

ПОСТРОЕНИЕ 3D МОДЕЛЕЙ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В САД-СИСТЕМЕ ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

© 2017

- А. Н. Архипов** кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
anarkhipov.48@mai.ru
- Ю. А. Равикович** доктор технических наук, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Конструкция и проектирование двигателей»;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
yurav2@yandex.ru
- И. М. Федоров** кандидат технических наук, ведущий инженер научно-исследовательского отдела;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
ilyafyodorov@yandex.ru
- Д. П. Холобцев** начальник научно-исследовательского отдела;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
nio203_mai@mai.ru

Проведён обзор методик контрольно-измерительных мероприятий (КИМ) и проведена оценка возможности их применения для обмера лопатки вентилятора и построения 3D модели лопатки вентилятора с учётом реальных отклонений профиля пера. Рассмотрены различные составляющие отклонений геометрии лопатки от номинальной. Приведена методика построения модели лопатки по данным КИМ в САД-системе с учётом производственных отклонений профиля пера готовых лопаток. Для реализации возможности деформирования номинальной модели по данным КИМ, номинальная модель пера была воссоздана с учётом расположения измеряемых сечений. Рассмотрен вопрос о добавлении к модели измеренного профиля замка, кромок и периферийной области пера. Проведена оценка влияния отклонений профиля вне проточной части на прочность. Была создана модель с максимально и минимально возможными отклонениями от номинала и её расчётные перемещения и собственные частоты были сопоставлены с номинальными. Выбрано направление дальнейшей работы по определению наиболее эффективного набора геометрических параметров для проведения робастной оптимизации.

Газотурбинный двигатель; вентилятор; лопатка; контрольно-измерительные мероприятия; модель; САД-система; робастная оптимизация.

Цитирование: Архипов А.Н., Равикович Ю.А., Федоров И.М., Холобцев Д.П. Построение 3D моделей лопаток вентилятора газотурбинного двигателя в САД-системе по данным контрольно-измерительных мероприятий // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 3. С. 7-16. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-7-16

Введение

Мировой рынок регионально-магистральных авиаперевозок находится в состоянии стабильного роста. Для получения конкурентных преимуществ на этом рынке двигатель регионального пассажирского самолёта должен отвечать высочайшим требованиям экономичности и надёжности. В свою очередь, одним из ключевых узлов двига-

теля, оказывающим влияние на эти факторы, является вентилятор. Лопатки вентилятора проектируются на основе многокритериальной оптимизации и обладают профилем высокой сложности (рис. 1).

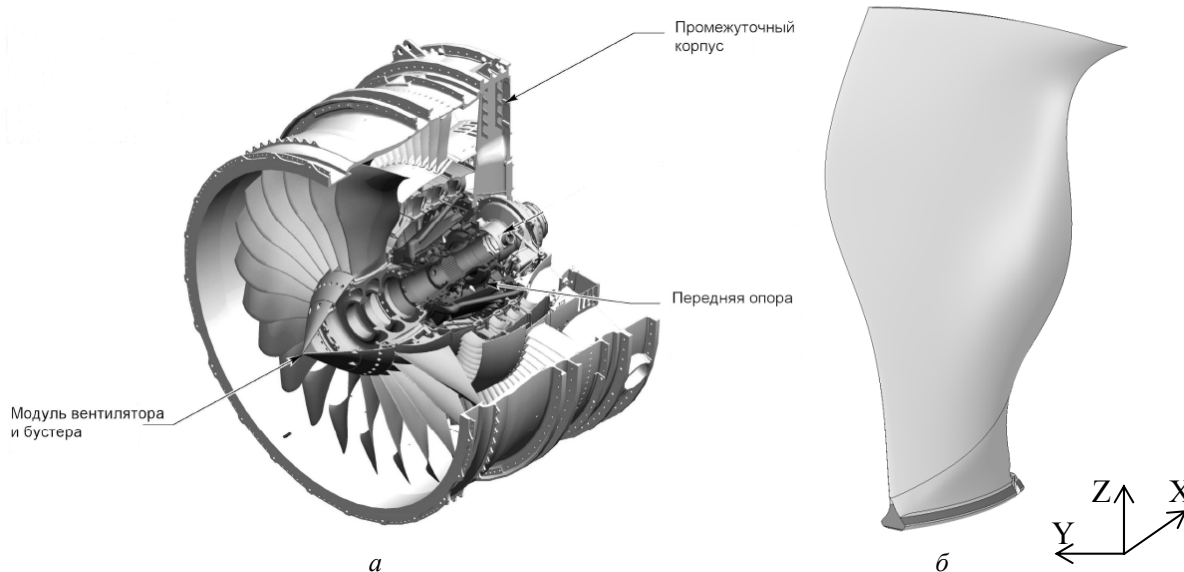


Рис. 1. Входное устройство с модулем вентилятора и бустера двигателя российского регионального самолёта [1] (а); общий вид вентиляторной лопатки (б)

Применяемая при проектировании оптимизация лопатки вентилятора зачастую не учитывает производственных и режимных отклонений, делает лопатку вентилятора неустойчивой к различным производственным факторам (геометрическим отклонениям формы профиля), а также изменению режима работы относительно номинального. Проведение робастной многокритериальной оптимизации [2;3] конструкции лопатки вентилятора и комплектация лопаток с учётом фактических геометрических параметров позволит решить данную проблему и добиться стабильно высокого уровня аэродинамических и прочностных характеристик.

Необходимым условием проведения робастной оптимизации лопаток вентилятора является расчёт их аэродинамических и прочностных характеристик с учётом производственных отклонений. В силу высокой сложности геометрии пера лопатки вентилятора такой расчёт должен проводиться численными методами газовой динамики и конечных элементов в трёхмерной (3D) постановке. Наилучшим способом получения конкретной реализации производственных отклонений являются контрольно-измерительные мероприятия, проводимые при производстве лопатки. В связи с этим возникает практическая задача построения 3D моделей лопатки вентилятора по данным КИМ в САД-системе.

Методики КИМ и их применение для обмера лопатки вентилятора

Для контроля геометрических параметров изготовленных деталей существует широкий спектр методов, использующих различные измерительные принципы [4;5]. Методы подразделяются на бесконтактные, такие как оптическое сканирование, и контактные. Использование контактных методов, в частности – координатно-измерительных машин, очень распространено при производстве лопаток газотурбинных двигателей в силу высокой точности измерения [5].

Настоящая работа опирается на результаты обмера лопатки вентилятора на координатно-измерительной установке портального типа Coord3 Hera NT [6].

Для построения 3D модели лопатки используются результаты финишных КИМ, выполненных после завершения всех этапов производства лопатки. Финишные КИМ заключаются в обмере пера лопатки на Coord3 Hera NT и ряде дополнительных измерений. Помимо получения данных для построения модели лопатки, финишные КИМ также нужны для проверки соответствия геометрии произведённой лопатки производственным допускам. Для этого при измерениях необходимо иметь информацию о номинальной геометрии и точно позиционировать измеряемую лопатку в пространстве.

Сведения о номинальной геометрии во всей совокупности лучше всего предоставляет номинальная САД 3D модель лопатки. Она необходима как для определения отклонений геометрии, так и как основа для построения 3D модели реальной лопатки.

Для позиционирования лопатки в координатно-измерительной машине применяется метод установки по трём поверхностям замка, которые определяют вертикальное (Z) и осевое (X) положение лопатки, и точке на пере, определяющей положение лопатки в поперечном направлении (Y) (рис. 1, б).

Системы координат, в которых построена номинальная САД модель и проводятся КИМ, могут не совпадать. Поэтому для сравнения с номинальными измеренные координаты каждой точки должны быть преобразованы в систему координат номинальной модели.

Измерение геометрии реальной лопатки на Coord3 Hera NT заключается в обмере профилей набора сечений пера. Пример расположения сечений показан на рис. 2.

В каждом сечении координатно-измерительная машина фиксирует положение нескольких десятков точек на спинке и корыте лопатки.

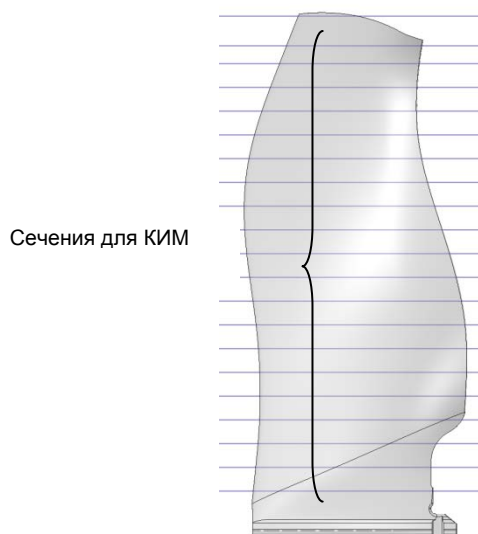


Рис. 2. Сечения лопатки вентилятора для проведения КИМ

Проблематике измерений на координатно-измерительных машинах сложных поверхностей, в том числе поверхностей лопаток газовых турбин, посвящены многие работы, например [5; 7-9]. Отклонения геометрии лопатки от номинальной имеют различные составляющие, показанные на рис. 3.

Допуски на каждый тип отклонения формулируются отдельно, притом наиболее жёсткие требования применяют к отклонениям формы профиля. Допуски подразделяются на допуски по смещению профиля в плоскости сечения (dx , dy), поворот профиля вокруг центра тяжести $d\alpha$ и локальное отклонение профиля от номинальной формы ds . На практике, при измерении реального положения профиля сечения лопатки, отдельные составляющие отклонения геометрии от номинальной неизвестны. Для их опреде-

ления проводится процедура припасовки измеренной геометрии к номинальной [5]. Суть процесса припасовки заключается в поиске таких смещений и поворота сечения, которые обеспечивали бы минимум суммарных отклонений формы профиля.

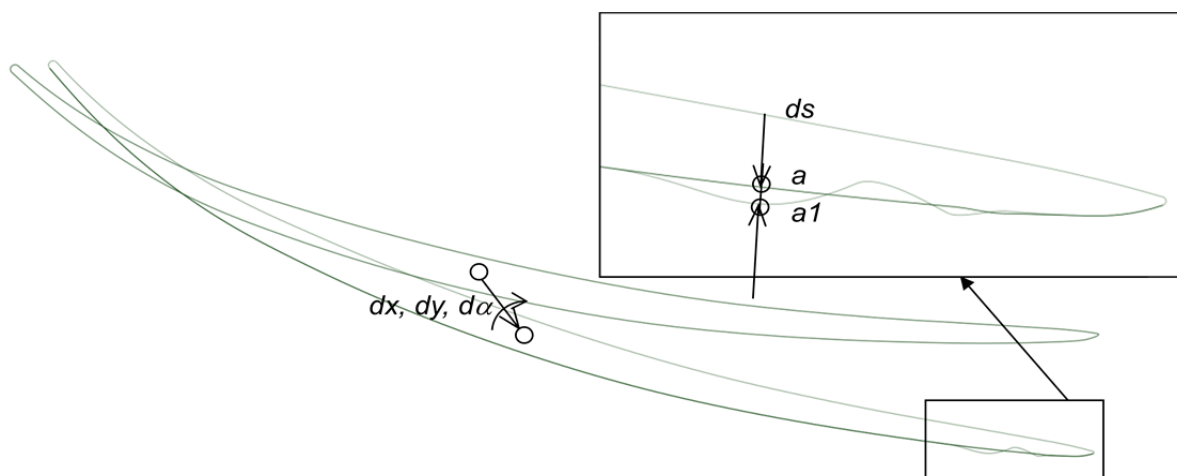


Рис. 3. Отклонения реального профиля от номинальной модели

Классическим алгоритмом, позволяющим решить задачу припасовки, является итеративный алгоритм ближайших точек (ICP) [5]. Реализация данного алгоритма присутствует в программном обеспечении координатно-измерительной машины Coord3 Hera NT.

Таким образом, после припасовки каждой точке замеренного профиля a с координатами (x_a, y_a, z_a) лопатки ставится в соответствие точка номинальной геометрии $a1$ с координатами (x_{a1}, y_{a1}, z_{a1}) , так что

$$a = R(a1 + dsn + dP)^T, \quad (1)$$

где dP – вектор припасовки в плоскости сечения $(dx, dy, 0)$; $R = R(da)$ – матрица поворота в плоскости сечения; n – нормаль к линии профиля в точке $a1$; T – знак транспонирования матрицы.

Как отмечается в работах [5;9], определение отклонений геометрии входной и выходной кромок представляет собой особенно сложную задачу. Это утверждение верно даже для высокоточных контактных координатно-измерительных машин. В силу этого на данном этапе для реальных лопаток вентилятора двигателя регионального пассажирского самолёта обмер кромок не проводился.

Таким образом, результатом КИМ являются:

- данные по припасовке (смещения в плоскости припасовки и углы) для ряда заранее заданных сечений пера (рис. 2);
- данные по отклонениям точек замеренного профиля по нормали от номинального профиля. Эти данные доступны для точек спинки и корыта лопатки, но отсутствуют для кромок.

По перечисленным выше результатам КИМ проводится проверка соответствия произведённой лопатки допускам. Для построения 3D-геометрии реальной лопатки по данным КИМ, очевидно, необходимо сделать ряд допущений, так как данные КИМ не содержат информации о кромках и таких областях, как замок и периферийное сечение. Эти допущения будут рассмотрены далее.

Построение модели лопатки по данным КИМ в САД-системе

В качестве САД-системы для построения модели лопатки по данным КИМ была выбрана Siemens NX в силу своей распространённости. При построении модели необходимо учитывать два фактора:

–так как КИМ поставляет информацию о смещении точек номинальной геометрии, интуитивным решением для построения основанной на КИМ модели является деформация номинальной. Однако при создании номинальной модели необязательно использовались те же точки и сечения, которые поставляет КИМ, и более того, номинальная модель может не содержать дерева построения как такового;

–данные КИМ известны не для всей лопатки вентилятора целиком, поэтому необходимо дополнять КИМ-геометрию элементами номинальной.

Для реализации возможности деформирования номинальной модели по данным КИМ номинальная модель была воссоздана с учётом расположения измеряемых КИМ сечений и точек. Для этого исходная 3D модель была рассечена и на полученных профилях сечений были выделены измеряемые точки в соответствии с планом КИМ.

На входной и выходной кромках, где измеряемые точки отсутствуют, были равномерно распределены 7 – 9 дополнительных точек.

Точки каждого сечения были заново собраны в сплайны, и по сплайнам воссозданы поверхности спинки и корыта пера лопатки. Качество воссоздания пера лопатки было проконтролировано путём сравнения кривизны поверхностей воссозданной и номинальной моделей в NX.

Полученная геометрия пера обладает важным свойством: её можно редактировать, перемещая точки, по которым построены сплайны сечений (рис. 4). Зная данные припасовки, отклонения формы профиля и направления нормали в каждой измеряемой точке, по формуле (1) легко вычислить её реальное положение и соответственно сместить точку.

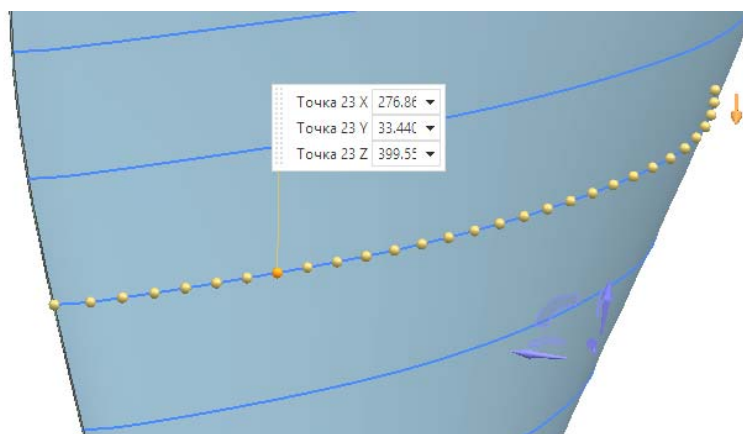


Рис. 4. Редактирование спинки лопатки на уровне смещения точек сечений

Процесс смещения точек сечений по данным КИМ был автоматизирован в NX с использованием возможности создания макросов.

При деформировании точек профиля возникает вопрос, смещать или нет точки кромок, так как по ним нет данных КИМ. В результате припасовки смещение профиля как целого может быть существенным. Поэтому, если не смещать точки кромок, то геометрия сечения получается весьма искажённой. Для точек кромок новое положение определялось по формуле

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}(\mathbf{a}_1 + d\mathbf{P})^T, \quad (2)$$

то есть в предположении, что кромки не имеют отклонений формы, но так же смещены по выносам и поворотам, как и все остальное сечение.

После формирования поверхностей пера возникает вопрос о добавлении замка и области периферийного сечения. Область периферии добавляется к восстановленной геометрии пера с учётом припасовки верхнего сечения (то есть с теми же выносами и поворотом, как и замеренное КИМ сечение с максимальной координатой z на рис. 2).

В области замка и поверхности под платформой задача усложняется, так как линии сечений в ней пересекают не только аэродинамическую поверхность пера, но и поверхность, находящуюся в двигателе под платформой (рис. 5). Поверхность поверхности под платформой можно было бы восстановить на основе данных КИМ подобно поверхности пера, однако в данной работе эта поверхность была взята из номинальной геометрии без изменений и добавлена к восстановленной геометрии пера лопатки.

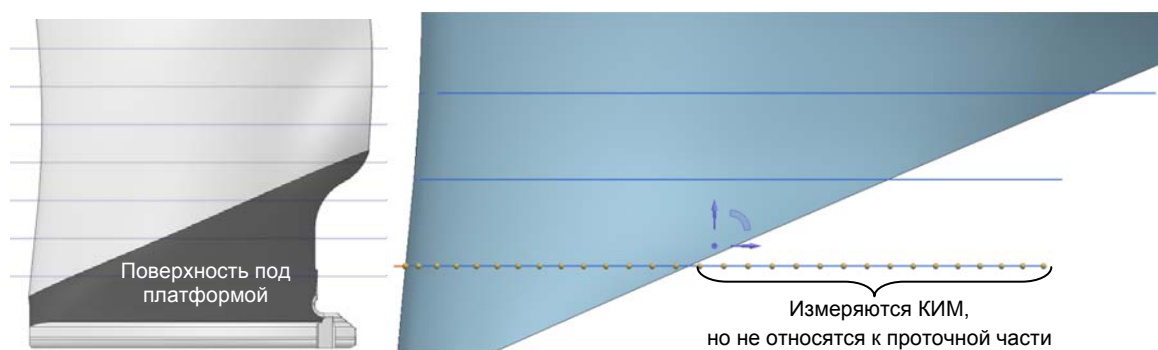


Рис. 5. Зона КИМ в области замка и координатные точки в ней

Дело в том, что поверхность под платформой непосредственно не оказывает воздействия на аэродинамические характеристики вентиляторной лопатки. Осталось показать, что пренебрежение данными КИМ для поверхностей лопатки вне проточной части в дальнейшем не скажется на других элементах многокритериальной оптимизации. Это показано далее, а пока что можно констатировать, что как результат изложенных выше операций геометрия лопатки вентилятора может быть воссоздана по данным КИМ в автоматическом режиме.

Влияние отклонений профиля вне проточной части на прочность

Максимальные допустимые отклонения толщины профиля вентиляторной лопатки в области под платформой (рис. 5) невелики и не превышают 2% толщины профиля на сторону. Столь небольшое изменение толщины профиля в области, близкой к замку, не окажет влияния на напряжения в лопатке. Однако изменение жёсткости потенциально может сказаться на перемещениях пера в горячем состоянии и на собственных частотах. Перемещения пера, в свою очередь, могут сказаться на аэродинамических характеристиках, а частоты – на вероятности возникновения флаттера.

Для определения степени влияния отклонений была создана модель с максимально и минимально возможными отклонениями от номинала и её расчётные перемещения и собственные частоты были сопоставлены с номинальными. На рис. 6, 7 показан результат такого сравнения (в абсолютных величинах). По перемещениям различия не превышают 0,43%, а по первым трём частотам – 0,65%.

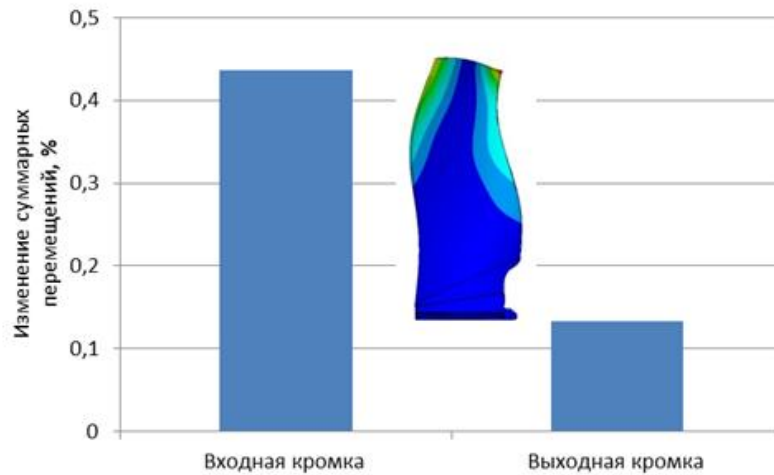


Рис. 6. Чувствительность суммарных перемещений к максимальному отклонению толщины пера вне проточной части

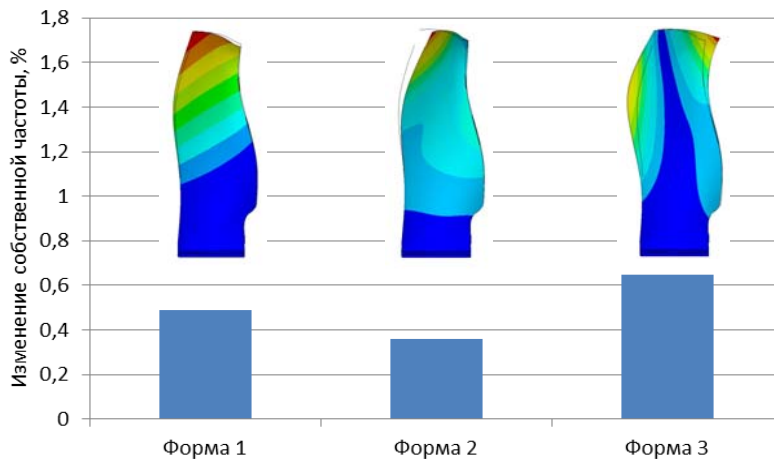


Рис. 7. Чувствительность частот первых трёх собственных форм к максимальному отклонению толщины пера под платформой

Таким образом, отклонения профиля вне проточной части в пределах допусков не оказывают существенного влияния на прочностные характеристики и поэтому учитывать эти области при восстановлении геометрии лопатки по данным КИМ необязательно.

Заключение

Построение 3D модели лопатки вентилятора по данным КИМ является первым этапом комплекса мероприятий по робастной оптимизации двигателя российского регионального самолёта. Показано, что такое построение возможно и изложен алгоритм построения. Процесс построения модели может быть автоматизирован в CAD-системе NX.

Для проведения робастной оптимизации лопатки необходим набор переменных параметров. В изложенной постановке построение модели лопатки вентилятора основывается на использовании в качестве параметров отклонений положения заранее известных точек сечений и данных припасовки. Учитывая число точек в сечении и число сечений, количество изменяемых параметров превышает 10 тысяч. Использование столь большого числа параметров при оптимизации было бы крайне затратным с вычислительной точки зрения и не имело бы практического смысла, так как каждая от-

дельная точка профиля не характеризует его форму в целом. Альтернативным подходом могло бы служить использование обобщённых характеристик сечений, таких как длина хорды, толщина сечения в определённых точках и величина горлового сечения межлопаточного канала. Эти интегральные характеристики могут быть вычислены с использованием 3D модели лопатки, восстановленной по данным КИМ в соответствии с изложенной методикой. Дальнейшие исследования будут направлены на определение наиболее эффективного набора геометрических параметров для проведения робастной оптимизации.

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в ходе реализации комплексного проекта, шифр 2017-218-09-172.

Библиографический список

1. Киселев Ю.В., Киселев Д.Ю. Двигатель SaM 146. Устройство основных узлов: электронное учебное пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Dvigatel-SaM-146-Ustroistvo-osnovnyh-uzlov-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54514>
2. Shmotin Y.N., Chupin P.V., Tomilina T.V. Robust Optimization of a Single-Stage Fat Using Response Surface // Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Optimization. 2010.
3. Егоров И.Н., Кретинин Г.В., Федечкин К.С. Оптимизационные исследования вентилятора ТРДД с большой степенью двухконтурности // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2008. № 134. С. 88-95.
4. Gapinski B., Zachwiej I., Kolodziej A. Comparison of different coordinate measuring devices for part geometry control // Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR 2015). 2015.
5. Печенин В.А. Повышение точности и производительности измерений при изготовлении лопаток компрессора ГТД на основе разработки методик, обеспечивающих увеличение информативности и оптимизацию метрологического процесса. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2017. 191 с.
6. Приложение к свидетельству № 63505 об утверждении типа средств измерений. Машины координатно-измерительные COORD3. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, 2016. 18 с.
7. Печенин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В., Янюкина М.В. Исследование неопределённостей измерений геометрических параметров профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 162-170. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-162-170
8. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю., Захаров О.В. Комплекс математических моделей для контроля технически сложных поверхностей на мобильных координатно-измерительных машинах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17, № 3. С. 48-60. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.3.06
9. Hsu T., Lai J., Ueng W. On the development of airfoil section inspection and analysis technique // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005. V. 30, Iss. 1-2. P. 129-140. DOI: 10.1007/s00170-005-0046-5

CONSTRUCTING 3D FAN BLADE MODELS IN CAD-SYSTEM ON THE BASIS OF COORDINATE MEASURING TECHNIQUES

© 2017

- A. N. Arkhipov** Candidate of Science (Engineering); senior researcher of the Research Department; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; anarkhipov.48@mai.ru
- Yu. A. Ravikovich** Doctor of Science (Engineering); Vice Rector for Research; Head of the Department "Construction and Design of Engines"; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; yurav2@yandex.ru
- I. M. Fedorov** Candidate of Science (Engineering); leading engineer of the Research Department; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; ilyafyodorov@yandex.ru
- D. P. Kholobtsev** Head of the Research Department; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; nio203@mai.ru

Methods of coordinate measurement are reviewed and a possibility of their usage for fan blade geometry characterization and construction of a 3D CAD model is evaluated with account for actual blade airfoil deviations. Different components of blade geometry deviation from nominal geometry are considered. A technique of constructing a 3D model in a CAD-system on the basis of coordinate measurement, considering real manufacturing deviations of an airfoil is presented. To allow deformation of the nominal model according to the measurement data, the nominal model of the airfoil was recreated with account for the location of the measured sections. The issue of adding the measured profile of the blade root, edges and the peripheral area of the airfoil to the model is discussed. The influence of deviations of the out-of-the-flow path profile on the mechanical characteristics is assessed. A model with maximum and minimum deviations possible was constructed. Expected displacements and natural frequencies of the model were compared to the nominal ones. Further direction of investigation to determine airfoil geometry parameters most efficient for robust optimization is presented.

Gas turbine engine; fan; blade; coordinate measuring techniques; model; robust optimization.

Citation: Arkhipov A.N., Ravikovich Yu.A., Fedorov I.M., Kholobtsev D.P. Constructing 3D fan blade models in cad-system on the basis of coordinate measuring techniques. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 3. P. 7-16. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-7-16

References

1. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu. *Dvigatel' SaM 146. Ustroystvo osnovnykh uzlov: elektronnoe uchebnoe posobie* [Engine SaM 146. Design of the main units. Electronic textbook]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. Available at: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Dvigatel-SaM-146-Ustroystvo-osnovnyh-uzlov-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54514>
2. Shmotin Y.N., Chupin P.V., Tomilina T.V. Robust Optimization of a Single-Stage Fan Using Response Surface. *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Optimization*. 2010.
3. Egorov I.N., Kretinin G.V., Fedechkin K.S. Optimization studies of the aircraft high-bypass ratio turbo engine fan. *Civil Aviation High Technol.* 2008. No. 134. P. 88-95. (In Russ.)

4. Gapinski B., Zachwiej I., Kolodziej A. Comparison of different coordinate measuring devices for part geometry control. *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR 2015)*. 2015.

5. Pechenin V.A. *Povyshenie tochnosti i proizvoditel'nosti izmereniy pri izgotovlenii lopatok kompressora GTD na osnove razrabotki metodik, obespechivayushch ikh uvelichenie informativnosti i optimizatsiyu metrologicheskogo protsessa*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the accuracy and performance of measurements in the manufacture of gas turbine engine compressor blades on the basis of techniques to increase the information content and optimize the metrological process. Ph.D. thesis in Engineering Science]. Samara, 2017. 191 p.

6. Appendix to the Pattern Approval Certificate No. 63505: Coordinate measuring machines COORD3. Moscow: All-Russian Research Institute of Metrological Service Publ., 2016. 18 p. (In Russ.)

7. Pechenin V.A., Bolotov M.V., Ruzanov N.V., Yanyukina M.V. Study of uncertainty of measuring geometrical parameters of gas turbine engine compressor blade profiles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 162-170. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-162-170

8. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Iu., Zakharov O.V. Complex mathematical models for the control of technique complex surfaces on coordinate measuring machines. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2015. V. 17, no. 3. P. 48-60. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9877/2015.3.06

9. Hsu T., Lai J., Ueng W. On the development of airfoil section inspection and analysis technique. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. V. 30, Iss. 1-2. P. 129-140. DOI: 10.1007/s00170-005-0046-5