ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 519.876.5

Исследование возможностей применения Siemens NX для реверс-инжиниринга авиационных деталей

Н.Д. Клеймёнов[1], С.Н. Шевцов[1,2]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] ФИЦ Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
Реверс-инжиниринг имеет важное значение для авиационного производства, особенно в условиях перехода от бумажных технологий к цифровым. Программное обеспечение Siemens NX предоставляет инструменты реверс-инжиниринга, однако в открытых источниках крайне мало примеров их практического применения для создания CAD-моделей авиационных деталей. Цель настоящей работы — исследовать возможность применения Siemens NX для решения подобных задач. В экспериментальной части исследования проводился реверс-инжиниринг трех авиационных формообразующих оснасток с последующим анализом отклонений от 3D-скана и исходной CAD-модели. В практической части планируется построить CAD-модели трех других авиационных оснасток, для которых исходная модель отсутствует. В ходе работы разработана методика реверс-инжиниринга и созданы CAD-модели оснасток. Результаты измерений отклонений свидетельствуют об успешном выполнении реверс-инжиниринга, за исключением отдельных зон с повышенными отклонениями, которые также были проанализированы. Доработка поверхности стандартными инструментами Siemens NX позволила повысить точность построений. Результаты исследования позволяют утверждать, что система Siemens NX применима для реверс-инжиниринга авиационных деталей.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, Siemens NX, обзор программных инструментов, методика реверс-инжиниринга, обзор ПО реверс-инжиниринга

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников кафедры «Авиастроение» Донского государственного технического университета за помощь в подготовке и проведении исследования.

Для цитирования. Клеймёнов Н.Д., Шевцов С.Н. Исследование возможностей применения Siemens NX для реверс-инжиниринга авиационных деталей. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(4):97–103.

Studying the Potential of Siemens NX for Reverse Engineering of Aircraft Parts

Nikita D. Kleymenov[1], Sergey N. Shevtsov[2]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] FRC Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
Reverse engineering is an important part of aircraft manufacturing, especially in the context of transition from the paper-based to digital technologies. Siemens NX software provides reverse engineering tools, however, very few examples of their practical application for creation of CAD models of aircraft parts are available in the open sources. The aim of the article is to study the feasibility of using Siemens NX for solving the above mentioned tasks. In the experimental part of the research, reverse engineering of three aircraft forming toolings was performed, with subsequent analysis of deviations thereof from the 3D scan and the baseline CAD model. In the practical part of the study, creation of CAD models of three other aircraft forming toolings, which have no baseline models, is foreseen. In the frame of the research, reverse engineering methodology was developed and CAD models of the toolings were created. Measurement of deviations ascertains successful result of reverse engineering, except for single areas with increased deviations, which were also analysed. Refining the surface using standard Siemens NX tools enabled improving the accuracy of the design. The results of the study make it possible to apply Siemens NX system for reverse engineering of aircraft parts.

© Клеймёнов Н.Д., Шевцов С.Н., 2026

Keywords: reverse engineering, Siemens NX, overview of software tools, reverse engineering methodology, overview of reverse engineering software

Acknowledgements. The authors would like to thank the staff of the Aircraft Engineering Department of Don State Technical University for their assistance in preparing and conducting the research.

For Citation. Kleymenov ND, Shevtsov SN. Studying the Potential of Siemens NX for Reverse Engineering of Aircraft Parts. *Young Researcher of Don*. 2026;11(4):97–103.

Введение. Реверс-инжиниринг авиационных деталей является актуальной темой для технологической и конструкторской проработки на предприятиях авиастроения [1]. Под ним понимается технология создания электронной CAD-модели на основе существующих готовых деталей [2]. Применение электронных моделей существенно упрощает подготовку производства [3] и ускоряет изготовление деталей. Однако внедрение цифровых технологий на ряде авиационных предприятий началось лишь несколько лет назад, прежде всего при запуске новых изделий. При этом документация на изделия старой разработки остается неоцифрованной: конструкторская документация представлена исключительно бумажными чертежами, а технологические задачи решаются с помощью натурных макетов и шаблонов.

Несмотря на широкое развитие 3D-сканирования и реверс-инжиниринга, данная технология чаще применяется в общем машиностроении [4], где детали имеют простые поверхности и в большинстве случаев состоят из примитивов (плоскости, цилиндры, конусы, сферы). Авиационные детали, напротив, отличаются отсутствием базовых поверхностей [5], значительной площадью криволинейных поверхностей, несущих теоретический аэродинамический контур изделия, малой жесткостью и тонкостенностью. Поэтому при их реверс-инжиниринге требуются нестандартные подходы к построению поверхностей и специальная методика.

Для проведения работ по реверс-инжинирингу целесообразно применять специализированное программное обеспечение [6]. Как правило, специалисты отдают предпочтение программам, созданным непосредственно для этих целей: Geomagic Design X [7], PointShape Design [8], EXModel [9], QUICK SURFACE [10]. Однако помимо отдельных продуктов существуют модули и инструменты для реверс-инжиниринга в профессиональных CAD-системах, таких как Siemens NX [11], SolidWorks [12], Autodesk Inventor [13]. В частности, Siemens NX располагает ограниченным набором инструментов для реверс-инжиниринга, но предоставляет широкие возможности для создания и редактирования параметрических поверхностей, последующей CAM/CAE-обработки готовой детали и интеграции электронной модели в PLM-систему. Поэтому выбор данной программы для реверс-инжиниринга дает преимущество специалисту, уже обученному CAD-моделированию в этой среде. Это избавляет от необходимости осваивать новую программу, а также сокращает финансовые затраты на обучение и приобретение лицензий на дополнительное программное обеспечение. Аналогичная логика применима и к другим CAD-системам в зависимости от того, какая из них используется в организации.

Существует ряд статей, записей в блогах [14] и на форумах, а также руководство разработчиков Siemens NX по выполнению реверс-инжиниринга. Имеющиеся материалы содержат общее описание процесса [15] и инструментов, доступных в системе [16]. Однако особенности применения данного программного обеспечения к авиационным деталям и средствам технологического оснащения не раскрыты. Цель настоящей работы — применение инструментов CAD-системы Siemens NX для реверс-инжиниринга авиационных деталей, анализ полученных моделей и определение возможности полномасштабного использования программы в этом направлении на предприятиях.

Основная часть. В рамках исследования проводились практические попытки выполнения реверс-инжиниринга. Использовалась система Siemens NX версии 2406 с русскоязычным интерфейсом.

В начале работы было детально изучено руководство по реверс-инжинирингу (раздел Reverse Engineering), представленное разработчиком. Данный раздел описывает инструменты, доступные во вкладке «Реверс-инжиниринг»:

– координатная плоскость, ось, система координат;
– эскиз;
– точка, прямая, дуга, сплайн;
– аппроксимированная кривая;
– проецирование кривой, кривая сечения;
– переместить объект;
– набор точек в набор точек;
– несколько путей;
– лучшая оптимизация;
– обнаружить исходные;
– кривизна фасетного тела;

– закраска фасетного тела;

– быстрое создание поверхности;

– разместить поверхность;

– анализ отклонений.

Кроме того, приведены примеры использования инструментов, структура процесса реверс-инжиниринга и подробное описание каждого элемента управления.

Работа выполнялась в два этапа. На первом этапе использовались три авиационные детали, имеющие исходные электронные CAD-модели. Выбранные детали представляют собой формообразующую оснастку, обеспечивающую изготовление и контроль геометрии элементов типа «обшивка», устанавливаемых на вертолетную технику. Конструктивно они состоят из формообразующей поверхности с припуском и взаимно перпендикулярных плоских граней. Формообразующая (рабочая) поверхность несет теоретический контур будущего изделия и является поверхностью двойной кривизны, описываемой математически сплайнами малой кривизны.

На рабочей поверхности деталей имеются риски и разметка, обозначающие границы детали и центры отверстий, необходимых при дальнейшей механической обработке для обрезки припуска и выполнения отверстий. При 3D-сканировании и реверс-инжиниринге эти элементы обязательно должны быть смоделированы в CAD-модели, поскольку при повторном изготовлении с применением станков с ЧПУ вся разметка также будет выполняться на станках с ЧПУ. Кроме того, граница обрезки позволяет определить, какая часть рабочей поверхности требует максимальной точности, а какая является технологическим припуском с пониженными требованиями.

Физические детали, использованные для получения 3D-скана, изготовлены из древесины фрезерованием на станке с ЧПУ. Габариты каждой детали составляют порядка 1500 × 700 × 300 мм. Разметка прорисована черным маркером для отображения на 3D-скане.

На втором этапе использовались три аналогичные детали, не имеющие исходных электронных моделей, — имелся только бумажный чертеж и готовая деталь. Они также представляют собой формообразующую контрольную оснастку с криволинейной рабочей поверхностью и плоскими взаимно перпендикулярными гранями. На рабочей поверхности присутствуют риски и разметка, обведенные черным маркером. Физические образцы для 3D-сканирования выполнены из алюминиевых и стальных сплавов, их габариты составляют примерно 1700 × 700 × 700 мм.

План исследования предусматривал экспериментальное и практическое выполнение реверс-инжиниринга описанных деталей с применением инструментов Siemens NX.

Экспериментальный этап проводился с первыми тремя деталями, имеющими исходные электронные модели. Его суть заключалась в изучении реальных возможностей программного обеспечения и создании новой электронной модели по 3D-скану физической детали. Затем выполнялся анализ отклонений построенной модели от полигонального 3D-скана и исходной CAD-модели для оценки точности работы.

В ходе экспериментальной части были апробированы несколько методов создания рабочей поверхности:

1. Рассечение 3D-скана набором параллельных плоскостей с последующим созданием линий пересечений и моделированием новой параметрической поверхности по сечениям.

2. Создание параметрических поверхностей на основе указанных участков полигонального 3D-скана с дальнейшей обрезкой и сшивкой в единую поверхность.

3. Обрисовка периметра поверхности сплайнами и построение сетки кривых на полигональной модели с последующим созданием параметрической поверхности по сегментам.

Для построения боковых плоскостей применялись инструменты обнаружения исходных и размещения примитивных поверхностей (плоскостей).

Таким образом, в эксперименте были задействованы все инструменты, предлагаемые для создания кривых и поверхностей при реверс-инжиниринге. Следующей частью экспериментального этапа стало сравнение с 3D-сканом и исходной CAD-моделью. Поскольку новая модель строилась на основе 3D-скана, анализ отклонений между ними не вызывал затруднений. Однако исходная CAD-модель была построена в другой системе координат, поэтому потребовалось выравнивание и совмещение, для чего использовались инструменты конструкции, выравнивания и проверки.

Заключительной частью стал перенос линий разметки и рисок. Благодаря обводке черным цветом перед 3D-сканированием на полученном скане имеются разрывы поверхности в соответствующих местах. Полупрозрачное отображение каждой поверхности позволило совместить скан и созданную поверхность, а затем построить кривые на поверхности модели, задавая точки прохождения сплайна в местах разрывов сканированной поверхности.

В ходе экспериментальной части изучено практическое применение и особенности каждого инструмента системы Siemens NX для реверс-инжиниринга, проанализирована точность построения, после чего выполнена доработка модели. Для доработки применялись стандартные инструменты анализа, создания кривых и поверхностей, имеющиеся в Siemens NX. В проблемных зонах анализировалась кривизна линии сечения, и по границам нетипичного искривления графика выполнялась обрезка участка поверхности с последующей зашивкой для повышения гладкости. Также обрезались участки искривления по периметру, затем моделировались дополнительные опорные кривые и выполнялась зашивка.

Практический этап реализуется со вторыми тремя деталями, не имеющими исходных электронных моделей. Его суть — применение Siemens NX для реверс-инжиниринга и создание электронной конструкторской документации на детали для последующего изготовления на предприятии.

По результатам экспериментального этапа был определен алгоритм построения авиационных поверхностей и подобраны наиболее подходящие инструменты, что обеспечило успешное построение моделей на практическом этапе.

В ходе экспериментальной части рабочая поверхность создавалась тремя способами. Метод построения поверхности отдельными сегментами на основе фасетной модели приводит к низкой точности: в допуске ±0,25 мм от исходного скана находится лишь 36 % поверхности. Способ рассечения 3D-скана набором плоскостей и создания поверхности по сечениям обеспечивает значительно более высокую точность: в допуске ±0,025 мм находится 20 % поверхности, а в допуске ±0,25 мм — 88 %, то есть почти вся площадь (рис. 1).

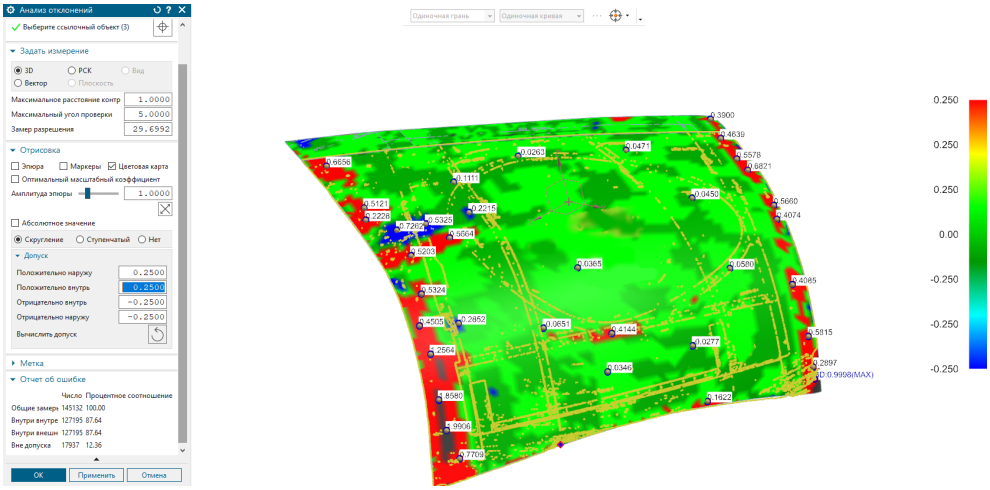


Рис. 1. Анализ отклонений построенной поверхности от 3D-скана с допуском ±0,25 мм

Аналогичные результаты получаются при использовании способа с моделированием линий кривых на основе полигонального 3D-скана и построением поверхности по сетке кривых. При анализе отклонений от исходной CAD-модели погрешность больше — в допуск ±0,25 мм попадает 79 % (рис. 2), в допуск ±0,5 — до 99 % поверхности.

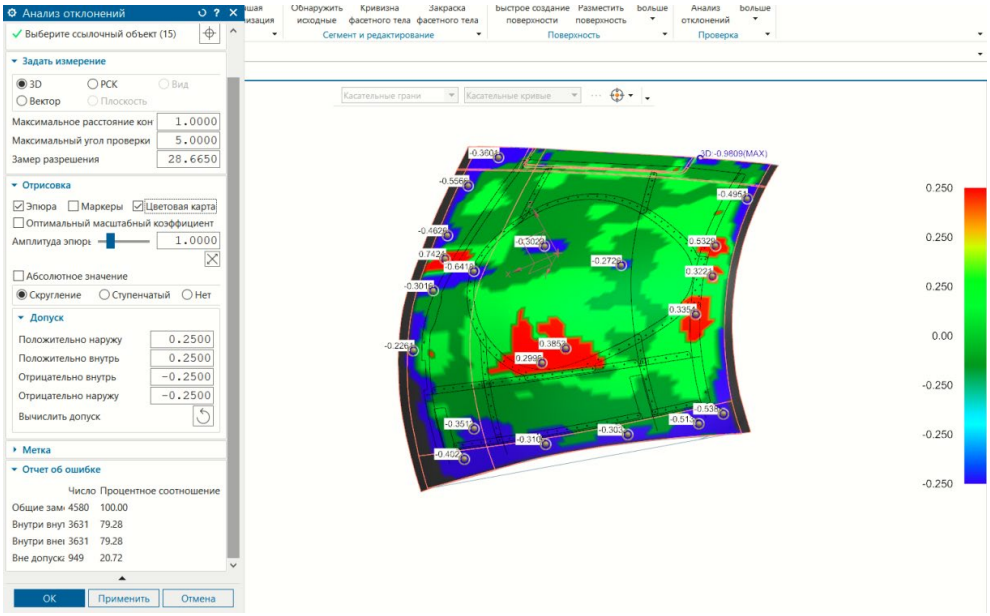
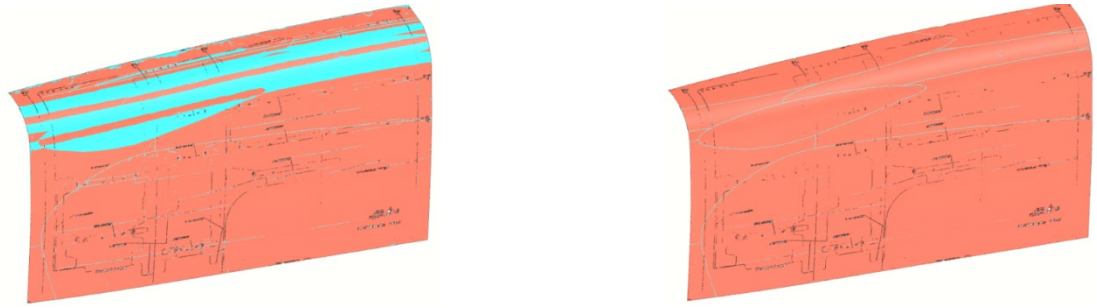


Рис. 2. Анализ отклонений построенной поверхности от исходной CAD модели с допуском ±0,25 мм

При создании боковых поверхностей использовалось обнаружение исходных поверхностей, однако эта функция распознала почти всю поверхность как плоскости (рис. 3), хотя рабочая поверхность представляет собой поверхность двойной кривизны во всех точках.



а) *б)*

Рис. 3. Обнаружение примитивных поверхностей: *а* — минимальная чувствительность кривизны; *б* — максимальная чувствительность кривизны

В процессе переноса линий разметки и рисок выяснилось, что 3D-сканер не фиксирует всю нанесенную разметку в полном объеме — точнее, не формирует разрывы поверхности на черных участках. Кроме того, появляется большое количество лишних разрывов, не относящихся к разметке. По этим причинам удалось смоделировать лишь часть разметки, однако точность повторения кривых на исходной CAD-модели достаточно высока — в допуск ±0,5 мм попадает 97 % (рис. 4).

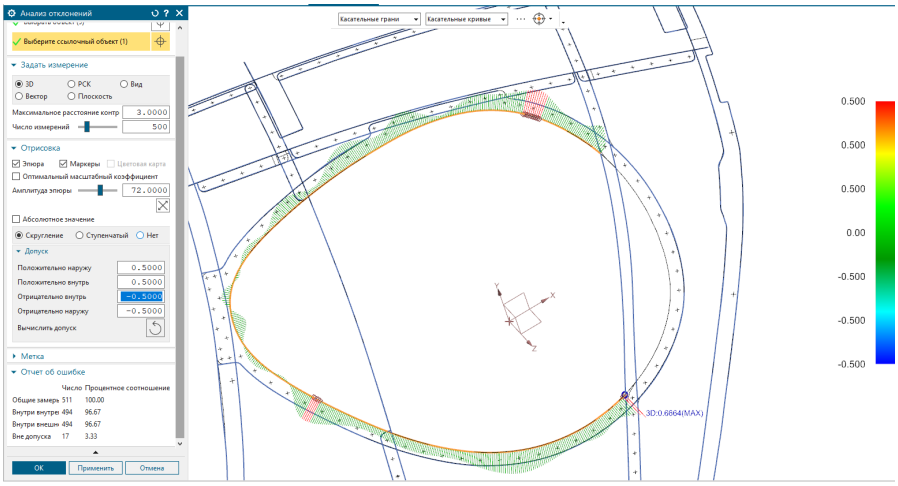
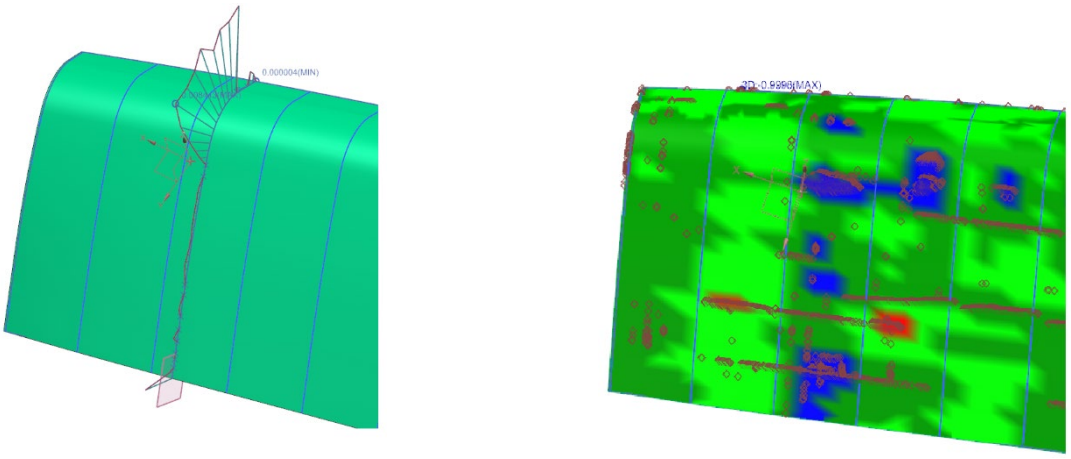


Рис. 4. Анализ отклонений созданных линий разметки от кривых на исходной CAD модели

В некоторых зонах построенных поверхностей наблюдались отдельные участки повышенного отклонения от 3D-скана. Через такую зону было выполнено сечение и построен график кривизны по всей его длине. На рис. 5 б синим цветом выделены области отклонений. На рис. 5 а заметно, что в этих областях происходит резкое изменение величины кривизны.



а) *б)*

Рис. 5. Анализ проблемной зоны: *а* — эпюра кривизны сечения; *б* — цветовая карта отклонений

В ходе построения были опробованы все доступные инструменты. Наиболее полезным при восстановлении сложных поверхностей авиационных деталей оказался инструмент «Быстрое создание поверхности» в режиме импорта кривых. Такое построение обеспечивает максимальную точность — по результатам анализа отклонений можно утверждать, что средняя погрешность реверс-инжиниринга составляет ±0,25 мм при габаритах детали более 1000 мм, что соответствует классу допуска K по стандарту ISO 2768-2.

При анализе отклонений построенной поверхности от исходной CAD-модели отклонения оказались больше, что, вероятно, объясняется погрешностью выравнивания из-за неточного совмещения систем координат 3D-скана и исходной модели. Поэтому увеличение отклонения с 0,25 до 0,5 мм допустимо считать погрешностью, не связанной с реверс-инжинирингом. Аналогичная ситуация наблюдается и при моделировании линий разметки, однако их можно сравнить исключительно с исходной CAD-моделью, поскольку на 3D-скане они отсутствуют. Следовательно, оценить погрешность относительно 3D-скана возможно лишь косвенно — через зависимость погрешностей поверхностей относительно скана и исходной модели.

Инструменты обнаружения и создания примитивных поверхностей оказались неэффективны при моделировании авиационных деталей типа «обшивка», что связано с отсутствием элементов, состоящих из таких поверхностей. Практически вся поверхность детали представляет собой сложную поверхность двойной кривизны, которую необходимо моделировать иными методами. Siemens NX отличается широким набором инструментов для работы с подобными поверхностями и успешно справляется с их построением.

Анализ кривизны сечения показывает, что зоны отклонений формируются в местах резкого изменения величины кривизны. При этом ключевое значение имеет не абсолютное значение кривизны, а скорость его изменения. Таким образом, зона отклонений возникает там, где несколько участков новой поверхности, воспроизводящих исходную, имеют различную кривизну в точке соединения. Для решения этой проблемы следует моделировать поверхность, непрерывную по третьей производной (G3), однако возможна и иная ситуация — ошибочное расположение точки соединения участков, сместившейся в процессе 3D-сканирования и искажающей все построения.

Заключение. В процессе исследования проведены анализ и практическая отработка всех инструментов, предлагаемых программным обеспечением Siemens NX для реверс-инжиниринга. В первой части работы смоделированы CAD-модели трех авиационных оснасток тремя способами и выполнен анализ отклонений модели от 3D-скана. В результате определен наиболее простой и точный способ построения — создание сетки кривых с последующим формированием поверхности по сетке на основе 3D-скана. При использовании данного способа отклонения минимальны и находятся в допуске ±0,25 мм на длине более 1000 мм. При этом часть инструментов («Размещение поверхности свободной формы», обнаружение исходных) оказались невостребованными для реверс-инжиниринга авиационных деталей.

В ходе экспериментальной части были определены методика и наиболее подходящие инструменты реверс-инжиниринга, что позволило успешно выполнить моделирование трех следующих оснасток, не имеющих исходной CAD-модели, — а это и составляет ключевую задачу всей технологии реверс-инжиниринга.

Таким образом, Siemens NX успешно решает задачи реверс-инжиниринга авиационных деталей. Качество построения поверхности напрямую зависит от количества опорных кривых в сетке и последующей работы по устранению проблемных зон. Главным недостатком Siemens NX является низкая скорость обработки полигональных моделей, что обусловлено изначальным позиционированием данного программного обеспечения как системы для работы с CAD-моделями. Программы, специально разработанные для полигональных моделей, значительно быстрее и легче выполняют операции с 3D-сканом. Преимуществом Siemens NX служит его распространенность среди специалистов конструкторских бюро и всесторонняя интеграция с другими производственными системами (станки с ЧПУ, PLM-системы, иные CAD-системы).

Данное исследование доказывает, что при использовании Siemens NX специалисту не требуется осваивать дополнительное программное обеспечение — знакомая система вполне позволяет решать задачи реверс-инжиниринга уже имеющимися инструментами.

Список литературы

1. Udroiu R. Research Regarding Reverse Engineering for Aircraft Components. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering 2016 (CoSME'16). MATEC Web of Conferences. Volume 94.* EDP Sciences; 2017. P. 01012. https://doi.org/10.1051/matecconf/20179401012

2. Aqeel AB, Aziz MI, Zaman UKU, Aafaq N. *Reverse Engineering: Past, Present, and Future Prospects. Handbook of Manufacturing Systems and Design*. CRC Press; 2023. 34p. https://doi.org/10.1201/9781003327523-19

3. Абрамян К.В., Помпеев К.П., Тимофеева О.С., Яблочников Е.И. Технологическая подготовка производства деталей на станках с ЧПУ с использованием перестраиваемых 3d-моделей операционных заготовок. *Металлообработка*. 2020;4(118):50–59. https://doi.org/10.25960/mo.2020.4.50

4. Confalone G, Smits J, Kinnare T. *3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction.* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2023. 224p. https://doi.org/10.1002/9781119758532

5. Borowska A. Aircraft Parts and Their Functions. In book: *English for Aeronautical Communication.* Routledge; 2025. P. 61–66. https://doi.org/10.4324/9781003431183-8

6. Manaqib AZ, Salman SW. Reverse Engineering Application Instruments and Code Reliability: A Comparative Study of Tools. In book: Shafik M, Case K (Eds.). *Advances in Transdisciplinary Engineering. Volume 15: Advances in Manufacturing Technology XXXIV.* IOS Press; 2021. P. 53–63. https://doi.org/10.3233/ATDE210012

7. 7. Любовский К. Знакомство с 3D-сканированием. Реверс-инжиниринг в Geomagic Design X. URL: https://vmasshtabe.ru/blog/znakomstvo-s-3d-skanirovaniem (дата обращения: 25.03.2026).

8. Чехович А. Реверс-инжиниринг – в ваших руках: демонстрация ПО PointShape Design. URL: https://blog.iqb.ru/pointshape-design-demonstration (дата обращения: 10.01.2026).

9. Соколова С. Программное обеспечение для реверс-инжиниринга Shining EXModel и EXModel Pro. URL: https://globatek.ru/blog/reviews/soft-exmodel (дата обращения: 30.03.2026).

10. Tang P. *Q&A with Quicksurface Inventor – Kostadin Vrantsaliev.* URL: https://gomeasure3d.com/blog/questions-answers-quicksurface-3d-reverse-engineering-software/ (дата обращения: 29.03.2026).

11. Усмонов Б.Ш., Дадабоева Д.И., Валиева З.Т. NX – это интегрированное решение для проектирования продуктов, разработка и производство. *Scientific progress*. 2021;2(1):825–834.

12. Yousif Mohamad. *How to Use SolidWorks for Reverse Engineering.* URL: https://www.thesolidworksexpert.com/post/how-to-use-solidworks-for-reverse-engineering (дата обращения: 26.03.2026).

13. Debnath B, Pourfarash Z, Ghorpade B, Raman S. Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review. *Metrology*. 2025;5(4):66. https://doi.org/10.3390/metrology5040066

14. Нехорошев М. Реверс инжиниринг изделий в Siemens NX от «А» до «Я». URL: https://connective-plm.com/blog/reversotido (дата обращения: 26.03.2026).

15. Cross J, Chikofsky EJ. Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy. *IEEE Software*. 1990;7(1):13–17. https://doi.org/10.1109/52.43044

16. Varady T, Martin RR, Cox J. Reverse Engineering of Geometric Models—An Introduction. *Computer-Aided Design.* 1997;29(4):255–268.

Об авторах:

Никита Дмитриевич Клеймёнов, магистрант кафедры «Проектирование и производство летательных аппаратов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, ybr.rk@mail.ru

Сергей Николаевич Шевцов, доктор технических наук, профессор кафедры «Авиастроение» Донского государственного технического университета, член совета ЮНЦ РАН (344006, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ResearcherID, ORCID, ScopusID, aeroengdstu@list.ru

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nikita D. Kleimenov, Master's Degree Student of the Aircraft Design and Production Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, ybr.rk@mail.ru

Sergey N. Shevtsov, Dr.Sci.(Engineering), Professor of the Department of Aircraft Engineering, Don State Technical University; Member of the Council of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (41, Chekhov Ave., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation), ResearcherID, ORCID, ScopusID, aeroengdstu@list.ru

Conflict of interest statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.