

ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПРОСТОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ДО 3D-МОДЕЛИ

Суконкин В.В., Островский В.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кошман В. Д. — магистр, ст. преподаватель кафедры ИКТ

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию процесса обратного инжиниринга (реверс-инжиниринга) на примере простой механической детали — от физического объекта к созданию ее цифровой 3D-модели. Актуальность данного метода обусловлена необходимостью восстановления деталей, производство которых прекращено, при отсутствии технической документации.

Ключевые слова: обратный инжиниринг, реверс-инжиниринг, 3D-модель, механическая деталь

Введение. В современном машиностроении возникает ситуация, когда оборудование продолжает эксплуатироваться, однако необходимые запасные части уже не производятся. При выходе из строя простой механической детали и невозможности приобрести оригинальный элемент, практическим решением становится применение обратного инжиниринга — построение цифровой модели по существующему физическому образцу.

Основная часть. Процедура обратного инжиниринга механической детали [1] представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, каждый из которых влияет на точность конечного результата.

На подготовительной стадии деталь очищают от загрязнений, выполняют внешний осмотр и фиксируют видимые дефекты (трещины, сколы, следы износа). Одновременно определяются базовые поверхности, используемые в дальнейшем как измерительные базы.

Этап получения геометрической информации может реализовываться двумя способами: прямыми измерениями механическими средствами или трёхмерным сканированием.

При использовании традиционных измерительных инструментов применяются штангенциркуль, микрометр и нутромер. Штангенциркуль обеспечивает точность порядка 0,05 мм при измерении наружных и внутренних размеров, тогда как микрометр позволяет повысить точность до 0,01 мм. Преимуществом метода является его доступность, однако он затруднителен для деталей сложной формы.

Более технологичным подходом выступает 3D-сканирование, при котором формируется облако точек, содержащее большое количество координат поверхности детали. Современные сканирующие системы обеспечивают точность порядка 0,02–0,04 мм и позволяют корректно оцифровывать сложные геометрические элементы: зубчатые профили, радиусные поверхности и фаски.

После получения исходных данных детали они импортируются в специализированную CAD-систему, где формируется твердотельная модель. Далее проводится верификация — сопоставление цифровой модели с исходной деталью для оценки точности воспроизведения геометрии.

Для наглядности целесообразно рассмотреть уникальные детали, которые могут быть сняты с производства и отсутствовать в каталогах. Примером служит шестерня привода масляного насоса автомобиля ГАЗ-24 ранних выпусков. Для таких изделий, в частности для этой детали (рисунок 2), зачастую отсутствуют чертежи и аналоги, что делает обратный инжиниринг единственным способом восстановления.

В процессе воссоздания определяются основные геометрические параметры: наружные диаметры, размеры посадочных отверстий, ширина зубчатого венца [2]. Для зубчатых колёс

дополнительно вычисляются скрытые характеристики – модуль зацепления, угол профиля и коэффициент смещения. Они определяются на основе измерений и теоретических зависимостей (так как есть параметры, которые приборами не померяешь напрямую: модуль зацепления, угол профиля зуба, коэффициент смещения и т.д.).

При построении CAD-модели важно не копировать изношенную поверхность, а восстановить номинальный профиль зуба. Практика показывает, что при корректном выполнении работ среднее отклонение модели может составлять 0,03–0,05 мм [3], что является достаточным для эксплуатации и соответствует восьмой степени точности (рисунок 1):

С. 6 ГОСТ 13506—81			Электронная версия								
Степень точности	Обозначение	Модуль m , мм	Длина рейки L , мм								
			До 12	Св. 12 до 20	Св. 20 до 32	Св. 32 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 200	Св. 200 до 315	Св. 315 до 630*
			мкм								
5	F_i'	От 0,1 до < 1,0	$F_i' = F_p + f_i$ (см. примечание 2)								
	F_p	От 0,1 до < 1,0	10	11	12	14	16	19	22	25	32
	F_{pe}	От 0,1 до < 1,0	± 7	± 10	± 11	± 12	± 14	± 16	± 19	± 22	± 25
6	F_i'	От 0,1 до < 1,0	$F_i' = F_p + f_i$ (см. примечание 2)								
	F_p	От 0,1 до < 1,0	16	17	19	22	25	30	36	40	50
	F_{pe}	От 0,1 до < 1,0	± 11	± 16	± 17	± 19	± 22	± 25	± 30	± 35	± 40
7	F_i'	От 0,1 до < 1,0	$F_i' = F_p + f_i$ (см. примечание 2)								
	F_p	От 0,1 до < 1,0	22	24	26	30	35	42	50	56	70
	F_{pe}	От 0,1 до < 1,0	± 18	± 20	± 22	± 25	± 30	± 35	± 40	± 46	± 56
8	F_i'	От 0,1 до < 1,0	$F_i' = F_p + f_i$ (см. примечание 2)								
	F_p	От 0,1 до < 1,0	32	34	38	42	50	60	70	80	100
	F_{pe}	От 0,1 до < 1,0	± 25	± 28	± 30	± 36	± 40	± 50	± 58	± 66	± 80

Рисунок 1 – Таблица степеней точности зубчатых колёс

В процессе выполнения работы мы создали 3D-модель детали на основе её реального образца. Сначала мы очистили деталь и внимательно её осмотрели (рисунок 2, а), после чего выполнили необходимые измерения с помощью штангенциркуля и микрометра. Основное внимание мы уделяли ключевым размерам, от которых зависит точность будущей модели.

Далее полученные размеры мы перенесли в CAD-программу и поэтапно построили твердотельную 3D-модель детали (рисунок 2, б). При моделировании мы использовали как измеренные значения, так и расчётные параметры, чтобы восстановить правильную геометрию детали. В конце мы сравнили модель с исходной деталью и убедились, что точность моделирования достаточна для дальнейшего изготовления.

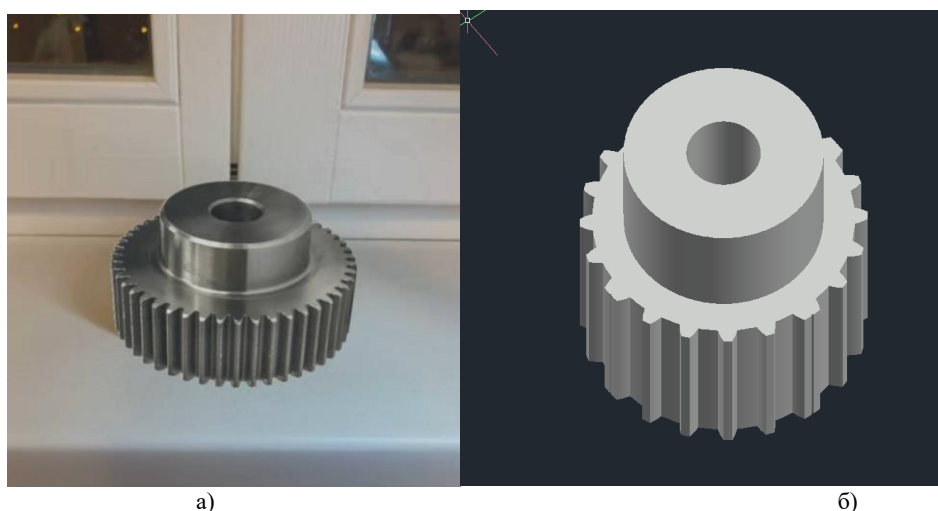


Рисунок 2 – Физический образец шестерни привода масляного насоса автомобиля ГАЗ-24 ранних выпусков (а) и 3D-модель детали, созданная методом обратного инжиниринга (б)

Созданная в процессе обратного инжиниринга 3D-модель физического образца детали является универсальной цифровой основой для её последующего воспроизводства различными технологическими методами. В зависимости от требуемых характеристик, материала и серийности, модель может быть адаптирована под конкретное производство. Например, для изготовления точной копии из металла возможно применение механической обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), что обеспечивает высокую точность геометрических параметров. На этапе проверки собираемости и кинематики узла эффективно используется 3D-печать из пластика (FDM или фотополимерная печать), позволяющая быстро получить прототип для контрольной сборки. Для получения готового металлического изделия сложной формы, которую невозможно или экономически нецелесообразно обрабатывать на станках, применяется аддитивное производство из металла. Таким образом, технология обратного инжиниринга позволяет воспроизводить детали, утратившие серийное производство, с точностью, достаточной для их практического применения.

Заключение. В ходе работы рассмотрен процесс обратного инжиниринга простой механической детали: шестерня привода масляного насоса автомобиля ГАЗ-24 ранних выпусков, и показаны этапы преобразования физического образца в цифровую 3D-модель.

Установлено, что обратный инжиниринг представляет собой многостадийную процедуру, включающую подготовку объекта, получение геометрических данных, их обработку и построение CAD-модели. Наиболее распространёнными способами получения размеров являются прямые измерения (точность 0,01–0,05 мм) и 3D-сканирование (до 0,02 мм), выбор которых определяется сложностью детали и требуемой точностью.

Исследование показало, что наибольшую практическую ценность обратный инжиниринг имеет именно для изделий, снятых с производства и не имеющих документации. На примере зубчатой детали продемонстрировано, что корректное восстановление теоретической геометрии обеспечивает возможность последующего изготовления и эксплуатации изделия. Следовательно, обратный инжиниринг можно рассматривать как эффективный инструмент решения проблемы дефицита запасных частей для устаревшего и уникального оборудования. Применение данной технологии позволяет поддерживать работоспособность техники без обращения к производителю, что имеет существенное практическое значение для промышленности, автосервисов и частных пользователей.

Список литературы

1. Карфидов, А. О. Обратный инжиниринг деталей машин и элементов конструкций. Лабораторные работы по 3D-сканированию и реверсивному инжинирингу (N 4671) : учебное пособие / А. О. Карфидов, М. Г. Наумова, И. Г. Морозова, И. А. Емельянов ; НИТУ МИСИС. – Москва : МИСИС, 2025. – 61 с. – URL: http://lib.msk.misis.ru/elib/view.php?id_abs=987784300 (дата обращения: 01.03.2026).
2. Кувишинов, Н. С. Инженерная и компьютерная графика: учебник / Н. С. Кувишинов, Т. Н. Скоцкая. – Москва: ИНФРА-М, 2016. – 318 с.
3. ГОСТ 13506-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые реечные мелко модульные. Допуски. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 31 с.

UDC 621.7/.9:004

REVERSE ENGINEERING OF A SIMPLE MECHANICAL PART: FROM PHYSICAL OBJECT TO 3D MODEL

Sukonkin V.V., Ostrovsky V.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Koshman V. D. — Master of Science, Senior Lecturer at the Department of ECG

Annotation. This study examines the reverse engineering process using a simple mechanical component as an example — the transformation of a physical object into a digital 3D-model. The relevance of this method is due to the need to restore parts whose production has been discontinued in the absence of technical documentation.

Keywords: reverse engineering, 3D-model, mechanical part