

В. Л. ДОБРОСКОК, д-р техн. наук,
С. И. ЧЕРНЫШОВ, канд. техн. наук,
Я. Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук,
Д. П. СИДОРЧУК, Харьков, Украина

ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ УСТАНОВКИ ОБЪЕМНОГО СКАНИРОВАНИЯ IMETRIC ISCAN

Розглянуто особливості технології зворотного інжинірингу деталей з використанням оптико-цифрової установки Imetric IScan II. Описано технологічні можливості оптико-цифрової установки. Представлено результати роботи зі створення триангуляційних моделей промислових виробів й їхньої верифікації.

Рассмотрены особенности технологии обратного инжиниринга деталей с использованием оптико-цифровой установки Imetric IScan II. Описаны технологические возможности оптико-цифровой установки. Представлены результаты работы по созданию триангуляционных моделей промышленных изделий и их верификации.

Features of reverse engineering of products using an optical-digital machine Imetric IScan II are considered. Technological opportunities of the optical-digital machine are described. Work results on creation of triangulation models of the industrial products and their verification are presented.

Введение

Обратный инжиниринг – интенсивно развивающаяся технология, получившая широкое применение в индустриально развитых странах. Целью обратного инжиниринга является получение математической модели промышленного изделия на основе измерений реального объекта [1].

Одним из наиболее эффективных методов получения 3D моделей изделий является оптико-цифровое сканирование, которое имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами:

- отсутствие контакта с измеряемой поверхностью;
- высокая точность измерения криволинейных поверхностей;
- упрощение работы дизайнера, благодаря возможности создавать модели по объектам из пластичных материалов (глина, пластилин и др.).

Этот метод получил широкое применение. Но при этом отсутствуют научно-обоснованные данные по его технологическим возможностям создания 3D моделей промышленных изделий.

Данная статья посвящена рассмотрению технологических возможностей создания 3D моделей и точности их получения при использовании оптико-цифрового сканирования изделий.

Работа выполнялась в центре высоких технологий учебно-научно-производственного объединения при НТУ «ХПИ» (кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко) с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric IScan II. Общая схема обратного инжиниринга промышленных изделий представлена на рис. 1. Принципы построения схемы определяются стратегиями получения 3D моделей с помощью оптико-цифровой установки и их последующей материализации с использованием технологий Rapid Prototyping или обработкой резанием на станках с ЧПУ.

Установка объемного сканирования Imetric IScan II

Общий вид оптико-цифровой установки объемного сканирования IScan II (производитель Imetric, Швейцария) представлен на рис. 2.

Установка IScan II состоит из следующих элементов [2]:

- метрологической фотокамеры с традиционной оптикой (фокусное расстояние 24 мм), со встроенной фотовспышкой;
- фотограмметрического программного обеспечения, позволяющего выполнять следующие операции: распознавание образов с помощью фотокамеры, автоматическое измерение объекта с наклеенными светоконтрастными мишенями, идентификацию мишеней, создание систем измеренных точек и их автоматическую ориентацию, трансформация и редактирование координат систем измеренных точек, анализ геометрии, визуализация и передача (экспорт) данных в CAD-системы.

Вспомогательное оснащение системы IScan II включает комплект светоконтрастных мишеней различных диаметров, набор углеволоконных стандартных стержней с мишенями, покрытыми светоотражательным материалом и др.

Установка позволяет сканировать объекты с габаритными размерами не менее 100×100×100 мм. Перед сканированием выполняется специальная процедура настройки, а также при необходимости калибровка. Для объектов сравнительно небольших размеров (до 300 мм) сканирование может выполняться на калибровочной пластине или с использованием вспомогательного объекта с наклеенными мишенями, располагаемого вблизи детали. При сканировании крупногабаритных объектов светоконтрастные мишени наклеиваются непосредственно на их поверхности.

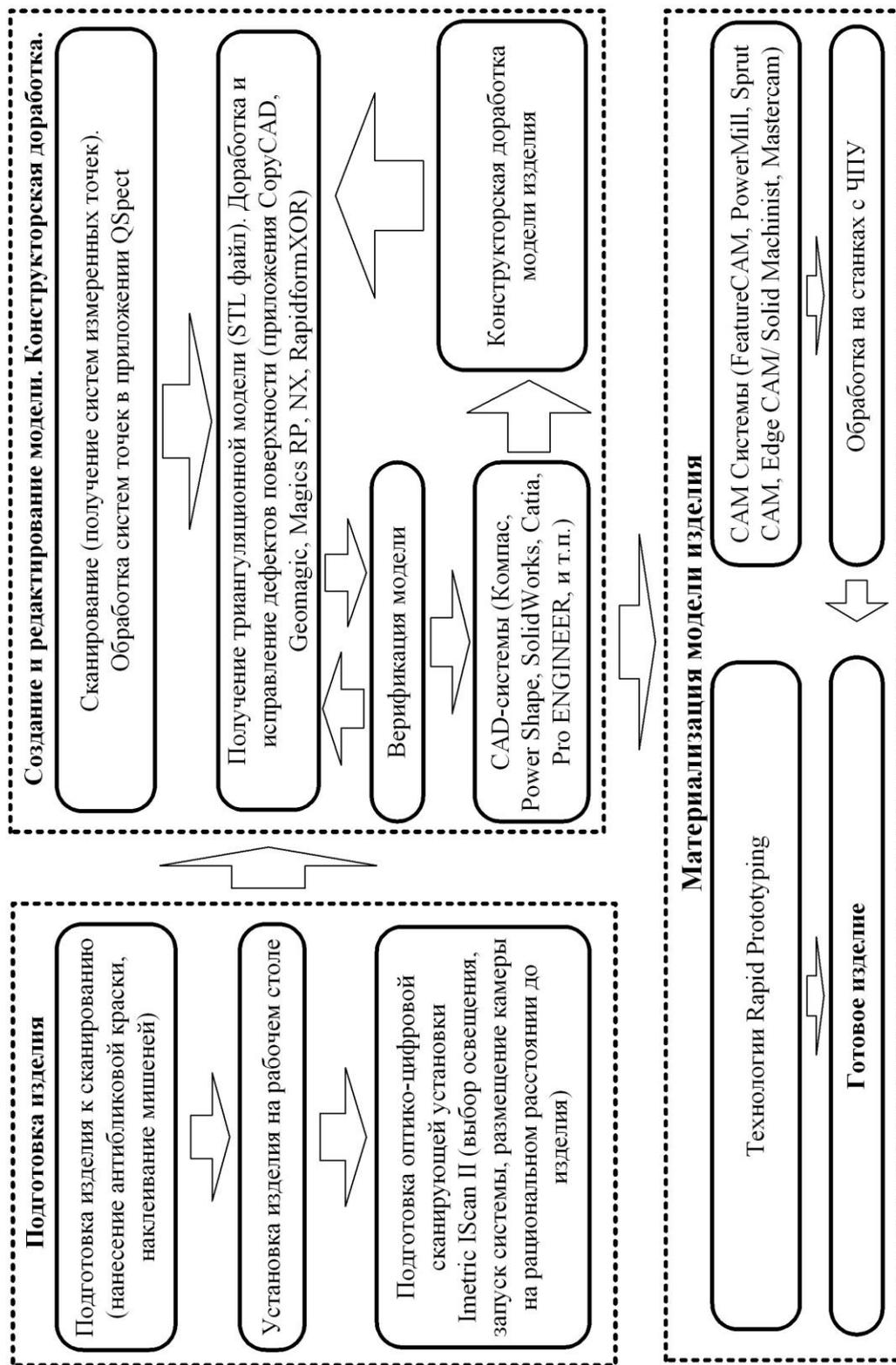


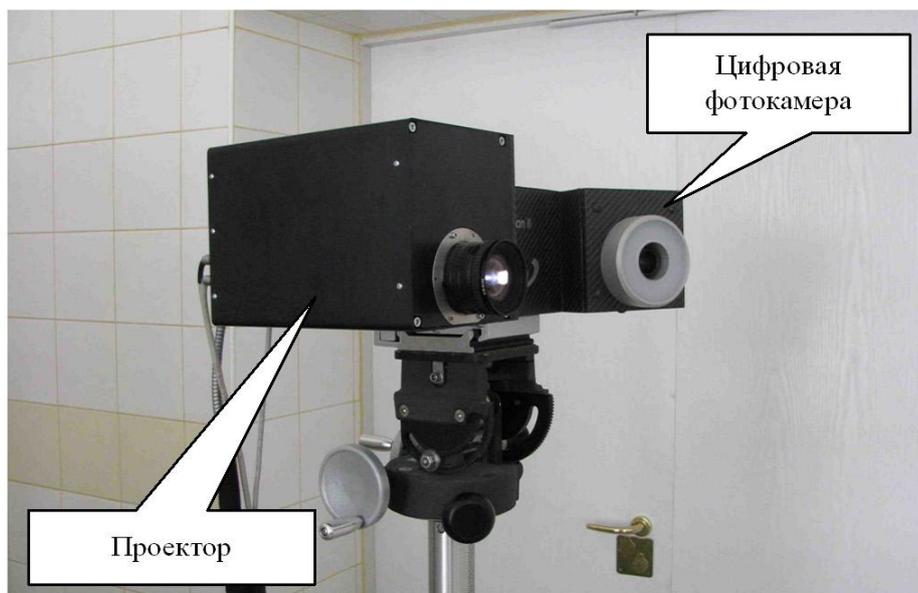
Рисунок 1 – Общая схема обратного инжиниринга промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки

На качество сканирования существенно влияют светоотражательные свойства поверхности объекта. Поэтому, как правило, на сканируемый объект наносят антибликовое покрытие. Соответственно необходимо уделять существенное внимание (при настройке фотокамеры) на интенсивность

окружающего освещения, т. к. возникновение бликов на поверхности объекта приводит к появлению в этих местах разрывов поверхности.

Система сканирования IScan II позволяет за приемлемое время (несколько минут или часов в зависимости от сложности изделия) выполнять сканирование объекта с получением системы точек поверхности и автоматической регистрацией их в единой системе координат.

Сканирующая головка



Система обработки результатов сканирования



Рисунок 2 – Оптико-цифровая установка объемного сканирования Imetric IScan II

Создание триангуляционных моделей промышленных изделий

Работа на установке Iscan II состоит из следующих этапов [3]:

- *предварительные этапы:*

- подготовка изделия к измерениям путем нанесения антибликового покрытия (лучшее качество сканирования обеспечивается при использовании краски серого цвета);

- наклеивание светоконтрастных мишеней;

- *этапы, выполняемые для каждого ракурса сканирования:*

- задание положения сканирующей головки;

- настройка процесса сканирования (задание порога чувствительности камеры для процессов сканирования и распознавания мишеней, автоматическое обнаружение и интерактивное задание имен мишеней);

- сканирование;

- получение набора систем точек;

- визуальный анализ текущей и/или общей системы измеренных точек;

- *заключительные этапы:*

- визуальный анализ общей системы измеренных точек;

- обрезка и/или удаление неподходящих систем или групп точек;

- сохранение данных в формате ASC.

Процесс сканирования эффективен при обеспечении равномерного распределения светоконтрастных мишеней на поверхности сканируемого объекта (из расчета попадания около 20-и мишеней в один ракурс) и корректного выбора экспозиции камеры.

Светоконтрастные мишени представляют собой распечатанные на принтере черные полосы бумаги с нанесенными на них белыми реперными метками ($\varnothing 2 \div 4$ мм). Реперные метки при проведении одного сканирования объекта должны иметь одинаковый размер. Необходимо, чтобы их размер на изображении сканируемого объекта был не менее $5 \div 6$ пикселей, также он зависит от масштабов объекта, разрешения и объектива камеры. В рассматриваемом случае их размер составлял 3 мм.

На рис. 3 представлены примеры подготовленных объектов к сканированию. При наклеивании мишеней придерживаются следующей стратегии. Мишени распределяются между отдельными группами: ориентации, масштабирования, мишеней для авто-обработки, и дополнительной сети мишеней. Мишень может принадлежать одной или нескольким группам. Группа ориентации включает пересекающиеся не менее 4-х мишеней и используется для определения начальной системы координат

и автоматического ориентирования группы изображений. Группу следует размещать в центре (или достаточно близко к нему) сканируемого объекта. Группа масштаба используется системой для определения масштаба представления объекта (проекта). Мишени этой группы должны распределяться в нескольких направлениях под взаимным углом 45° .



Рисунок 3 – Объекты (отопительная печь и обшивка передней двери автомобиля) подготовленные для сканирования на оптико-цифровой установке

Мишени автоматической обработки необходимы для автоматизации процесса измерений.

В процессе сканирования необходимо, чтобы в изображение камеры попадали минимум четыре распознанные мишени, поэтому следует заранее планировать расположение мишеней и концентрировать их рядом с пересечениями поверхностей. Но при этом необходимо выдерживать расстояние от мишеней до условных границ поверхностей не менее $2\div 4$ мм.

Выбор положения проектора, как и ориентация измеряемого объекта, имеют определяющее значение для эффективного процесса сканирования.

На основе опыта эксплуатации и [2, 3] можно сформулировать основные принципы рациональной стратегии сканирования:

- объект измеряется с различных ракурсов (до $20\div 30$ изображений для изделий с размерами до 400 мм);
- в каждом новом изображении должны фиксироваться как минимум четыре мишени из предыдущих видов и четыре новых мишени (лучшие результаты были получены при их общем количестве $16\div 20$);
- сканируемые мишени должны одновременно попадать в рабочие зоны камеры и проектора;
- полученные системы измеренных точек должны охватывать всю поверхность объекта, обеспечивая наличие общих участков поверхности для различных ракурсов измерения (желательно до 5-и, но для участков, где выявляется высокая погрешность измерения, следует удалять неподходящие системы точек);
- сканирование при различных ракурсах выполняется при одном расстоянии до объекта. При этом каждое измерение должно охватить как

можно большую область поверхности сканируемого объекта, обеспечивая наибольшее количество задействованных мишеней.

Сканирование объекта выполняется с запланированных ракурсов. Затем изображения поверхности обрабатываются в сканирующей головке, и полученная система точек каждого измерения передается на компьютер для предварительной обработки.

Обработка полученных данных. Для обработки данных сканирования в установке IScan II используется специализированная система QSpec [2]. Для каждого изделия в системе создается новый проект и выполняется сканирование объекта с помощью мастера работы со сканером или в него импортируются ранее полученные системы измеренных точек (файлы *.asc). На рис. 4 представлена схема последовательности обработки данных сканирования и экранные формы пакета QSpec на этапах визуализации и редактирования систем измеренных точек для передней фары автомобиля.

В режиме съемки с нескольких ракурсов используется автоматическая обработка полученных результатов с определением положения всех систем точек. В зависимости от сложности измеряемого изделия некоторые системы точек могут получить неточную или неправильную ориентацию. Эти непредставительные системы точек удаляются или сохраняются в отдельные файлы для задания правильного их положения в специализированных CAD-системах (Geomagic Studio, CopyCAD или Magics RP).

При необходимости используются инструменты редактирования систем точек, анализа и преобразования системы координат для достижения на следующем этапе триангуляции требуемого качества поверхностей модели. Затем создается отчет о проведенных измерениях, сохраняется проект и сохраняется итоговый набор измеренных точек.

Создание триангуляционной модели промышленных изделий на основе систем измеренных точек.

Рассмотрим возможности по созданию триангуляционных моделей, на примере конкретных промышленных изделий, в системе Geomagic Studio (для систем CopyCAD [4, 5, 6] и Magics RP [7] стратегии работ аналогичны).

Geomagic Studio позволяет создавать трехмерные модели изделий по отсканированным данным (системам измеренных точек) и редактировать их [8].

Импорт данных сканирования производился с использованием формата ASC. Для уменьшения размера файлов и соответственно времени обработки моделей, системы измеренных точек загружались не полностью, а в объеме 25÷50 % от их общего количества.

Непредставительные точки, которые могут повлиять на точность триангуляционной модели (выбросы, шумы и пр.) удалялись. Данная операция выполняется в ручном режиме, с помощью инструментов выделения или автоматически с помощью команд "Select Outliers" и "Select Disconnected".

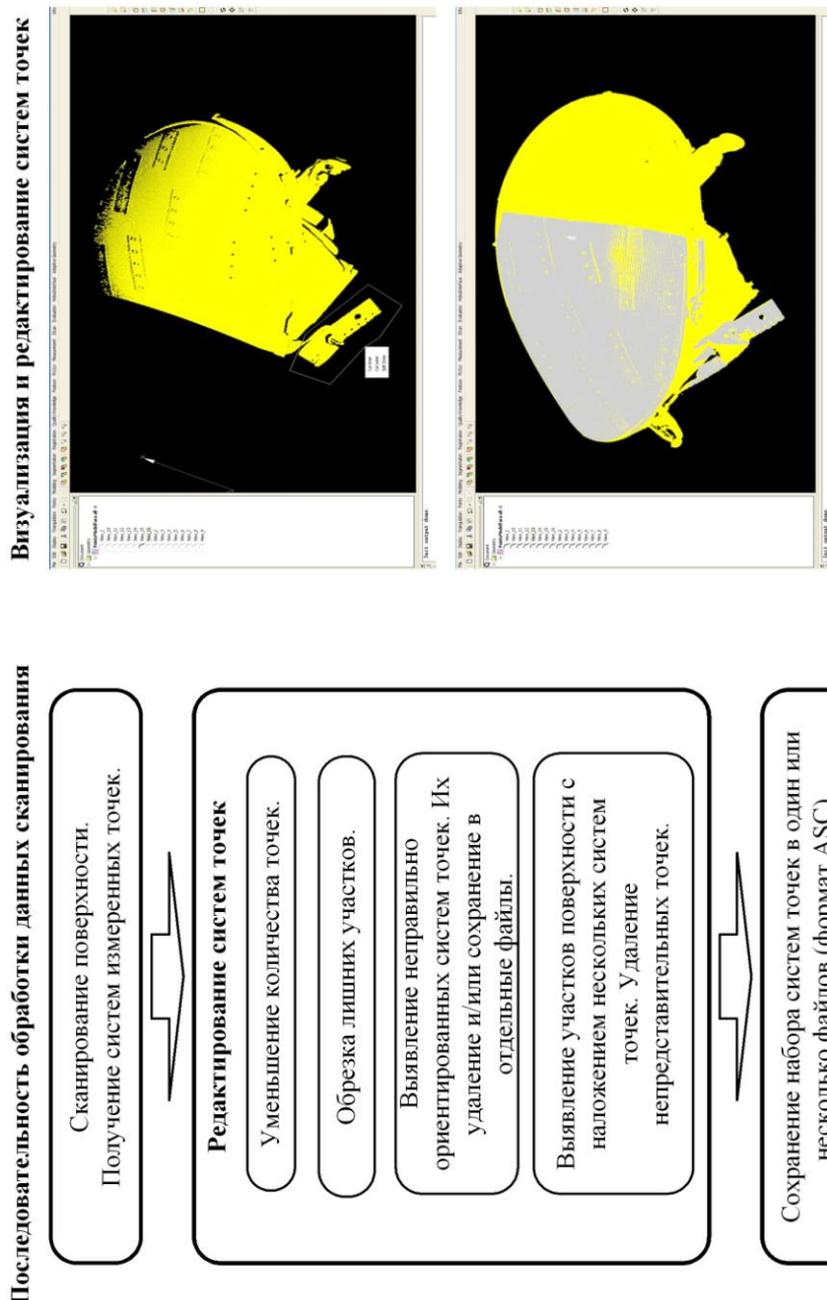


Рисунок 4 – Обработка данных сканирования в приложении Qspect

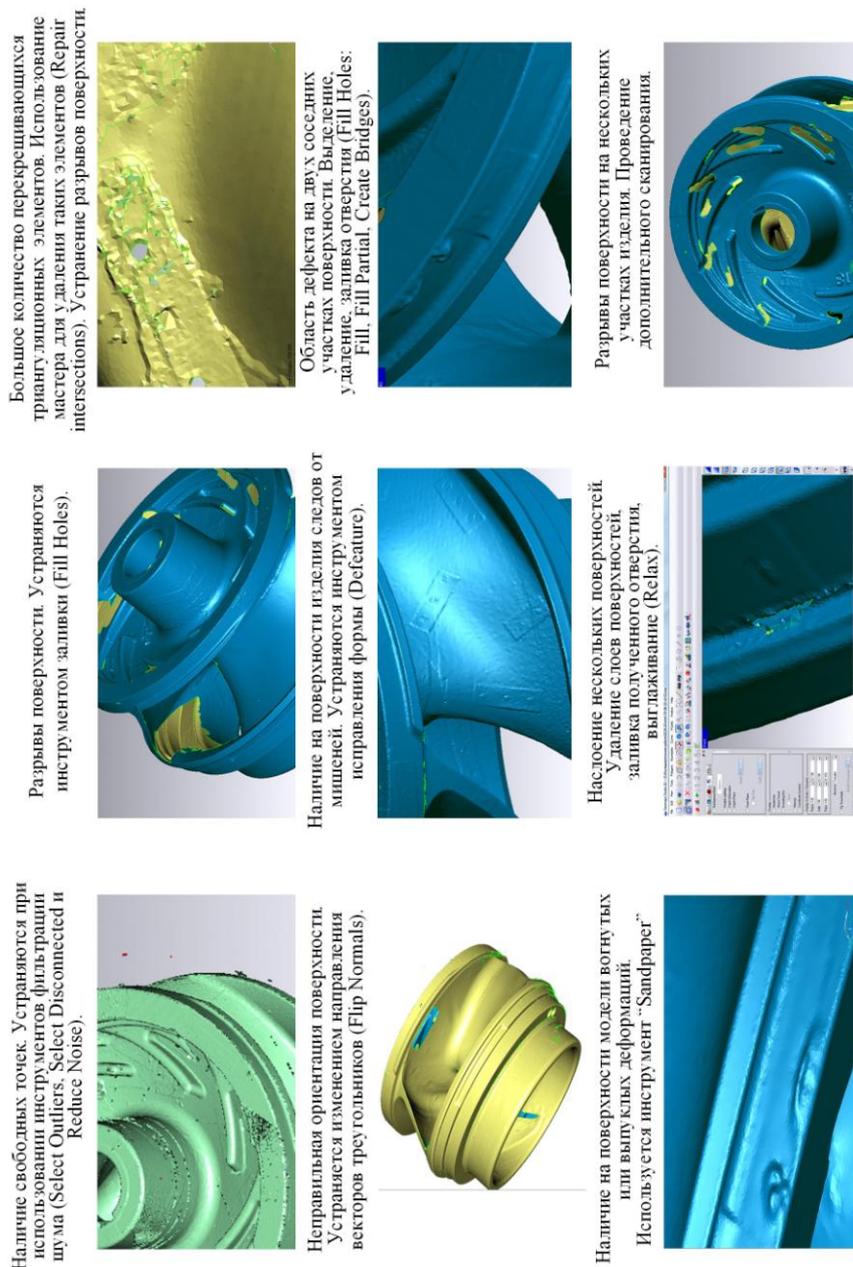


Рисунок 5 – Особенности редактирования триангуляционных моделей

Подготовленная точечная модель триангулируется с помощью команды "Wrap". Основные параметры этой команды: количество треугольников, уровни качества модели и фильтрации шумов.

Триангуляционная модель, полученная на основе систем точек, как правило, не является пригодной для ее материализации. Поэтому в Geomagic Studio предусмотрен ряд инструментов для устранения дефектов поверхности. На рис. 5 представлены некоторые особенности работы по устранению дефектов поверхности (разрывов и наслоений поверхностей, неровностей краев, пересечений треугольников и пр.).

При необходимости может выполняться общее сглаживание модели (с сохранением или без сохранения границ поверхностей), позволяющее устранить большую часть мелких дефектов. Но такой подход устранения дефектов может привести к увеличению погрешности на участках возле границ поверхностей и мелких элементов модели.

Для получения поверхностной модели (NURBS) на основе триангуляционной в Geomagic Studio предлагается обширный набор специальных инструментов [9, 10].

На рис. 6 представлен пример модели изделия полученной на этапе триангуляции системы измеренных точек и после ее редактирования (устранения дефектов поверхности) в системе Magics RP.

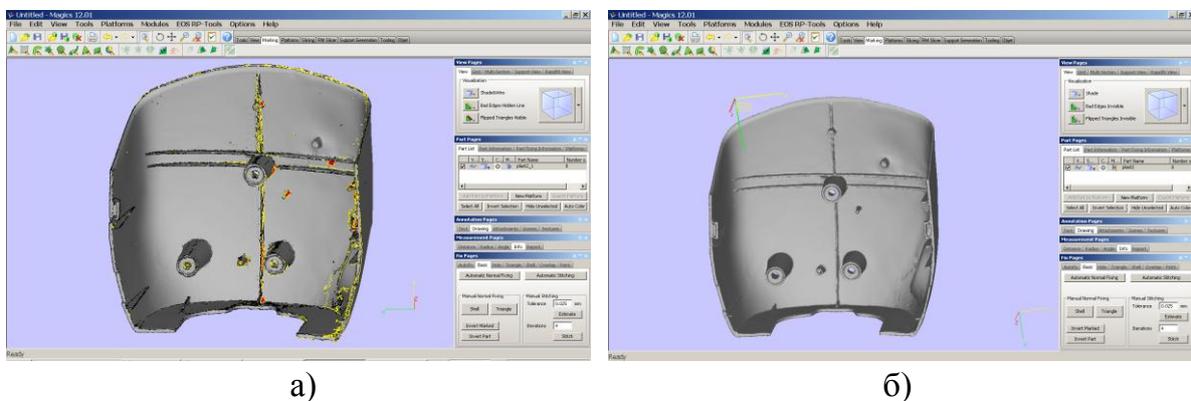


Рисунок 6 – Модель изделия (фары автомобиля) в системе Magics RP:
а) после триангуляции, б) после устранения дефектов.

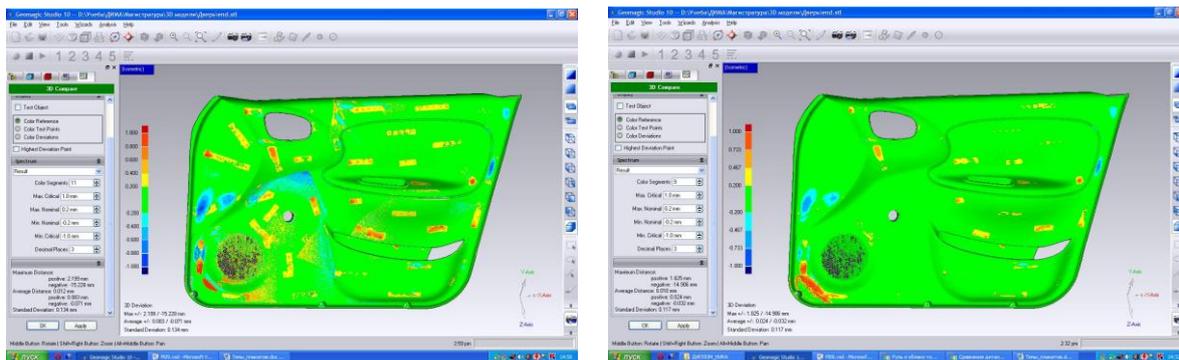
Система Magics RP имеет некоторые особенности по редактированию триангуляционной модели. Например, наиболее эффективным подходом по устранению дефектов поверхности является: выделение проблемного участка поверхности, использование функций "Triangle reduction" (уменьшение треугольников) и "Smoothing" (сглаживание без опции "Skip Bad Edges").

Верификация триангуляционных моделей

Сканирование, редактирование системы измеренных точек, триангуляция точечной модели, редактирование триангуляционной модели – этапы обратного инжиниринга промышленных изделий. Выполнение каждого из этих этапов добавляет определенную погрешность в триангуляционную модель изделия. Поэтому заключительным этапом обратного инжиниринга является верификация полученных моделей. По результатам верификации триангуляционных моделей принимается решение об их готовности к материализации.

При проведении исследований оценка погрешности полученных моделей выполнялась двумя способами: с применением цветных карт погрешности в системе Geomagic Studio и посредством статистического анализа отклонений размеров триангуляционной модели от реального объекта в математическом пакете Maple.

На рис. 7 представлена система Geomagic Studio с визуализацией карты погрешности на примере обшивки передней двери автомобиля.



а)

б)

Рисунок 7 – Визуализация отклонений для обшивки передней двери:

а) между системой точек и полученной моделью;

б) между моделями до и после редактирования.

Использование карты погрешности удобно для выявления и оценки причин вызывающих отклонения. Анализ таких карт для различных изделий позволил выявить основные факторы, влияющие на формирование результирующей погрешности. На этапах сканирования изделия, триангуляции и редактирования модели к таким факторам относятся:

- количество используемых мишеней на поверхности изделия;
- расстояние от наклеенных мишеней до границ поверхностей;
- расположение мишеней на границах поверхностей изделия или участках с малым радиусом кривизны;
- наличие бликов на поверхности изделия при сканировании;
- количество систем точек для одного участка поверхности;
- уровень проработанности точечной модели (удаление неподставительных точек);
- параметры триангуляции (количество треугольников, уровни фильтрации шумов и т. д.);

- использование инструментов выглаживания и их параметры (сила выглаживания и т. д.);

- выбор стратегии устранения дефектов поверхности (в основном определяется выбором САД-системы).

Статистический анализ погрешности размеров полученной модели выполнялся с применением математического пакета Maple. Размеры реальных изделий измерялись с использованием штангенциркуля (0,05 мм), а триангуляционных моделей в системе Magics RP.

Гистограммы плотности распределения абсолютных и относительных погрешностей для модели обшивки передней двери автомобиля представлены на рис. 8. Объем выборки составлял 30 измерений, основные статистические характеристики приведены в табл.

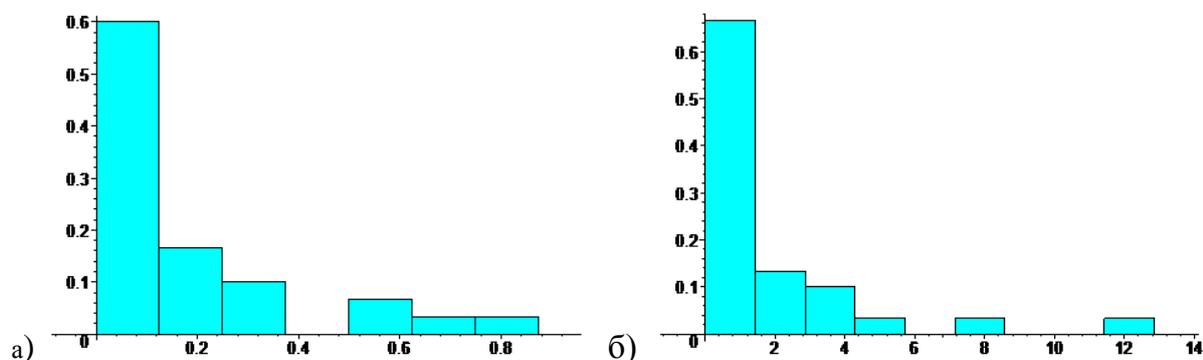


Рисунок 8 – Гистограммы плотности распределения погрешности моделирования обшивки передней двери автомобиля: а) абсолютная погрешность; б) относительная погрешность.

Таблица – Статистические характеристики распределения величины погрешностей модели обшивки передней двери автомобиля

Статистические характеристики	Погрешность размеров	
	абсолютная, мм	относительная, %
Интервал значений, $x_{\min} \div x_{\max}$	0 ÷ 0,87	0 ÷ 12,9
Среднеарифметическая, \bar{x}	0,18	1,8
Среднеквадратическое отклонение, s	0,21	2,7

По результатам верификации обшивки передней двери автомобиля (табл.) и других изделий была определена точность создания триангуляционной модели с использованием оптико-цифровой установки

объемного сканирования Imetric IScan II и современных программных средств. Погрешность создания моделей составила $\pm 0,2 \div 0,5$ мм (при погрешности сканирования данной установкой $\pm 0,04$ мм). Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о существенном резерве повышения точности обратного инжиниринга. Перспективным путем может быть совершенствование методов редактирования систем измеренных точек и элементов триангуляционных моделей. Такой подход создаст методологическую основу создания триангуляционных моделей повышенной точности.

Заключение

Рассмотрены особенности обратного инжиниринга промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric IScan II и систем QSpec (для обработки данных сканирования), Geomagic Studio, CopyCAD, Magics RP (для создания триангуляционных моделей изделий).

На основе верификации триангуляционных моделей промышленных изделий определены технологические возможности установки и выявлены факторы, влияющие на формирование погрешности создаваемых моделей.

Результаты исследования создают методологическую основу для последующего изучения влияния выявленных факторов на составляющие погрешности моделей промышленных изделий, что позволит разработать научно-обоснованные подходы по повышению их точности.

Список литературы: 1. *Клименко В.Ю.* Реверсный инжиниринг: учебн. пособие, Запорожье, 2009 -116 с. 2. IScan System manual. Porrentruy: Imetric SA, 2003. - 24 с. 3. ImetricS Software manual. Porrentruy: Imetric SA, 2002. - 83 с. 4. Delcam – CAD/CAM Software Creators. - Web: <http://www.delcam.com>. 5. Делкам - Урал - Лицензионное программное обеспечение для автоматизации проектирования (САПР) и решений инженерных задач. - Web: <http://www.delcam-ural.ru>. 6. Делкам - Новосибирск. - Web: <http://www.spider.nrcde.ru>. 7. Компания Bibus, Украина. - Web: <http://bibus.com.ua>. 8. Инжиниринговая компания ТЕСИС. - Web: <http://www.thesis.com.ru>. 9. Geomagic: 3D Software for creating 3D models from 3D scanner data. - Web: <http://www.geomagic.com>. 10. Форум САПР 2000. - Web: <http://www.fsapr2000.ru>.