

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

Д.А. Родимов¹, В.В. Кузнецов¹, А.Е. Якимов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара, rodimov_da@mail.ru

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, лопатка компрессора, 3D-сканирование, NX, поверхность по сечениям, анализ отклонений.

Представлена методика восстановления твёрдотельной модели лопатки компрессора по фасетному телу (STL), полученному методом 3D-сканирования. Работа выполнена в среде Siemens NX. Описаны основные этапы: импорт скана, построение опорных плоскостей и системы координат, перенос геометрии, нарезка сечений, построение сплайнов спинки и корытца, вписывание окружностей входной и выходной кромок, создание поверхности по сечениям и анализ отклонений. Достигнутая точность восстановления – в пределах 0,1 мм, что подтверждено анализом отклонений. Предложенная методика может быть использована для ремонта и модернизации лопаточных машин.

Лопатки компрессора двигателя в процессе эксплуатации получают повреждения (забоины и деформации). Для восстановления геометрии при ремонте или для создания цифровых двойников необходимо иметь точную 3D-модель. Прямое использование сканированных данных (фасетных тел) невозможно из-за шумов и дискретности. Цель работы – разработать методику реверс-инжиниринга лопатки по STL-модели с получением гладкой параметрической поверхности, пригодной для дальнейшего анализа (CFD, прочность).

Исходные данные – фасетное тело лопатки в формате STL, полученное с помощью 3D-сканера. Обработка выполнена в программном комплексе NX (роль «Расширенная»).

Процесс реверс-инжиниринга включает несколько последовательных этапов:

1. Подготовительный этап. Процесс обратного проектирования рекомендуется начинать с визуального осмотра детали, чтобы определить наиболее точные и ответственные поверхности, которые будут использоваться для базирования. Для лопатки базовыми являются торцевая и нижняя поверхности хвостовика.

2. Импорт и предварительная обработка данных. Выполняется импорт STL-файла. При необходимости проводится совмещение и склейка фасетных тел (если сканирование выполнялось по частям), а также анализ и исправление ошибок фасетной геометрии.

3. Базирование и центрирование. Строятся опорные плоскости по неповреждённым участкам хвостовика, создаётся система координат с началом в пересечении базовых кривых. Выполняется перенос геометрии в новую систему координат («СК в СК») с копированием исходной модели.

4. Получение сечений. Для лопатки компрессора необходимо построить не менее 5–6 сечений по высоте пера: на втулке, периферии и промежуточные. Плоскости должны располагаться так, чтобы избегать зон галтелей и эксплуатационных дефектов.

5. Построение сплайнов профиля. В эскизе каждого сечения вспомогательные кривые переводятся в разряд вспомогательных. Затем вручную строятся сплайны спинки и корытца с учётом кривизны: на участках большой кривизны точки сплайна располагаются чаще. Готовая кривая должна быть гладкой, без неоправданных изломов.

6. Вписывание кромок. Строятся окружности входной и выходной кромок с условием касательности к сплайнам. При необходимости сплайны продлеваются, а диаметр окружностей подбирается до визуального совпадения с фасетным телом. Построенные кривые фиксируются ограничениями.

7. Построение поверхности по сечениям. Выполняется команда «Поверхность по сечениям» с последовательным выбором всех сечений, выравниванием «По точкам» и созданием направляющих кривых на кромках. В диалоговом окне следует при необходимости увеличить допуск G0 (Position), чтобы поверхность замкнулась без разрывов.

8. Анализ точности. Сравнение полученной поверхности с исходным STL проводится командой «Анализ отклонений» с отображением цветовой карты и абсолютных значений отклонений. Типовой величиной допустимого отклонения для инженерных задач считается $\pm 0,1$ мм, что соответствует требованиям к геометрической точности авиационных деталей при ремонте.

Разработана и апробирована методика реверс-инжиниринга лопатки компрессора в Siemens NX, охватывающая полный цикл от импорта STL до построения параметрической поверхности с контролем точности. Методика базируется на общих принципах обратного проектирования и позволяет восстанавливать геометрию с точностью около 0,1 мм. Рекомендована для применения на ремонтных предприятиях и в задачах цифрового моделирования лопаточных машин.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, шифр проекта FSSS-2026-0005, «Фундаментальные проблемы диагностики сложных технических систем по динамическим и виброакустическим параметрам».

Список литературы

1. Нехорошев М.В. Методика реверс инжиниринга изделий в системе Siemens NX. – В сб.: Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 2023. – С. 275–276.

2. Архипов А.Н., Кретинин Г.В., Равикович Ю.А. и др. Автоматизированное построение параметрической модели рабочей лопатки вентилятора // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 4(86). – С. 65–73.

3. Шаблий Л.С. Реверс-инжиниринг компрессорного лопаточного профиля: построение средней линии и симметричного профиля // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3(34). – С. 47–52.

REVERSE ENGINEERING OF THE COMPRESSOR BLADE BASED ON 3D SCANNING RESULTS

Rodimov D.A., Kuznetsov V.V., Yakimov A.E.

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara,
rodimov_da@mail.ru

Keywords: reverse engineering, compressor blade, 3D scanning, surface through sections, deviation analysis, reconstruction accuracy.

The paper presents a reverse engineering methodology for a turboprop engine axial compressor blade based on a facet model obtained by 3D scanning. The work is performed in the Siemens NX environment. The key stages are considered: visual inspection of the part and selection of reference surfaces, import and processing of the STL model, construction of reference planes and a coordinate system, geometry repositioning, generation of cross-sections, construction of splines for the pressure and suction sides with curvature control, fitting of leading-edge and trailing-edge circles, creation of a smooth surface through cross-sections, and deviation analysis.

Typical 3D scanning accuracy values and methods for geometric deviation control using a color map are provided. It is shown that the achieved reconstruction accuracy does not exceed 0,1 mm, which meets the requirements of engineering analysis. The proposed methodology is suitable for repair, modernization, and creation of digital twins of blade machines.