Viewer, Geomagic Studio, GLC Player, Deep Exploration CAD, TurboCAD Pro, Magics RP, SolidWorks и др.) и встроенного специального редактора;
- использовать примечания и закладки к моделям и вариантам расчетов;
- редактировать программный код процедуры описания триангуляционной модели;
- автоматически выполнять корреляционный и регрессионный анализ для заданных исследуемых признаков;
- задавать количество интервалов гистограмм исследуемых признаков (с возможностью использования рекомендаций по его выбору);
- выполнять просмотр результатов статистического анализа с визуализацией гистограмм относительных частот исследуемых признаков;
- выводить комплекс статистических характеристик (используемых в прикладной статистике) для заданного исследуемого признака с возможностью получения справочной информации по определению каждой из них;
- одновременно представлять гистограммы набора выбранных исследуемых признаков;
- получать интерактивную справку по каждому элементу экранных форм.

Подсистема топологического анализа ориентирована на задачи подготовки модели к материализации (обнаружение и устранение дефектов триангуляционной модели). Система морфометрического анализа - на предварительную оценку конструктивных особенностей изделия на основе

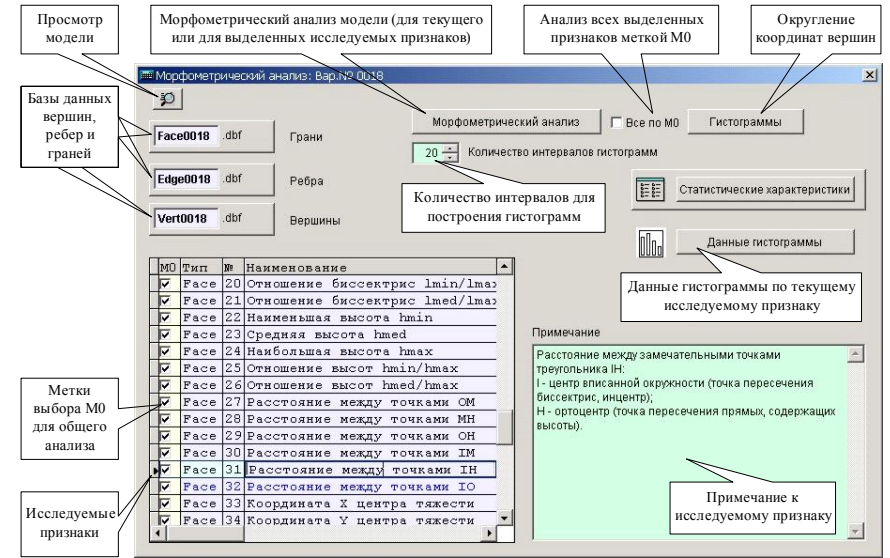


Рисунок 3 - Подсистема морфометрического анализа триангуляционных моделей

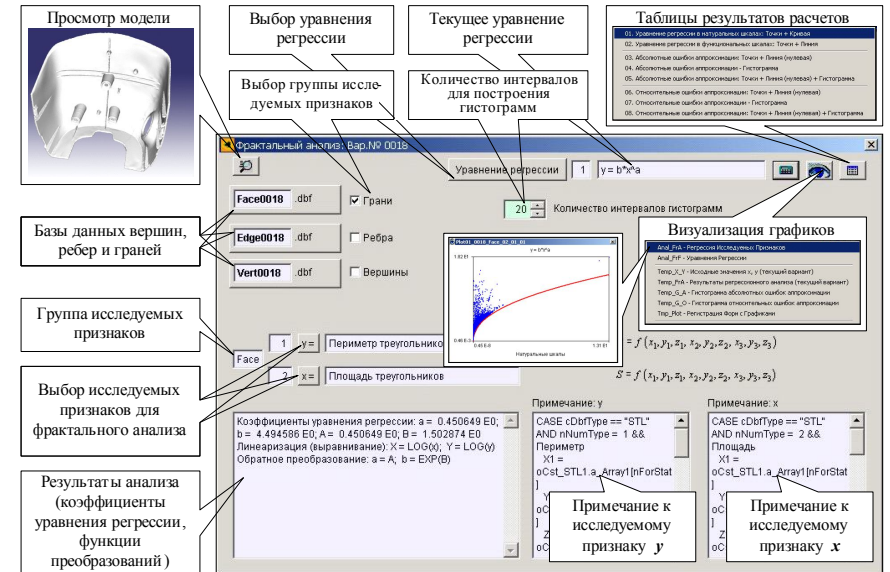


Рисунок 4 – Подсистема корреляционного и функционально-регрессионного анализа взаимосвязи исследуемых признаков

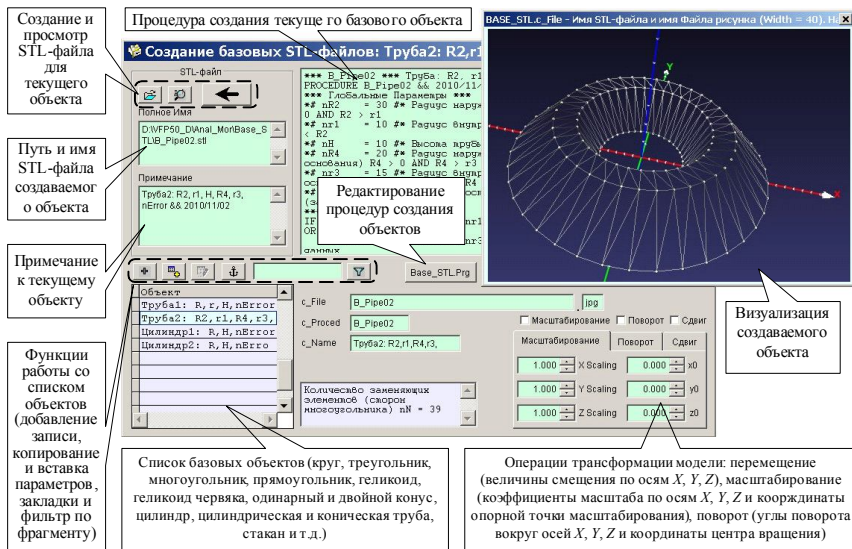


Рисунок 5 – Подсистема создания базовых элементов в формате STL

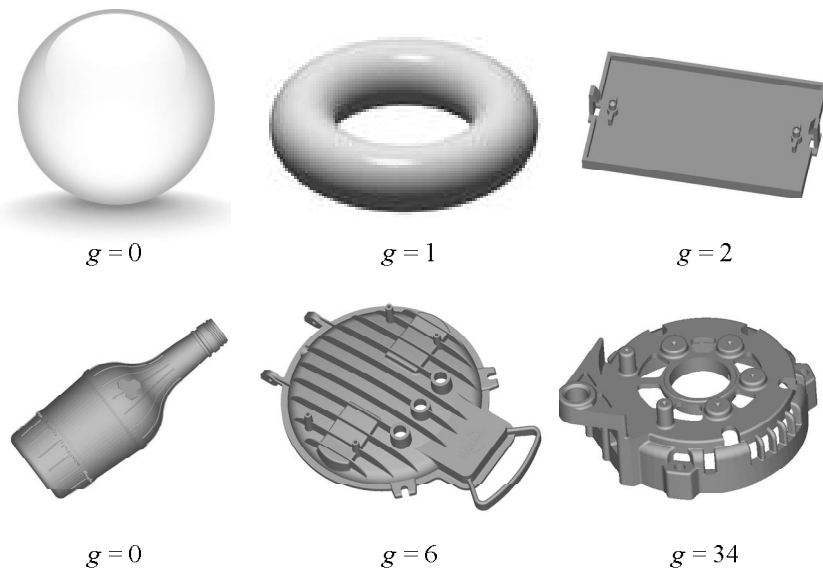


Рисунок 6 – Род поверхности модели

статистических характеристик геометрических свойств составляющих элементов модели.

*Подсистема топологического анализа триангуляционных моделей*

Экранная форма подсистемы представлена на рис. 2. При топологическом анализе выполняются:

- оценка триангуляционной модели на отсутствие дефектов (необходимым условием является смежность ребер  $A_{Edge} = 2$  и смежность вершин  $A_{Vert} \geq 3$ );

- предварительная оценка сложности модели по характеристике Эйлера и роду поверхности (определение топологического типа оболочки).

Топологический анализ триангуляционных моделей позволяет определять дифференциальные и интегральные характеристики [8, 9]: смежность ребер  $A_{Edge}$  и вершин  $A_{Vert}$ ; количество вершин со смежностью  $A_{Vert} \geq 3$  и ребер  $A_{Edge} = 2$ ; количество вершин со смежностью  $A_{Vert} < 3$ ; количество ребер со смежностью  $A_{Edge} \neq 2$ ; общее количество вершин  $N_{Vert}$ , ребер  $N_{Edge}$  и граней  $N_{Face}$ ; эйлерову характеристику  $\chi$ ; род поверхности  $g$ .

Рассмотрим основные топологические характеристики. Топологические свойства поверхности триангуляционной 3D модели выражаются с помощью ее эйлеровой характеристики  $\chi$ :

$$\chi = N_{Face} - N_{Edge} + N_{Vert}, \tag{1}$$

где  $N_{Face}$ ,  $N_{Edge}$  и  $N_{Vert}$  – соответственно количество граней, ребер и вершин.

Формула Эйлера для моделей изделий, не имеющих сквозных отверстий, определяется равенством:

$$N_{Face} - N_{Edge} + N_{Vert} = 2. \tag{2}$$

Для моделей изделий, содержащие сквозные отверстия, эйлерова характеристика определяется зависимостью:

$$\chi = N_{Face} - N_{Edge} + N_{Vert} = 2 - 2g, \tag{3}$$

где  $g$  – число, называемое родом поверхности.

Проверка в системе морфологического анализа на ряде моделей подтвердила применимость формул (1) - (3).

В топологии родом замкнутой и связной поверхности называется число равное количеству сквозных отверстий в теле. Для замкнутых полигональных поверхностей значения рода поверхности  $g$  лежат в интервале  $[0, N]$ , где  $N$  – количество всех натуральных чисел.

Род поверхности  $g$  триангуляционной модели может быть вычислен на основании эйлеровой характеристики  $\chi$  [9]:

$$g = \frac{2 - (N_{Face} - N_{Edge} + N_{Vert})}{2} = 1 - \frac{\chi}{2}. \tag{4}$$

На основании зависимости (4) можно сделать вывод о том, что эйлерова характеристика поверхности должна быть целым числом  $\chi \leq 2$  и кратным двум. Иначе род поверхности будет дробным, т. е. модель незамкнутая.

Как видно из рис. 6 и зависимостей (1) - (4) эйлерова характеристика и род поверхности представляют интерес для использования при оценке сложности модели.

В триангуляционных моделях промышленных изделий (STL-файлах) возможны дефекты, даже при условии корректной исходной трехмерной модели, созданной в CAD системе [10]. Такие характеристики как смежность ребер и смежность вершин позволяют обнаруживать и количественно оценивать дефекты поверхности по количеству составляющих треугольников у которых не обеспечиваются условия смежности ребер  $A_{Edge} = 2$  и смежности вершин  $A_{Vert} \geq 3$ . Поэтому данные характеристики следует также рассматривать при подготовке моделей к их материализации.

*Подсистема морфометрического анализа триангуляционных моделей*

Выполнение морфометрического анализа триангуляционной модели выполняется в соответствующей подсистеме (экранная форма представлена на рис. 3) по трем комплексам характеристик для вершин, ребер и граней.

Предусмотрен анализ по следующим комплексам характеристик:

- вершин (координаты по осям  $X, Y, Z$ ; расстояние от начала координат; смежность вершин);
- ребер (длина ребер; смежность ребер);
- граней (периметр; площадь; радиусы описанной, вписанной окружностей и их отношения; направляющие косинусы нормали по осям  $X, Y, Z$ ; площади ортогональных проекций на плоскости  $XY, XZ, YZ$ ; наименьшие, средние и наибольшие значения длин ребер, медиан, биссектрис и высот и их отношения; координаты замечательных точек - центров вписанной и описанной окружностей, центроида, ортоцентра и расстояния между ними).

В подсистеме предусмотрено построение гистограмм и определение статистических характеристик распределения выбранного исследуемого признака (рис. 7). На рис. 8 приведен пример вывода набора гистограмм для выбранных исследуемых признаков, полученный при анализе модели цилиндра (точность триангуляции 0,001 мм, количество составляющих треугольников 10 480 шт.) повернутого на 30 град. вокруг оси  $Y$ .

Проведенный анализ для набора базовых поверхностей позволил выявить некоторые особенности распределения исследуемых признаков для площади ортогональных проекций треугольников и направляющих косинусов нормалей базовых поверхностей: координаты вершин и центры тяжести треугольников,

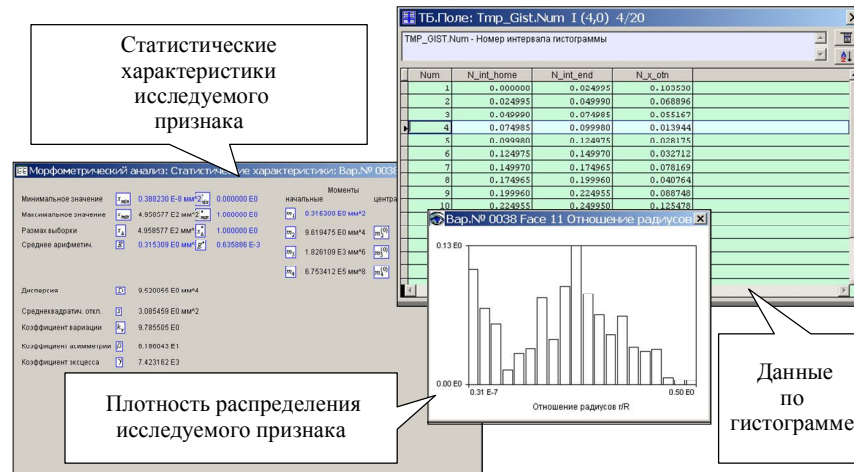


Рисунок 7 – Результаты статистического анализа для выбранного исследуемого признака

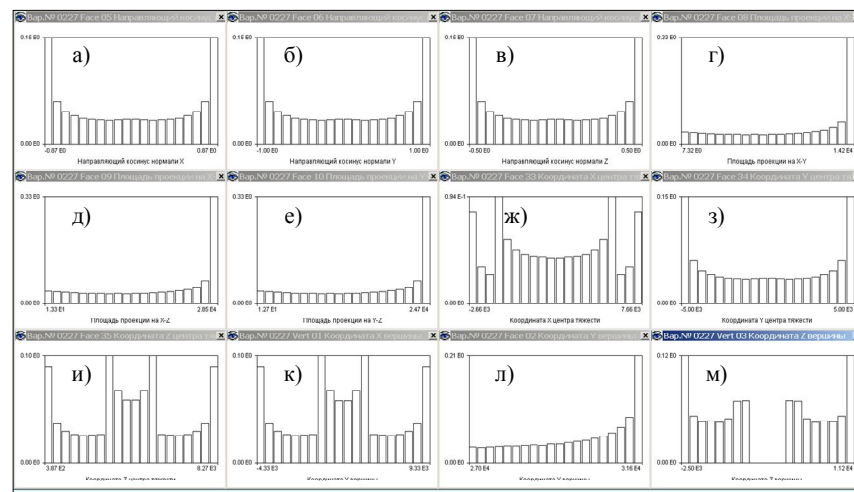


Рисунок 8 – Гистограммы распределения выбранных исследуемых признаков для модели цилиндра повернутого на 30 град. вокруг оси  $Y$ :  
а, б, в - направляющие косинусы нормали по осям  $X, Y, Z$  соответственно;  
г, д, е - площади ортогональных проекций на плоскости  $XY, XZ, YZ$  соответственно;  
ж, з, и - координат центров тяжести треугольников по осям  $X, Y, Z$  соответственно;  
к, л, м - координат вершин треугольников по осям  $X, Y, Z$  соответственно.

Возможности морфометрического анализа 3D моделей:

- предварительная оценка сложности модели для решения задач выбора базовых поверхностей и рациональной ориентации на основе характеристик распределения координат вершин составляющих треугольников по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ; координат центров тяжести треугольников по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , площадей ортогональных проекций треугольников на координатные плоскости  $XY$ ,  $XZ$ ,  $YZ$  и направляющих косинусов нормалей по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ;

- обнаружение вырожденных треугольников, которые не имеют площади и соответственно, не имеют нормали на основе условий их длины одной из ребер  $L = 0$  или площади  $S = 0$  или радиуса вписанной окружности  $r = 0$ );

- оценка особенностей триангуляции по абсолютным и относительным геометрическим характеристикам составляющих треугольников.

Для полной реализации возможностей морфометрического анализа необходима разработка методик выделения поверхностей и определения формы поверхности с учетом известных классификаций применяемых в машиностроении [11, 12, 13].

Для оценки технологичности изготовления с использованием генеративных технологий послойного выращивания Rapid Prototyping необходимо добавление комплекса исследуемых признаков "характеристики слоев". В эту группу необходимо включить характеристики позволяющие выполнять оценку рациональной ориентации модели и возможности использования принципа обратимой декомпозиции [1, 4] при послойном выращивании на основе количества наращиваемых слоев, плотности распределения их площадей и габаритных размеров; определение рациональной толщины наращиваемых слоев по высоте модели на основе плотности распределения наименьшего, среднего и наибольшего значения углов между векторами построения и нормалей к поверхности модели.

#### *Подсистема создания базовых объектов в формате STL*

Экранная форма подсистемы создания базовых объектов представлена на рис. 5. Данная подсистема разработана для формирования триангуляционных моделей состоящих из сложных математически заданных поверхностей.

Данная подсистема обеспечивает создание триангуляционных моделей базовых геометрических поверхностей и 3D объектов: треугольник, прямоугольник, многоугольник, круг, конус, цилиндр, труба, стакан, геликоид и т. д. (рис. 9). Модели генерируются по заданным геометрическим параметрам с учетом допустимой погрешности триангуляции. Предусмотрена возможность применения операций трансформации модели: перемещение (величины смещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), масштабирование (коэффициенты масштаба по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и опорная точка масштабирования), поворот (углы поворота вокруг осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и координаты центра вращения).

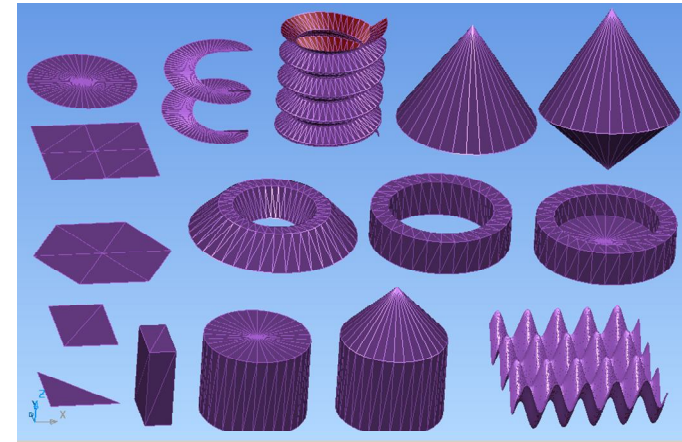


Рисунок 9 – Триангуляционные модели базовых геометрических поверхностей

Для создания триангуляционных криволинейных поверхностей (например, для цилиндрических и сферических) используется двухступенчатая процедура, по аналогии с выполняемой в известных CAD системах: на 1-м этапе – формирование четырехугольных полигонов, на 2-м этапе – триангуляция.

Разработанную подсистему планируется расширить на все основные виды поверхностей используемых в промышленных изделиях.

#### *Заключение*

Разработанная система морфологического анализа триангуляционных 3D моделей позволяет оценивать геометрические особенности моделей промышленных изделий на основе топологического и морфометрического анализа составляющих элементов. Такие возможности позволят разработать методологию оценки технологичности моделей для обеспечения автоматизации выбора стратегии их материализации.

В перспективе планируется расширить возможности системы для решения задач подготовки моделей к материализации с использованием технологий Rapid Prototyping. При подготовке моделей необходимо решение следующих задач: оценка рациональной их ориентации и возможности использования обратимой декомпозиции при их послойном выращивании, определение рациональной толщины наращиваемых слоев по высоте модели.

Необходима разработка системы относительных показателей технологичности триангуляционных моделей промышленных изделий учитывающих особенности интегрированных технологий для определения комплексного показателя, который позволит выполнять сравнительный анализ эффективности реализации различных проектов материализации.

**Список литературы:** 1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Л.Л. Товажнянский, А.И. Грабченко, С.И. Чернышов и др. Под ред. Л.Л. Товажнянского и А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с. 2. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. - М.: Машиностроение, 1990. - 768 с. 3. Технологичность конструкций изделий: Справочник / Т.К. Алферова, Ю.Д. Амиров, П.Н. Волков и др.; Под ред. Ю.Д. Амирова. - М.: Машиностроение, 1985. - 368 с. 4. Вітязев Ю.Б. Розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / Ю.Б. Вітязев. - Харків, 2004. - 20 с. 5. Bohn H. File Format Requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow // International Conference on Manufacturing Automation Proceedings. - Hong Kong. – 1997. 6. STL - формат для быстрого прототипирования // Информационно-аналитический PLM-журнал: CAD/CAM/CAE Observer. - №5 (23) / 2005. - WEB: <http://www.cadcamcae.lv>. 7. PLY (file format) [Электронный ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia. - 2011. 8. Энциклопедия элементарной математики. В 5 т. / АПН РСФСР. - Т.4: Геометрия / Под ред. В.Г. Болтянского, И.М. Яглома. - М.: Физматлит, 1963. - 567 с. 9. Энциклопедия элементарной математики. В 5 т. / АПН РСФСР. - Т.5: Геометрия / Под ред. В.Г. Болтянского, И.М. Яглома. - М.: Физматлит, 1966. - 624 с. 10. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). - СПб.: Питер, 2004. - 560 с. 11. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1985. - 263 с. 12. Махаринский Е.И., Горохов В.А. Основы технологии машиностроения: Учебник. - Мн.: Выш. шк., 1997. - 424 с. 13. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н., Халаби С.М. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек. - М.: Наука, 2006. - 544 с.

*Поступила в редколлегию 30.06.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. Integrirovannye tehnologii uskorennoogo prototipirovanija i izgotovlenija / L.L. Tovazhnjanskij, A.I. Grabchenko, S.I. Chernyshov i dr. Pod red. L.L. Tovazhnjanskogo i A.I. Grabchenko. – Har'kov: OAO «Model' Vselennoj», 2005. – 224 s. 2. Tehnologichnost' konstrukcii izdelija: Spravochnik / Ju.D. Amirov, T.K. Alferova, P.N. Volkov i dr.; Pod obw. red. Ju.D. Amirova. - M.: Mashinostroenie, 1990. - 768 s. 3. Tehnologichnost' konstrukcij izdelij: Spravochnik / T.K. Alferova, Ju.D. Amirov, P.N. Volkov i dr.; Pod red. Ju.D. Amirova. - M.: Mashinostroenie, 1985. - 368 s. 4. Vitjazev Ju.B. Rozshirennja tehnologichnih mozhливостей priskorenogo formoutvorenija sposobom stereolitografii: avtoref. dis. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk: spec. 05.02.08 «Tehnologija mashinobuduvannja» / Ju.B. Vitjazev. - Harkiv, 2004. - 20 s. 5. Bohn H. File Format Requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow // International Conference on Manufacturing Automation Proceedings. - Hong Kong. – 1997. 6. STL - format dlja bystrogo prototipirovanija // Informacionno-analiticheskij PLM-zhurnal: CAD/CAM/CAE Observer. - №5 (23) / 2005. - WEB: <http://www.cadcamcae.lv>. 7. PLY (file format) [Jelektronnyj resurs] // Wikipedia, the free encyclopedia. - 2011. 8. Jenciklopedija jelementarnoj matematiki. V 5 t. / APN RSFSR. - T.4: Geometrija / Pod red. V.G. Boltjanskogo, I.M. Jagloma. - M.: Fizmatlit, 1963. - 567 s. 9. Jenciklopedija jelementarnoj matematiki. V 5 t. / APN RSFSR. - T.5: Geometrija / Pod red. V.G. Boltjanskogo, I.M. Jagloma. - M.: Fizmatlit, 1966. - 624 s. 10. Li K. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE). - SPb.: Piter, 2004. - 560 s. 11. Druzinskij I.A. Slozhnye poverhnosti: Matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obespechenie: Spravochnik. - L.: Mashinostroenie, 1985. - 263 s. 12. Maharinskij E.I., Gorohov V.A. Osnovy tehnologii mashinostroenija: Uchebnik. - Mn.: Vysh. shk., 1997. - 424 s. 13. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N., Halabi S.M. Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informacija k raschetu na prochnost' tonkih obolochek. - M.: Nauka, 2006. - 544 s.