

А. И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук,
В. Л. ДОБРОСКОК, д-р техн. наук,
С. И. ЧЕРНЫШОВ, канд. техн. наук,
Я. Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук, Харьков, Украина

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Розглянуто особливості технології зворотного інжинірингу промислових виробів. Представлено можливості існуючого устаткування для зворотного інжинірингу. Виконано аналіз програмного забезпечення для створення 3D моделей на основі системи обмірюваних точок.

Рассмотрены особенности технологии обратного инжиниринга промышленных изделий. Представлены возможности существующего оборудования для обратного инжиниринга. Выполнен анализ программного обеспечения для создания 3D моделей на основе системы измеренных точек.

Features of technology of reverse engineering of industrial products are considered. The existing equipment's capabilities for reverse engineering are presented. It is analysed the software for creation 3D models on a basis of a system of measured points.

Успешность реализации готовых изделий напрямую зависит от оригинальности дизайна и качества исполнения. Конкуренция во всех отраслях промышленности требует от современных компаний быстрой реакции на запросы потребителей и сокращения сроков подготовки производства новых изделий. Сократить время разработки трехмерных моделей для проектируемых изделий позволяет использование обратного инжиниринга (Reverse Engineering). В ряде случаев это единственная возможность описать изделие, на которое отсутствует конструкторская документация.

Обратный инжиниринг – интенсивно развивающаяся технология. Имея широкое практическое применение, обратный инжиниринг 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.

Поэтому вопросы выбора оборудования и программного обеспечения для решения задач обратного инжиниринга промышленных изделий являются актуальными.

Обратный инжиниринг (Reverse Engineering)

Целью обратного инжиниринга является получение математической модели на основе измерения реального объекта (рис. 1) [1].

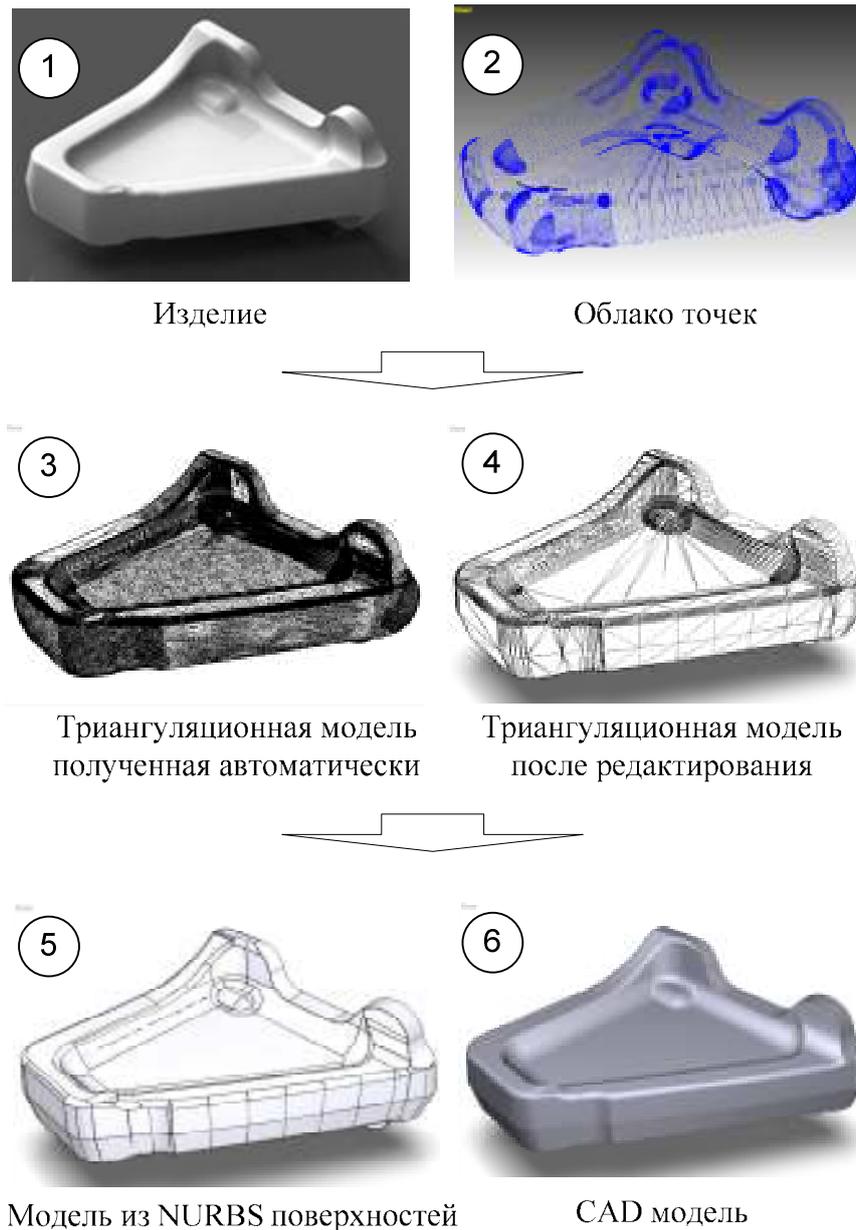


Рисунок 1 – Этапы обратного инжиниринга промышленного изделия

Технология обратного инжиниринга имеет следующие области применения:

- машиностроение (на этапе проектирования, для создания трехмерных моделей, мастер-моделей; в производстве, для контроля точности изделий, проведения измерений геометрических параметров инструмента и последующей коррекции инструмента; для создания модели изделия и проведения последующих аэродинамических испытаний; для хранения цифровых копий изделий, инструмента и оснастки для обеспечения возможности их изменения, ремонта или повторного воспроизведения);

- строительство и архитектура (для создания трехмерных моделей зданий, улиц, рельефа, монтажных работ, контроля состояния сооружений в период эксплуатации);

- горная промышленность (для 3D-моделирования открытых карьеров и подземных выработок, определения объемов выработок и складов, маркшейдерского сопровождения буровзрывных работ, строительства и проектирования объектов обустройства месторождений) [2];

- нефтегазовая промышленность (для 3D-моделирования месторождений, продуктопроводов, геометрического контроля резервуаров, проектирования объектов обустройства месторождений);

- энергетика (для сканирования кабелей, опорных конструкций, создания 3D-моделей монтажных работ, контроля состояния объекта);

- культура и искусство (для хранения цифровых копий скульптурных композиций и барельефов; создания сувениров; воспроизведения утраченных культурных ценностей, реставрационных работ);

- биометрия (для идентификации личности по трехмерной модели лица);

- компьютерные игры и создание спецэффектов;

- проектирование одежды и обуви [3];

- медицина (для протезирования, планирования операций, ортопедии, пластической хирургии, косметологии) [4, 5, 6] и т.д.

В общем случае, процесс обратного инжиниринга промышленных изделий включает следующие этапы: визуальный анализ конструкции изделия; сканирование; создание и редактирование триангуляционной модели (при использовании бесконтактных методов сканирования, основанных на технологиях структурированного белого света и лазерного луча); построение базовых поверхностей; контроль базовых поверхностей; построение 3D модели; контроль 3D модели и ее доработка (при необходимости).

Рассмотрим технологические возможности оборудования используемого для обратного инжиниринга, их характеристики и области применения. Это может служить основой для рационального выбора оборудования на этапе принятия решения об использовании метода получения модели изделия.

Оборудование Reverse Engineering

Оборудование обратного инжиниринга представляет собой установки для 3D сканирования (процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям проектируемых изделий с целью последующего получения их 3D моделей, которые могут модифицироваться в САД-системах) [5, 7, 4].

По методу сканирования различают контактные и бесконтактные 3D сканеры (рис. 2) [8].

Контактный метод сканирования. Контактный метод 3D сканирования построен по принципу обвода поверхности изделия специальным высокочувствительным щупом, с помощью которого в компьютер передаются координаты сканируемого объекта.

К преимуществам контактного метода можно отнести простоту сканирования призматических объектов, независимость качества измерений от освещенности, простоту использования и небольшой объем получаемых файлов, небольшую трудоемкость получения 3D модели.

К недостаткам относятся большое время сканирования (за одно перемещение измерительного инструмента определяются координаты только одной точки), невозможность сканирования криволинейных поверхностей и миниатюрных изделий [9].

Бесконтактный метод сканирования. При бесконтактном методе сканирующие устройства делятся на пассивные и активные 3D сканеры.

Активные 3D сканеры излучают на объект сканирования свет, луч лазера, ультразвук или рентгеновские лучи и считывают отражение. Активно ведутся разработки магнитных сканеров, использующих для определения координат поверхности объекта изменение его пространственного магнитного поля. Следует отметить, что ультразвуковые и магнитные сканеры крайне чувствительны к различным помехам. Так, первые могут реагировать на погодные явления, звуковые волны, создаваемые другим оборудованием, кондиционерами или даже флуоресцентными лампами, а источником помех для вторых могут быть металлические объекты и электропроводка в помещении [10].

Пассивные 3D сканеры основаны на принципе обнаружения отраженного окружающего излучения (без излучения сканера).

Также бесконтактные 3D сканеры можно разделить по принципу работы на четыре основные технологии сканирования:

- фотограмметрия;
- томография;
- структурированный белый свет;
- лазерный луч.

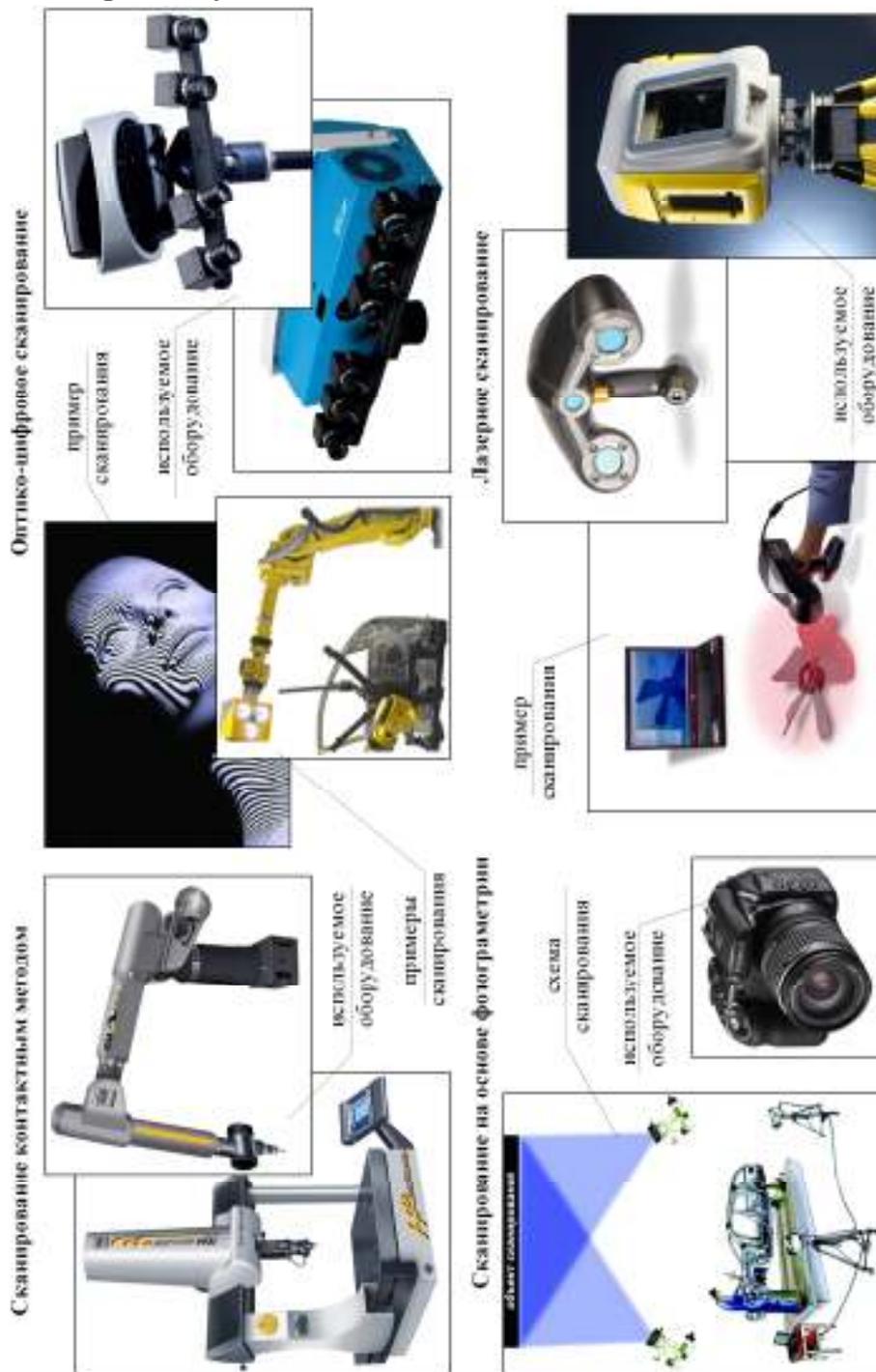


Рисунок 2 – 3D сканирующие устройства

Сканирование на основе фотограмметрии представляет собой фотографирование исходного объекта с различных ракурсов и воссоздание на основе полученных изображений трехмерной модели (рис. 2). Преимуществами данного метода являются низкие затраты на оборудование и отсутствие контакта с измеряемой поверхностью. Недостатки: сложность процедуры установки фотокамер и нанесения точек привязки; для калибровки требуется как минимум 4÷6 фотокамер; необходимо большое количество фотографий, для получения точной модели; высокая трудоемкость процедуры сшивки изображений для получения целостной модели.

Томография основана на исследовании внутренней структуры объекта посредством его многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях.

Представим классификацию видов оборудования (по методу) томографии [11].

По взаимному расположению источника зондирующего излучения, объекта и детектора, оборудование томографии может быть разделено на следующие группы:

- трансмиссионные - регистрируется зондирующее внешнее излучение, прошедшее через пассивный (неизлучающий) объект, частично ослабляясь при этом;

- эмиссионные - регистрируется излучение, выходящее из активного (излучающего) объекта с некоторым пространственным распределением источников излучения;

- комбинированные трансмиссионно-эмиссионные (люминесцентные, акустооптические и др.) - регистрируется вторичное излучение от объектов-источников, распределенных по объему исходного объекта и возбужденных внешним излучением;

- эхозондирование - регистрируется зондирующее внешнее излучение, отраженное от внутренних структур пассивного объекта.

По зондирующему излучению:

- с использованием звуковых волн (ультразвуковая, сейсмическая томографии);

- с использованием электромагнитного излучения (радионуклидная эмиссионная, однофотонная эмиссионная, двухфотонная эмиссионная или позитронно-эмиссионная, рентгеновская, рентгеновская компьютерная, оптическая (лазерная) томографии, томография в радиодиапазоне);

- с использованием электромагнитных полей (магнитно-резонансная, электро-импедансная томографии);

- с использованием элементарных частиц (нейтронная, электронная и позитронная, протонная, нейтринная томографии).

Сканирование на основе структурированного белого света заключается в проецировании на объект линий, образующих уникальный узор, каждое изменение которого сканируется приемной камерой. К преимуществам относятся большая скорость сканирования, получение до 1 000 000 точек сканирования за одно измерение, высокая точность и детализация элементов изделия, отсутствие контакта с измеряемой поверхностью и возможность сканирования человеческих лиц благодаря отсутствию лазерных лучей. Недостатками являются стационарная установка, исключающая возможность мобильного сканирования; ограничение по минимальным размерам сканируемого изделия; невозможность сканирования внутренних областей; сложность при сканировании объектов, находящихся вне помещений, ограничения по яркости; большая стоимость системы и необходимость проведения процедуры последующей обработки для объединения отсканированных частей.

Лазерная технология сканирования основана на проецировании лазерного луча на объект сканирования. Все искажения воспринимаются измерительной камерой, которая отслеживает положение лазерного луча, полученные данные передаются на компьютер. К преимуществам лазерного 3D сканера относятся не высокая стоимость для промышленного применения, возможность сканирования вне помещений, и при разной освещенности, отсутствие контакта с измеряемой поверхностью, возможность работы с объектами, недоступными для сканирования с использованием технологии белого структурированного света. Недостатками являются невозможность сканирования прозрачных, черно-белых объектов или с большой степенью светоотражения, поэтому, требуется их предварительная обработка [9].

Сканеры (координатно-измерительные машины) можно сгруппировать по типам исполнения (рис. 3) [12]:

- 3D-портальные;
- Стоечные;
- Шарнирно-сочлененные типа "рука";
- Шестиосевые на основе платформы Стюарта;
- Фото и рентгенографические;
- Лазерные дальнометры объемного сканирования.

Основные требования, предъявляемые к сканерам - точность и скорость измерений, простота в обучении персонала и эксплуатации сканера. Одним из типов точных сканеров по исполнению, ввиду хорошей сбалансированности конструкции и традиционной кинематики, являются 3D-портальные установки.

Большое количество производителей предлагают целый ряд моделей 3D сканеров с различными возможностями, техническими характеристиками и соответственно стоимостью. Стоимость 3D сканеров варьируется от нескольких тыс. до нескольких млн. евро. Для получения представления о технических возможностях современных сканеров в табл. 1 приведены для некоторых из них технические характеристики.

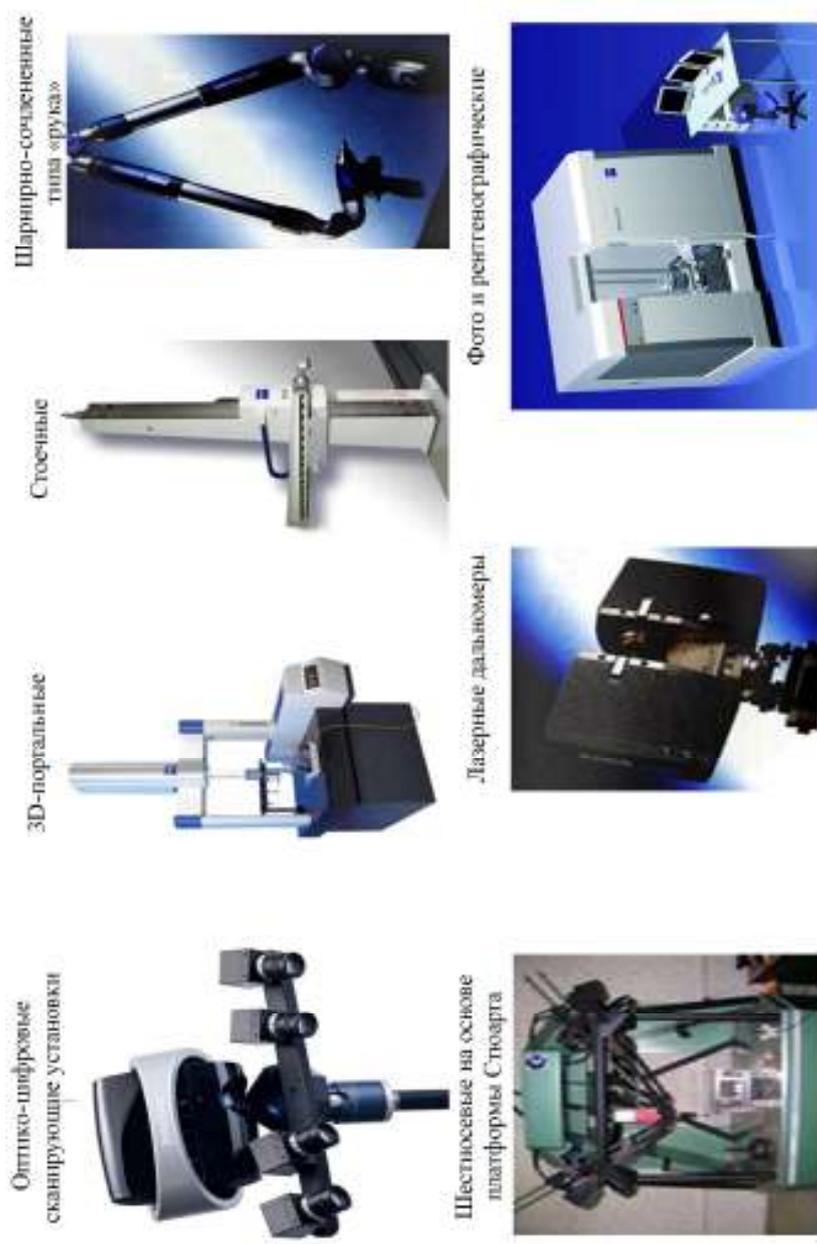


Рисунок 3 – Типы исполнения 3D-сканеров (координатно-измерительных машин)

Рисунок 3 – Типы исполнения 3D-сканеров (координатно-измерительных машин)

Таблица 1 – Технические характеристики 3D сканеров [13, 14, 15, 16]

Технология	Производитель	Модель	Рабочая зона, мм	Точность (разрешение), мм	Скорость сканирования
Контактный метод сканирования	Faro Tech.	FaroArm Advantage	1200-3700	от $\pm 0,090$ до $\pm 0,431$	
		FaroArm Platinum	1200-3700	от $\pm 0,018$ до $\pm 0,086$	
	Roland DGA Corp.	MDX-20	200×150×60	X, Y: 0,050 Z: 0,025	
	Mitutoyo	Euro-C-121210	1205×1205×1005	0,001	
	Hexagon Metrology	Multi GAGE	1200	0,005	
	IMS	Premier		0,0001	20 мм/с
Рентгеновская компьютерная томография	Aracor	Konoscope 160	max \varnothing 160	0,020	
	Micro Photonics Inc.	Skyscan 1172	max \varnothing 68	0,001	
Лазерная триангуляция	Perceptron	ScanWorks Lite		$\pm 0,050$	23040 точек/с
	Callidus Precision Syst.	CT180	350×375	0,100	4000 точек/с
	Metris	XC50 cross scanner	15×15	0,015	3*64000 точек/с
Лазерный дальномер	Faro Tech.	Laser Tracker		0,002 мм + 0,0004 мм на каждый метр до объекта	1000 точек/с
Лазерная технология	Romer	R-Scan		0,001	
Структурированный белый свет	Imetric	Iscan II	от 100 до 10000	0,040	
	Genex	Rainbow 25	32×25×20	0,025	442368 точек/с

Программное обеспечение Reverse Engineering

Современный рынок программного обеспечения предлагает большое многообразие специальных систем для решения задач обратного инжиниринга (табл. 2). В табл. 2 представлены некоторые компьютерные системы, сгруппированные по решаемым задачам обратного инжиниринга.

Таблица 2 – Существующее программное обеспечение для решения задач обратного инжиниринга [16]

Область применения	Основные функции	Программное обеспечение
Управление оборудованием обратного инжиниринга	Управление оборудованием обратного инжиниринга для получения систем измеренных точек и их обработки.	Mitutoyo Cosmos, Hymarc, Metris Scan, Cyberware CyDir и GSI Crystal Studio.
Обработка CAD-элементов	Обработка CAD-элементов получаемых на основе систем измеренных точек и триангуляционных моделей. CAD-элементы содержат, точки, линии сканирования и базовые CAD-элементы (окружность, прямоугольник, цилиндр и т.д.).	ICEM surf, Imageware и другие CAD-системы, такие как UG, ProEngineer и Solidworks.
Обработка элементов триангуляционной модели	Редактирование, модификация и оптимизация 3D триангуляционной модели.	Magics RP, DeskArtes. Catia Shape Sculptor и Viscam RP.
Проектирование триангуляционной и поверхностной (NURBS) модели	Обеспечивается полный набор инструментов обработки данных обратного инжиниринга от работы с системами измеренных точек и триангуляционными моделями до создания NURBS поверхностей, а также 3D контроля.	GSI Studio, CopyCAD, Rapidform, Gcomagics, Polyworks (Modeler) и Paraform.
Обработка 2D изображений и 3D моделирование	Обработка сканированных 2D изображений (СТ/MRI) и 3D реконструкция.	Mimics, Rapidform, BioBuild, Velocity2, Amira, Scan IP, Analyze и 3D Doctors.
3D контроль (верификация)	Использование для 3D контроля, создания и анализа карты погрешностей и ведения документации.	COMETinspct, Metris Focus Inspection, PowerINSPECT, PolyWorks Inspector и Geomagic Qualify.
Поверхностное (NURBS) и твердотельное моделирование	Обеспечивается инструментами поверхностного моделирования и редактирования CAD-элементов.	PowerSHAPE, ProEngineer, UG, Solidworks, Catia и Rhino.

При обратном инжиниринге промышленных изделий на базе центра высоких технологий учебно-научно-производственного объединения при НТУ «ХПИ» (кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко) использовалось несколько систем (CoryCAD, Geomagic Studio и Magics RP) для работы с триангуляционными моделями. Рассмотрим особенности этих САД-систем и выполним их сравнительный анализ.

Система CoryCAD (компания Delcam plc). Система использует системы точек с координатно-измерительных машин или 3D сканеров работающих бесконтактным методом, и позволяет генерировать поверхностные модели, для последующего экспорта в САД-формате и возможности редактирования в большинстве систем моделирования. CoryCAD позволяет решить ряд задач [17]:

- создания трехмерных моделей на основе систем точек;
- сохранения особенностей рельефа поверхности модели при редактировании;
- выдавливания трехмерных эмблем и художественных орнаментов на поверхности;
- 3D визуализации;
- верификации.

Для создания поверхностей из отсканированных данных необходимо выполнение несколько основных стадий [18]: импорт данных (систем точек), создание структуры линий сканирования или точек, смещение линий сканирования с учетом диаметра шарикового шупа, генерирование триангуляционной модели, генерирование поверхностей, верификация модели, экспорт данных (в форматах DUCT, IGES, STL).

CoryCAD использует различные уровни структуры построения модели из импортируемых данных. Структура может состоять из следующих объектов [19]:

- Точки (объект низшего уровня), которые могут быть получены при использовании контактного или бесконтактного метода. Исследование точечной модели является важным шагом при создании качественной триангуляционной модели.

- Линии сканирования образуют структуру точечной модели в виде нескольких упорядоченных множеств точек. Если система точек была получена при использовании координатно-измерительной машины, то точки, как правило, находятся на большом расстоянии друг от друга. В этом случае лучше использовать линии сканирования для создания триангулированной модели. Если модель получена с использованием бесконтактного метода сканирования, тогда используются точки для создания триангуляционной модели.

- Триангуляционная модель, импортируется или создается на основе данных сканирования. Триангуляционная модель не должна иметь

разрывов поверхности или перекрытий между треугольниками. SolidCAD снабжен модулем TriFIX, который позволяет исправлять некоторые дефекты триангуляционной модели (наслоение нескольких поверхностей, перекрещивающиеся треугольники и пр.). Триангуляционные модели экспортируются в следующих форматах: STL (для материализации технологиями Rapid Prototyping) и DMT (используется для создания программ фрезерной обработки в программном пакете PowerMILL).

- Поверхностные модели, импортируются или создаются на основе триангуляционной модели. Также существует возможность импорта поверхностной модели из CAD пакета PowerSHAPE, которая затем триангулируется и далее экспортируется в формат STL. Получение поверхностной из триангуляционной модели позволяет воспроизвести CAD модели из отсканированной системы точек.

Система Magics RP (компания Materialise, Бельгия). Система используется для создания и редактирования триангуляционных моделей. Ориентирована на подготовку моделей для их материализации с использованием технологий Rapid Prototyping [20].

Автоматически созданные триангуляционные модели, как правило, содержат перевернутые треугольники, разрывы поверхности или другие ошибки геометрии, которые требуют корректировки. Magics RP кроме инструментов автоматического устранения дефектов, также имеет инструменты для работы на уровне отдельных треугольников.

К особенностям работы в программном пакете можно отнести обнаружение и автоматическое исправление большей части дефектов триангуляционных моделей, сборка частей модели, анализ геометрии модели детали (или сборочной единицы) с использованием инструментов сечения, выполнение замеров на плоскости или в пространстве, верификация размеров после материализации, автоматизированное создание документации технологического процесса.

Все предлагаемые функции могут быть сгруппированы в две категории: редактирование и корректировка триангуляционных моделей. Возможности редактирования триангуляционных моделей: обрезка модели; создание отверстий; сборка моделей деталей из нескольких частей; объединение нескольких объектов, создание простейших геометрических тел: сфера, цилиндр, параллелепипед, конус, пирамида, призма и пр.

Система Geomagic Studio (компания Geomagic). Это система для проведения обратного инжиниринга изделий, позволяющая создавать поверхностную модель объекта по данным сканирования [21].

Программный пакет обеспечивает высокую скорость работы с большими объемами данных (до 100 миллионов точек), поддерживает

взаимодействие с различными видами сканирующих устройств и выполняет импорт и экспорт данных для различных форматов.

Программный пакет Geomagic Studio состоит из четырех основных модулей [21, 22].

Модуль Geomagic Capture предназначен для сбора систем точек с помощью сканера, совмещения данных, полученных при различных положениях детали или сканирующего устройства, а также для интеллектуальной фильтрации и редактирования набора систем точек (удаление "выбросов", "шумов" и т. д.).

Модуль Geomagic Wrap предназначен для триангуляции точечной модели и редактирования полученной триангуляционной модели (заполнения разрывов, уменьшения количества треугольников, сглаживания поверхностей, заострения граней и т. д.). Системы измеренных точек могут импортироваться в тех же форматах, которые использует модуль Geomagic Capture.

Модуль Geomagic Shape автоматически обнаруживает изгибы поверхностей объекта и преобразовывает триангуляционные модели в NURBS-поверхности. При этом обеспечивается автоматическое сохранение топологии формы. Реализованы возможности организации и слияния отдельных фрагментов поверхностей.

Модуль Geomagic Fashion предназначен для распознавания первоначального дизайна объекта и подготовки к импорту в CAD/CAM системы. В результате обработки реконструируются стандартные геометрические элементы (плоскости, цилиндры, сферы и т. д.), которые составляют часть поверхности объекта.

Процесс создания модели изделия в программном пакете Geomagic Studio состоит из 3-х этапов [23]:

1. Обработка набора систем точек (Capture) состоит из регистрации множества точек, удаления лишних, снижения шумов, объединения отсканированных изображений и выполнения триангуляции.

2. Обработка полигонов (Wrap) включает в себя упрощение данных, восстановление триангуляционных поверхностей (заполнение отверстий, восстановление кромок), их редактирование (логические операции, усреднение повторяющихся элементов) и подготовку к материализации модели изделия по технологии Rapid Prototyping.

3. Создание NURBS-поверхностей (Shape) выполняется автоматически или интерактивно (определение кривых, конструирование вставок, создание параметрической сетки, подгонка поверхностей) затем проводится анализ отклонений (при сравнении с системой измеренных точек) и экспорт данных.

Сравнительный анализ возможностей программных пакетов для обработки результатов объемного сканирования

Все выше представленные системы разработаны для решения задач обратного инжиниринга, но каждый из них имеет свою рациональную область применения. Система CopyCAD специализируется на координатно-измерительных машинах. При этом имеет важное преимущество - позволяет перейти сразу от точечной к поверхностной модели. Такой подход обеспечивает дальнейшее редактирование трехмерной модели в CAD-системах, пропуская шаг преобразования триангуляционной модели в поверхностную тем самым, уменьшая погрешность создания модели и время на ее обработку.

Система Magics RP отличается тем, что предоставляет возможность работы на более "подробном" уровне с триангуляционными моделями. Работа с наименьшими элементами модели может обеспечить решение задач по редактированию трехмерной модели на другом уровне. Отличие пакета, создание небольших по размеру файлов, по сравнению с Geomagic Studio. Система Magics RP ориентирована на решение задач по подготовке модели к материализации технологиями Rapid Prototyping.

Для работы с триангуляционными моделями изделий, полученными по данным с оптико-цифровой установки, наиболее полно реализовала возможности система Geomagic Studio. В отличие от других пакетов сшивание разрывов поверхностей выполнялось наиболее точно, без потерь рельефа поверхности. В дополнение к автоматическому режиму, в случае некачественного сшивания поверхностей, предлагается ряд инструментов позволяющих вручную выполнить обработку участка поверхности с достаточной точностью. Некоторые операции выполняются с поддержкой нескольких ядер процессора компьютера, что значительно ускоряет процесс обработки. Geomagic Studio и CopyCAD имеют в наличии инструмент по визуальному анализу погрешности (верификации) полученной триангуляционной модели по сравнению с системой измеренных точек (или другой моделью).

Системы Geomagic Studio и CopyCAD решают целый ряд задач обратного инжиниринга. Системы обеспечены полным набором инструментов обработки систем измеренных точек, работы с триангуляционными моделями, для создания NURBS поверхностей и выполнения 3D контроля.

Заключение

В настоящее время существует достаточно широкий спектр аппаратных и программных средств по решению задач обратного инжиниринга. Однако при этом отсутствуют четкие рекомендации по

выбору этих средств и определению стратегии обратного инжиниринга с учетом особенностей конкретных групп изделий.

Сравнительный эксплуатационный анализ САД-систем (CоруCAD, Geomagic Studio, Magics RP) по созданию и редактированию триангуляционных моделей позволил выявить их некоторые функциональные особенности.

Система CоруCAD наиболее полно реализует свои функциональные возможности при создании поверхностной модели на основе систем измеренных точек и триангуляционной модели.

Geomagic Studio предлагает обширный набор инструментов по работе с триангуляционной моделью, позволяющий качественно устранять дефекты поверхности.

Систему Magics RP предпочтительно использовать для работы на более детализованном уровне с триангуляционными моделями, а также для решения задач подготовки моделей к материализации технологиями Rapid Prototyping.

Список литературы: 1. *Клименко В.Ю.* Реверсный инжиниринг: учебн. пособие, Запорожье, 2009. -116 с. 2. *Алябьева А.Д.* Лазерное сканирование объектов и территорий // Технология 2000. - 2000.- WEB: <http://www.tech-2000.ru>. 3. *Лебедев А.В.* Применение сканеров Artec и услуги по дигитализации объектов // Современные средства измерительной техники. - 2002. - WEB: <http://www.koda.ua>. 4. Аметист 3D. 3D-сканирование и моделирование. - Санкт-Петербург: Ninsis, 2003. Web: <http://www.ametist.com/3D/using.php>. 5. Range Vision. Разработка 3D сканеров. - Web: <http://www.rangevision.com/content/blogcategory/22/43/>. 6. 3DNews Daily Digital Digest. - Web: <http://www.3dnews.ru/>. 7. Cybercom - сканеры 3D принтеры. - Web: <http://www.cybercom.ru>. 8. Midgart. Центр объемной печати. - Web: <http://www.midgart.ru>. 9. Журнал для профессионалов в области САПР. CAD master. - Web: <http://www.cadmater.ru>. 10. *Ричардсон Р.* Сканируя пространство. "Экспресс-Электроника", №10. – 2003. - Web: <http://citforum.univ.kiev.ua>. 11. Томография. - Web: <http://ru.wikipedia.org>. 12. *Горбач Ф.И., Макаров С.О.* Контроль и диагностика - координатно-измерительные машины: точность нового поколения // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия металлообработка. – 2009. - №3. - Web: <http://www.info-ua.com>. 13. Обзор продуктов FARO. - Web: <http://products.faro.com>. 14. 3D сканеры (трехмерные): разработка и сопровождение. - Web. rangevision.com. 15. Координатно-измерительные машины Hawk с лазерной сканирующей головкой. Web: www.rosinox-tool.ru. – 1996. – 385 с. 16. *Raja, Vinesh; Fernandes, Kiran J.* Reverse Engineering - An Industrial Perspective. Springer. 2008. - pp. 242. 17. Delcam – CAD/CAM Software Creators. - Web: <http://www.delcam.com>. 18. Делкам - Урал - Лицензионное программное обеспечение для автоматизации проектирования (САПР) и решений инженерных задач. - Web: <http://www.delcam-ural.ru>. 19. Делкам - Новосибирск. - Web: <http://www.spider.nrcde.ru>. 20. Компания Bibus Украина. - Web: <http://bibus.com.ua>. 21. Инжиниринговая компания ТЕСИС. - Web: <http://www.thesis.com.ru>. 22. Geomagic: 3D Software for creating 3D models from 3D scanner data. - Web: <http://www.geomagic.com>. 23. Форум САПР 2000. - Web: <http://www.fsapr2000.ru>.