

УДК 004.942

Реверс - инжиниринг изношенных деталей: восстановление геометрии и параметров

Складнова Мария Сергеевна

Коваль Сергей Всеволодович

Ерофеев Михаил Николаевич (*научный руководитель*)

ИМАШ РАН, Москва, Россия

Представлен анализ методологических подходов к реверс-инжинирингу изношенных деталей с целью восстановления их геометрических параметров и эксплуатационных характеристик. Современные инструменты, включающие технологии трехмерного сканирования, CAD-моделирования и аддитивного производства, позволяют воссоздавать утраченные конструктивные элементы даже при отсутствии исходной конструкторской документации. Внедрение рассмотренных технологий позволит существенно сократить затраты на ремонт и техническое обслуживание, одновременно повысив надежность и срок службы восстановленных узлов и агрегатов.

Ключевые слова: *реверс-инжиниринг, 3D-сканирование, аддитивные технологии, компьютерное моделирование, CAD-моделирование*

Введение. Реверс-инжиниринг, или обратное проектирование, представляет собой процесс исследования готового изделия или системы с целью определения его конструктивных особенностей, принципов функционирования и технологических параметров для последующего воспроизведения, усовершенствования или адаптации к новым условиям эксплуатации. Данный подход применяется в различных отраслях промышленности и науки, где требуется восстановление утраченной технической документации, анализ конкурентной продукции или создание совместимых аналогов. Методы 3D-сканирования и компьютерного моделирования, применяемые в реверс-инжиниринге, позволяют с высокой точностью оцифровать изношенную деталь, выявить отклонения от первоначальных размеров и спроектировать ее цифровой аналог с учетом необходимых допусков. Это особенно важно для восстановления сложных поверхностей и прецизионных компонентов, где ручные замеры недостаточно точны.

Благодаря прогрессу в области программирования и систем автоматизированного проектирования (САПР) реинжиниринг широко используется в различных отраслях промышленности. Наиболее отчетливо взаимосвязь этих направлений прослеживается в принципах объектно-ориентированного программирования и проблемно-ориентированного проектирования. Использование реверс-инжиниринга совместно с технологиями лазерного сканирования и постобработки значительно упрощает процесс перепроектирования, испытаний и обновления конструкции в авиационной отрасли, судостроении и автомобилестроении. [1] Обычные методы измерений не всегда подходят

для подобных задач из-за сложной геометрии деталей. Технология реверс-инжиниринга наиболее востребована в случаях, когда необходимо срочно восстановить или воспроизвести деталь, но оригинальный производитель прекратил деятельность, изделие снято с производства, сроки поставки длительны или невозможны, а также при необоснованно завышенной стоимости исходного компонента [2].

Области применения. Реверс инжиниринг находит широкое применение в авиационной, автомобильной и медицинской промышленности [3]. В авиации, например, он используется для анализа и улучшения двигателей и аэродинамических компонентов, что способствует повышению безопасности и эффективности полетов. В автомобильной отрасли реверс-инжиниринг помогает разрабатывать новые компоненты и системы, улучшая топливную экономичность и экологические показатели автомобилей. В медицинской сфере технология востребована при создании индивидуальных протезов и имплантатов, точно повторяющих анатомические особенности пациентов на основе данных компьютерной томографии.

Этапы реверс-инжиниринга. Процесс обратного проектирования деталей представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, направленных на точное воссоздание цифровой модели физического объекта. На первом этапе осуществляется подготовка объекта исследования — деталь очищается от загрязнений, при необходимости демонтируется с оборудования, особое внимание уделяется сохранению геометрической целостности изношенных или поврежденных участков [4]. Подготовка изношенной детали к сканированию для обратного проектирования начинается с тщательной очистки поверхности от всех загрязнений, таких как масло, ржавчина, пыль и остатки смазки, если на поверхности есть коррозия, ее зачищают механическим способом. В случаях, когда деталь имеет значительные повреждения, сколы или утраченные фрагменты, их временно восстанавливают с помощью эпоксидного состава, пластилина или воска, чтобы приблизить форму к оригиналу перед сканированием.

Далее проводится выбор оптимального метода оцифровки, который зависит от размеров детали, требуемой точности и сложности геометрии — лазерные и оптические сканеры подходят для сложной геометрии, координатно-измерительные машины (КИМ) обеспечивают высокую точность, но работают медленно, а компьютерная томография (КТ) используется, если нужно проанализировать внутреннюю структуру детали.

Следующий этап — непосредственно процесс сканирования, при котором создается облако точек, максимально точно отражающее реальную геометрию объекта, включая все особенности поверхности [5]. Полученные данные обрабатываются в специализированных программах, где устраняются шумы, заполняются пропуски и создается полигональная модель [6]. Затем на основе этой модели выполняется реконструкция параметрической CAD-модели, которая может включать как точное воспроизведение исходной геометрии, так и внесение корректировок в изношенные зоны с учетом проект-

ных допусков и требований. Особое внимание уделяется анализу функциональных поверхностей и сопрягаемых элементов, где точность имеет решающее значение для последующей работоспособности детали [7].

После создания цифровой модели проводится ее верификация — сравнение с исходным объектом с использованием методов наложений и отклонений, что позволяет выявить и устранить возможные расхождения. На завершающем этапе подготовленная CAD-модель адаптируется под требования производства — выбираются оптимальные технологии изготовления (аддитивные методы, механическая обработка, литье), определяются допуски и материалы, при необходимости разрабатывается технологическая оснастка. Важно отметить, что современный реверс-инжиниринг часто включает этап оптимизации конструкции, когда на основе восстановленной модели вносятся улучшения, направленные на повышение эксплуатационных характеристик или снижение себестоимости производства. Весь процесс сопровождается документальным оформлением, включая создание чертежей, технических условий и производственных спецификаций, что обеспечивает возможность серийного воспроизводства восстановленной детали.

Заключение. Реверс-инжиниринг доказал свою высокую эффективность в восстановлении изношенных деталей, предлагая инновационный подход к ремонту и модернизации промышленного оборудования. Благодаря точному сканированию, цифровому моделированию и современным технологиям производства, обратное проектирование позволяет не только точно воспроизвести геометрию детали, но и оптимизировать ее конструкцию — усилить критические зоны, подобрать более износостойкие материалы или адаптировать под современные производственные стандарты. Это особенно важно для устаревшего или уникального оборудования, где традиционная замена деталей затруднена или экономически нецелесообразна.

Дальнейшее развитие технологий обратного проектирования, включая интеграцию с аддитивными технологиями и искусственным интеллектом, будет способствовать совершенствованию методов ремонта и продлению жизненного цикла оборудования в различных отраслях.

Литература

- [1] Буканова И.В., Михеева Т.А. Обоснование эффективности использования методов обратного инжиниринга при конструкторско-технологическом проектировании. *Транспорт. Горизонты развития. IV Междунар. науч.-пром. форум: тр.* Нижний Новгород, Волжский государственный университет водного транспорта, 2024, с. 108.
- [2] Omar A.S., Muhammad B.M., Salah A.S.M. Akl Modelling a gas turbine blade using reverse engineering. *Аллея науки*, 2023, vol. 1, no. 2 (77), pp. 3–17.
- [3] Anwer N., Mathieu L. From reverse engineering to shape engineering in mechanical design CIRP Annals. Manufacturing Technology, 2016, pp. 165–168. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.052>
- [4] Buonamici F.M. Carfagni R. Furferi L. Governi A. Lapini Y. Volpe Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2018, vol. 5, iss. 2, pp. 145–159.

- [5] Гришаев А.Н., Луцейкович В.И. Методика и практика 3D-сканирования объектов в задачах реверс-инжиниринга. 51-я *Международ. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов: матер.* Витебск, Витебский государственный технологический университет, 2018, т. 2, с. 309–311.
- [6] Петров А.Л., Баева Л.С., Петрова Н.Е., Кумова Ж.В. Применение технологии реверс-инжиниринга в судостроении. *Известия высших учебных заведений. Арктический регион*, 2020, № 1, с. 34–37.
- [7] Беляков А.А., Шулепов А.И. Проблемы практики реверс-инжиниринга космических аппаратов. *Решетневские чтения. XXV Международ. науч.-практ. конф.: матер.* Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021, ч. 1, с. 8–9.

Reverse engineering of worn parts: restoring geometry and parameters

Skladnova Maria Sergeevna

Koval Sergey Vsevolodovich

Yerofeyev Mikhail Nikolaevich (*scientific advisor*)

IMASH RAS, Moscow, Russia

The paper presents an analysis of methodological approaches to reverse engineering of worn parts in order to restore their geometric parameters and operational characteristics. Modern tools, including three-dimensional scanning, CAD modeling, and additive manufacturing technologies, make it possible to recreate lost structural elements even in the absence of initial design documentation. The introduction of these technologies will significantly reduce repair and maintenance costs, while increasing the reliability and service life of refurbished components and assemblies.

Keywords: Reverse engineering, 3D scanning, additive technologies, computer modeling, CAD modeling