

УДК 621.45.037

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА

А. Н. АРХИПОВ<sup>1</sup>, Г. В. КРЕТИНИН<sup>2</sup>, Ю. А. РАВИКОВИЧ<sup>3</sup>,  
Д. П. ХОЛОБЦЕВ<sup>4</sup>, А. О. ШЕВЯКОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>anarkhipov.48@mai.ru, <sup>2</sup>kretinin.g@mail.ru, <sup>3</sup>yurav@mai.ru, <sup>4</sup>nio203\_mai@mail.ru, <sup>5</sup>shevyakov13@yandex.ru

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 30.09.2019

**Аннотация.** Выбраны геометрические параметры, необходимые для создания параметрической модели рабочей лопатки вентилятора. Разработана параметрическая 3D-модель рабочей лопатки вентилятора. Создана программа для моделирования параметрических 3D-моделей лопаток вентилятора. Представлен принцип автоматизированного построения параметрической модели лопатки вентилятора в CAD-системе Siemens NX по результатам контрольно-измерительных мероприятий. Полученные модели позволяют существенно сократить время на подготовку и проведение прочностных и аэродинамических расчетов и являются важным этапом комплекса мероприятий по многодисциплинарной робастной оптимизации рабочих лопаток вентилятора.

**Ключевые слова:** параметрическая модель; двухконтурный двигатель; вентилятор; рабочая лопатка; автоматизация; контрольно-измерительные мероприятия; робастная оптимизация; CAD-система; NX, язык программирования PYTHON.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение конкурентоспособности российских двухконтурных газотурбинных двигателей для региональных самолетов требует проведения комплексных работ по повышению их экономичности, ресурса и надежности за счет оптимизации и модернизации деталей и узлов.

Одной из основных деталей двигателя, оказывающих влияние на его параметры, является рабочая лопатка вентилятора, показанная на рис. 1.

Современные лопатки вентилятора имеют сложную форму профильной части и широкую хорду. Аэродинамический

и прочностной расчет таких лопаток с необходимой точностью возможен только при использовании трехмерных конечно-элементных моделей [1, 2].

В то же время небольшая толщина пера лопатки по сравнению с высотой и хордой делает лопатку чувствительной к геометрическим отклонениям, возникающим при ее изготовлении. Поэтому решение многодисциплинарной оптимизационной задачи (аэродинамика и прочность) в робастной постановке при геометрических неопределенностях применительно к лопаткам вентилятора является актуальной темой в современном двигателестроении [3].

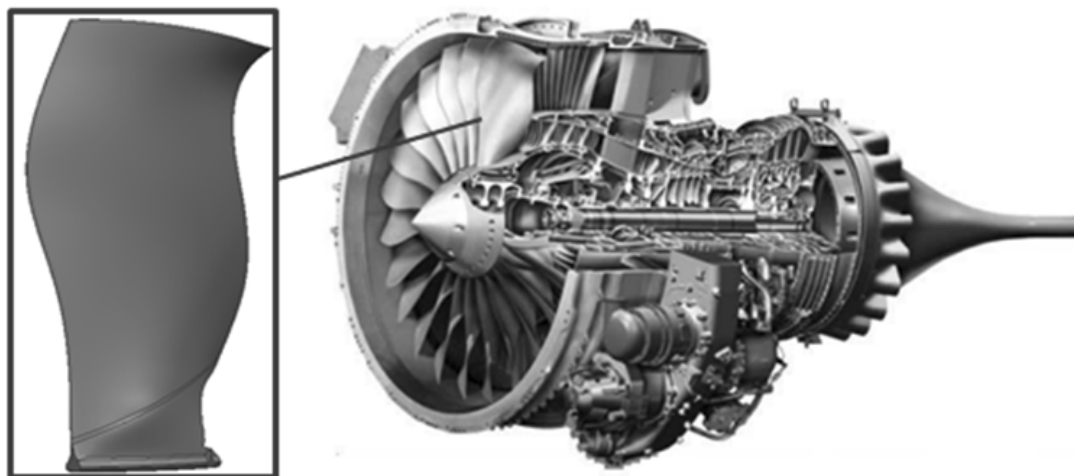


Рис. 1. Общий вид рабочей лопатки вентилятора

Многодисциплинарная робастная оптимизация рабочих лопаток вентилятора и их расстановка в венце с учетом фактических геометрических параметров позволяет увеличить среднее значение КПД, сделать вентилятор более устойчивым к различным факторам (геометрическим отклонениям формы профиля лопаток, а также изменению режима работы относительно номинального).

Вследствие влияния различных факторов неопределенности (неопределенность геометрических параметров, вызванная технологическим разбросом в процессе производства; неопределенность свойств материалов; неопределенность граничных условий и др.) [4] решение задачи оптимизации требует автоматизированного создания параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора.

#### РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА

Параметрическая модель – это математическая модель объекта (например, лопатка вентилятора) с геометрическими параметрами, при изменении которых происходит изменение конфигурации объекта [5].

В настоящее время роль 3D-моделирования в инженерной практике достаточно велика. Создание трехмерных моделей деталей является первым этапом

для разработки конструкторско-технологической документации, а также проведения инженерного анализа.

Методика проектирования профиля лопатки предполагает использование либо результатов контрольно-измерительных мероприятий, либо данных с заводского чертежа лопатки. При каждом случае в качестве входных данных используются следующие геометрические параметры:

- 1) количество сечений;
- 2) количество точек в сечениях;
- 3) координаты точек спинки и корыта в сечениях;
- 4) угол поворота сечений;
- 5) значения смещения центров тяжести;
- 6) высоты расположения сечений;
- 7) толщины лопатки в различных местах профиля;
- 8) максимальная толщина профиля;
- 9) длина хорды.

На рис. 2 представлена рабочая лопатка вентилятора с параметрами, определяющими ее геометрию.

Методика построения 3D-модели рабочей лопатки вентилятора по данным, полученным с координатно-измерительных машин (КИМ), состоит из 4 этапов [6, 7]:

- 1) моделирование пера лопатки;
- 2) моделирование области замка лопатки;

- 3) моделирование проставки, предназначенной для соединения пера лопатки и замковой части;
- 4) объединение пера лопатки с замком.

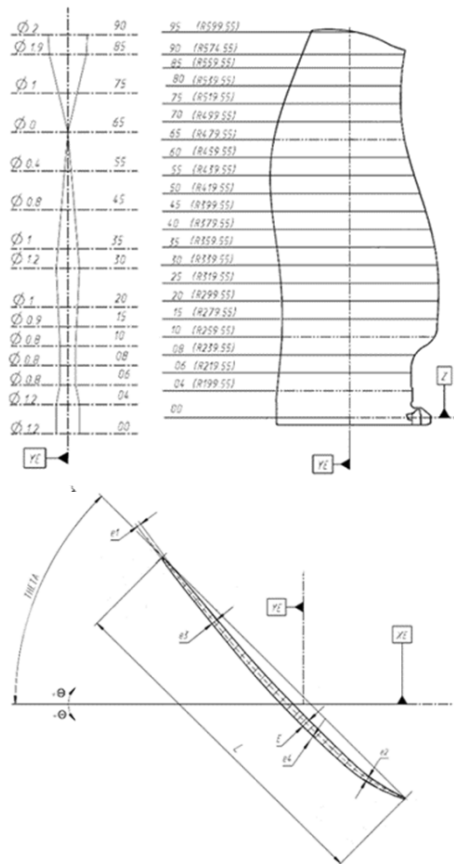


Рис. 2. Рабочая лопатка вентилятора

Принцип работы программы, разработанной для автоматизированного построения 3D-моделей лопаток вентилятора, подробно описан в работе [7].

**ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА**

Разработка параметрической модели рабочей лопатки вентилятора проводилась на основе данных, полученных в ходе исследований корреляции измеренных геометрических размеров (по сечениям пера) ранее изготовленных лопаток. Оценка взаимной корреляции была проведена для максимальных толщин профиля в сечении *E*, толщин лопатки в различных местах сечения профиля *e1*, *e2*, *e3*, *e4*, углов установки сечения *ТНЕТА* (рис. 3).

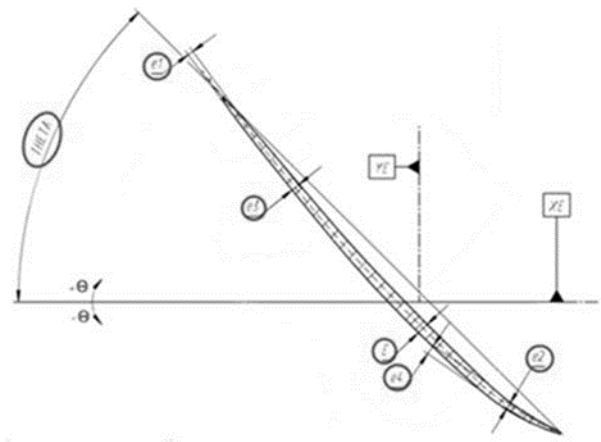


Рис. 3. Параметры, используемые в корреляционных исследованиях

Помимо геометрических параметров, рассмотренных в корреляционных исследованиях, для построения параметрической модели лопатки были взяты смещения центров тяжести сечений *XE* и *YE* (рис. 2), так как они существенно влияют на напряженно-деформированное состояние пера лопатки, на силы и моменты, приходящие на хвостовик замкового соединения с диском, а также на проходное сечение между соседними лопатками. Корреляция этих параметров по высоте закладывается при проектировании и многократно исследовалась ранее.

Анализ попарной корреляции выбранных геометрических размеров по сечениям представлен на рис. 4. В данной статистической взаимосвязи представлены параметры сечения, характеризующие его максимальную толщину. Наиболее значимые корреляции: *E-e4*; *E-e3*, поэтому в параметрическую модель лопатки достаточно включить параметр *E*.

На рис. 5 представлена корреляция по сечениям для параметров: *Theta-e1*, *Theta-e2*, *Theta-e3*, *Theta-e4*. Наиболее значимые корреляции: *Theta-e2*, *Theta-e4*.

На рис. 6 представлена корреляция по сечениям для параметров: *e1*, *e2*, *e3*, *e4*. Наиболее значимые корреляции: *e1-e3*, *e2-e4*, поэтому в параметрическую модель лопатки достаточно включить параметры *e1* и *e2*.

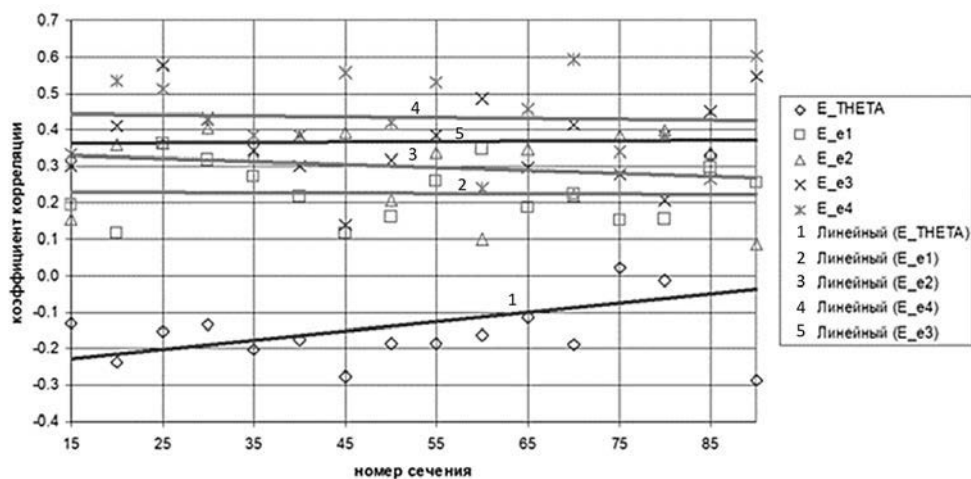


Рис. 4. Корреляция по сечениям для параметра  $E$  (максимальная толщина профиля)

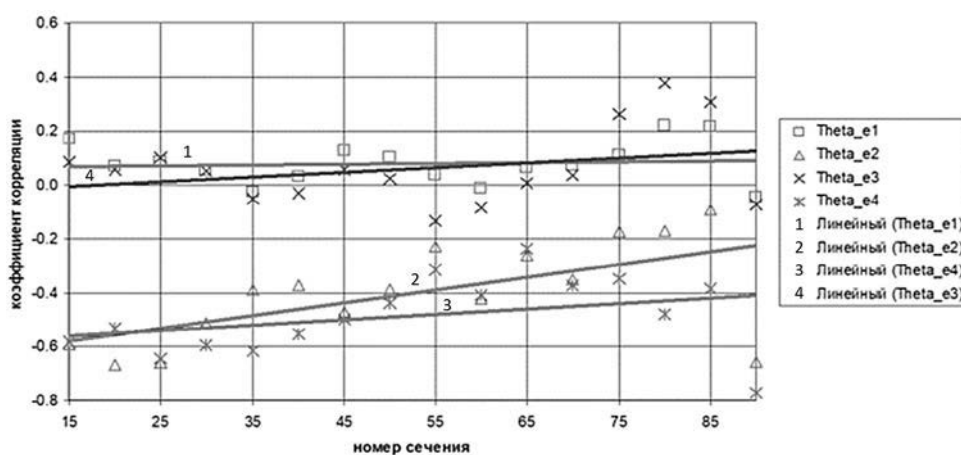


Рис. 5. Корреляция по сечениям для параметров:  $Theta_{e1}$ ,  $Theta_{e2}$ ,  $Theta_{e3}$ ,  $Theta_{e4}$  (угол установки сечения)

На рис. 7 представлено изменение корреляции одноименных параметров по сечениям (по отношению к сечению 45) для всех параметров, рассмотренных выше ( $E$ ,  $Theta$ ,  $e1$ ,  $e2$ ,  $e3$ ,  $e4$ ).

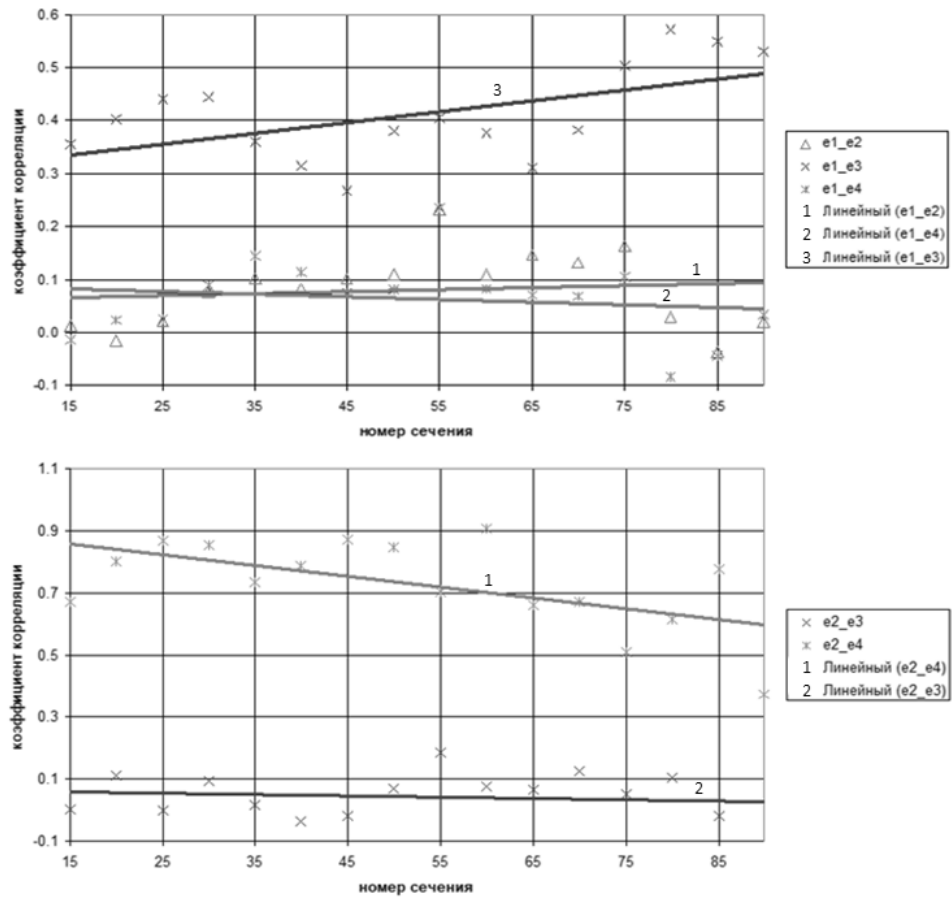
По результатам проведенного корреляционного исследования и выявленных связей между геометрическими параметрами рабочей лопатки вентилятора было принято решение использовать для параметризации лопатки 4 сечения (корневое, среднее, периферийное и одно сечение, расположенное между средним и периферийным) по высоте и использовать в качестве параметров сечения: отклонения центра тяжести  $T_x$  и  $T_y$ , отклонения угла установки  $Theta$ , максимальную толщину профиля  $E$ , толщины лопатки у входной и выходной кромки  $e1$  и  $e2$ ; ито-

го: 24 параметра. Выбранные для параметризации геометрические параметры представлены на рис. 8.

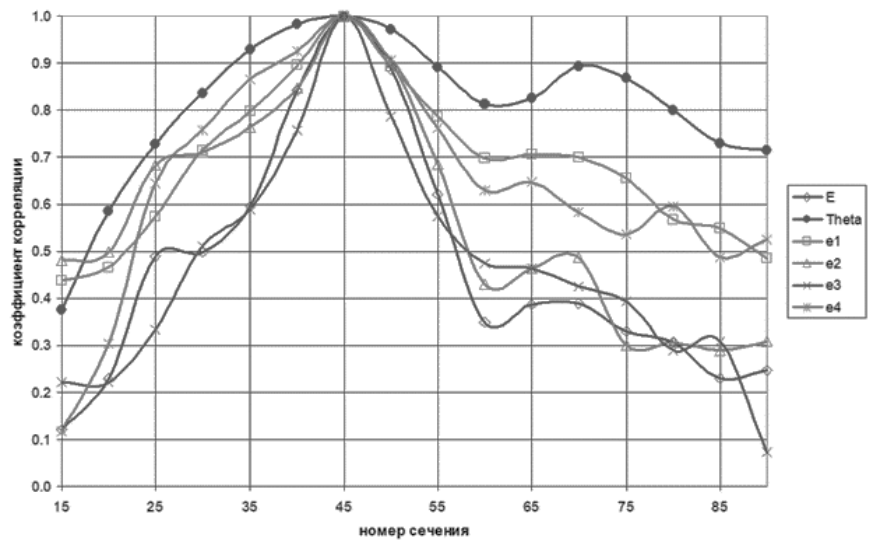
#### ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОГРАММЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ 3D-МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА

Программа автоматизированного построения параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора представляет собой макрос, написанный на языке программирования PYTHON, совместно работающий с CAD-системой Siemens NX.

Входные данные представлены файлом формата CSV с данными припасовки  $T_x$ ,  $T_y$  и  $Theta$  для 4 сечений (15, 45, 75, 90), который также содержит значения толщин  $E$ ,  $e1$  и  $e2$  для этих сечений.



**Рис. 6.** Корреляция по сечениям для параметров:  $e1$ ,  $e2$ ,  $e3$ ,  $e4$  (толщины лопатки в различных местах профиля)



**Рис. 7.** Корреляция по сечениям для параметров  $E$ ,  $Theta$ ,  $e1$ ,  $e2$ ,  $e3$ ,  $e4$

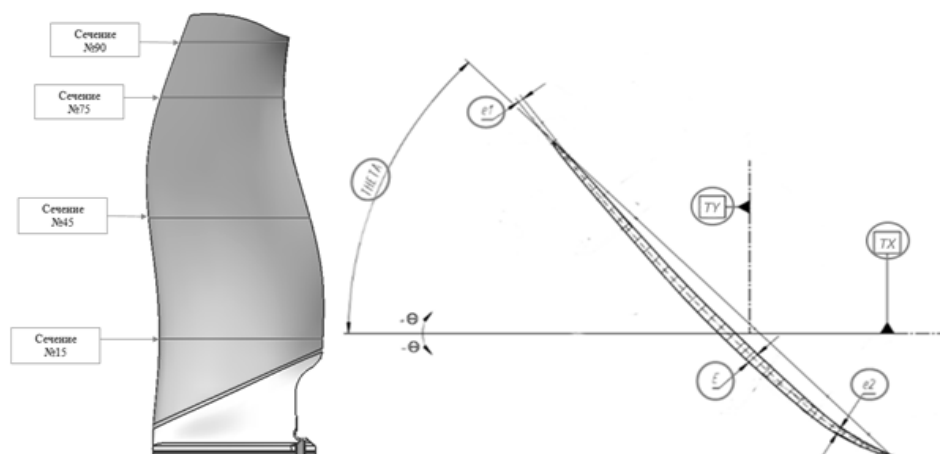


Рис. 8. Сечения и геометрические параметры, используемые для создания параметрической модели рабочей лопатки вентилятора

Программа строит параметрическую модель на основе номинальной подготовленной ранее 3D-модели. Подготовленная модель состоит из 3 частей, сшитых средствами комплекса NX, а именно замковой области, проставки и усеченного пера лопатки. Перо номинальной лопатки построено по всем сечениям в соответствии с чертежом и затем усечено в районе периферии и замка.

Программа, в первую очередь, изменяет перо лопатки. Каждое сечение пера номинальной лопатки состоит из 4 сплайнов, построенных по точкам. На основании измеренных 6 параметров (толщин сечений, смещения положения центра тяжести, и поворота всего сечения) программа изменяет положение данных точек в выбранных 4 сечениях.

Вначале проводится смещение сечения на величину измеренных отклонений центра тяжести  $T_x$  и  $T_y$  и поворот сечения на величину измеренного отклонения угла установки  $Theta$ .

Затем проводится изменение толщин смещенного и повернутого сечения. Причем изменение толщин сечения определяет смещения лишь его 6 точек (по 3 с каждой стороны), определенные по измеренным толщинам  $E$ ,  $e1$  и  $e2$ . Для остальных точек данного сечения смещение рассчитывается либо по линейному, либо по квадратичному закону относительно данных 6 точек.

Точки промежуточных сечений изменяются по линейному закону с учетом чер-

тежных значений и значений соседних измеренных сечений.

Затем программа запускает обновление 3D-модели, и CAD-система NX автоматически перестраивает модель с обновленными сплайнами. В процессе перестроения происходит автоматическое перестроение пера лопатки, так как были изменены точки сплайнов. Перо автоматически усекается с двух сторон поверхностью, определяющей периферию лопатки, и плоскостью для соединения с проставкой. Далее программа формирует две поверхности на основе граничных кривых для преобразования оболочки пера в замкнутую область. После этого программа перестраивает проставку между пером и замковой частью для возможности их сшивания между собой средствами NX. Объединенное тело может быть импортировано во внешнюю программу теплового и прочностного анализа. Для аэродинамического расчета из тела лопатки программа убирает замковую часть и проставку, а также усечение пера и сохраняет отдельным файлом. Также в программе реализован алгоритм подготовки файла в формате TurboGrid для последующего перестроения «холодной» модели пера в «горячую» модель (с учетом деформации на рабочих оборотах) и расчета в программе FineTurbo (Numeca).

На рис. 9 представлена блок-схема построения параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора по результатам контрольно-измерительных мероприятий.

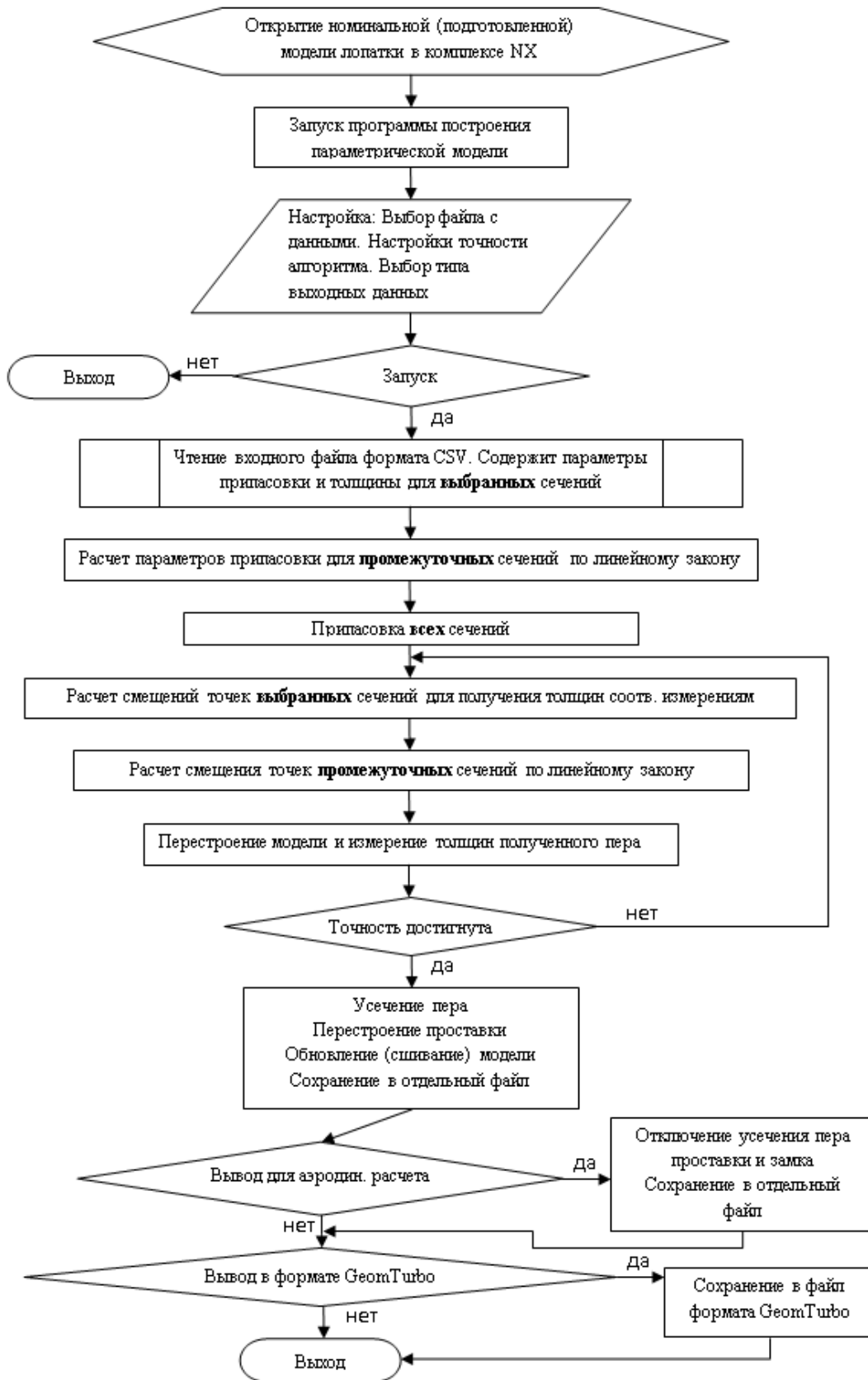


Рис. 9. Блок-схема построения параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора по результатам контрольно-измерительных мероприятий

В результате в САД-системе Siemens NX создается параметрическая 3D-модель рабочей лопатки вентилятора.

После анализа полученной геометрии лопатки были выявлены значительные отклонения геометрии в области выходной кромки на периферии (отклонение до 3 мм). Подобное отклонение геометрии, особенно в области периферии, может негативно сказаться на интегральных характеристиках ступени вентилятора, получаемых при выполнении аэродинамических расчетов лопатки. В связи с этим было принято решение о включении в процесс построения параметрической модели дополнительного сечения номинальной лопатки в области периферии (сечение №95 над сечением №90).

Для сечения №95 из входных данных были добавлены 3 дополнительных параметра  $T_u$ ,  $\Theta$  и  $E$ , т.е. число параметров возросло до 27. Оставшиеся параметры сечения №95  $T_x$ ,  $e1$  и  $e2$  были экстраполированы с сечения №90.

Данная доработка позволила сократить отклонение профиля параметрической модели, построенной по 27 параметрам, от профиля лопатки, построенного по всем измеренным точкам на пере (более 1200 точек), до величины 0,1 мм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геометрическими параметрами пера рабочей лопатки вентилятора являются отклонения центра тяжести  $T_x$  и  $T_y$ , отклонения угла установки  $\Theta$ , максимальная толщина профиля  $E$ , толщины лопатки у входной и выходной кромки  $e1$  и  $e2$  в четырех сечениях (корневое, среднее, периферийное и одно сечение, расположенное между средним и периферийным) и отклонения параметров  $T_u$ ,  $\Theta$  и  $E$  в дополнительном периферийном сечении.

Созданная параметрическая 3D-модель рабочей лопатки вентилятора практически не отличается от профиля лопатки, построенного по всем измеренным точкам на пере (максимальное отклонение не более 0,1 мм).

С помощью разработанной программы становится возможным автоматизированное построение параметрических 3D-моделей лопаток вентилятора, что существенно со-

крашает время на подготовку моделей для прочностных и аэродинамических расчетов.

Получение параметрической модели является важным этапом комплекса мероприятий по многодисциплинарной робастной оптимизации рабочих лопаток вентилятора, так как эта модель может быть использована для вычисления напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора, а также определения интегральных характеристик ступени вентилятора путем проведения аэродинамических расчетов.

В дальнейшем результаты, полученные в ходе выполнения таких расчетов, могут быть использованы для уточнения расстановки лопаток в венце и повышения КПД вентилятора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибин В. А., Темис Ю. М., Сосунов В. А. Машиностроение. Энциклопедия. Раздел IV «Расчет и конструирование машин» Т. IV-21 «Самолеты и вертолеты», книга 3 «Авиационные двигатели». Москва: «Машиностроение», 2010. 720 с. [ V. A. Skibin, U. M. Temis, V. A. Sosunov, *Engineering. Encyclopedia, section IV "Calculation and design of machines"*. Vol. IV - 21 "Aircraft and helicopters", book 3 "Aircraft engines". Moscow: Mashinostroenie, 2010. ]
2. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 4. Москва: Машиностроение, 2008. 192 с. [ A. A. Inozemtsev, M. A. Nechamkin, V. L. Sandratskii, *Fundamentals of design of aircraft engines and power plants. Vol. 4*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2008. ]
3. Robust Multiphysics Optimization for Fan Blade Aerodynamic Efficiency, Structural Properties and Flutter Sensitivity / K. A. Vinogradov, et. al. // ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Vol. 2D: Turbomachinery, 2018.
4. Многоуровневая робастная оптимизация осевого компрессора / И. Н. Егоров и др. // Насосы. Турбины. Системы. 2014. № 2 (11). С. 47–55. [ I. N. Egorov, et. al. "Multi-level robust optimization of axial compressor", (in Russian), in *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, no. 2 (11), pp. 47-55, 2014. ]
5. Бояров К. В., Рязанов А. И., Чемпинский Л. А. Разработка параметрической 3D-модели рабочей лопатки компрессора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3 (27). [ K. V. Boyarov, A. I. Ryazanov, L. A. Chempinsky, "Development of parametric 3D-model of compressor blade", (in Russian), in *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, no. 3 (27), 2011. ]
6. Построение 3D-моделей лопаток вентилятора газотурбинного двигателя в САД-системе по данным контрольно-измерительных мероприятий / А. Н. Архипов и др. // 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



[ A. N. Arkhipov, et. al. "Build 3D-models of fan blades of a gas turbine engine in the CAD system according to control-measuring activities", (in Russian), in *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, vol. 16, no. 3, pp. 7-16, 2017. ]

7. **Автоматизированное** построение модели рабочей лопатки вентилятора по данным измерений профиля в CAD-системе / А. Н. Архипов и др. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 7–17. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-7-17 [ A. N. Arkhipov, et. al., "Automated construction of a model rotor blade of the fan according to the measurements of the profile in a CAD system", (in Russian), in *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, vol. 17, no. 4, pp. 7-17, 2018. ]

8. **Учет** влияния возможных отклонений размеров в пределах технологических допусков на величины собственных частот колебаний рабочей лопатки компрессора в процессе ее отстройки от опасных резонансов / Б. Е. Васильев и др. // Известия вузов. Авиационная техника. № 1. 2019. [ B. E. Vasiliev, et. al., "Consideration of the influence of possible size deviations within the technological tolerances on the values of natural frequencies of the compressor blade oscillations in the process of its detuning from dangerous resonances", (in Russian), in *Izvestiya vuzov. Aviacionnaya tekhnika*, no. 1, 2019. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**АРХИПОВ Александр Николаевич**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. науч.-иссл. отдела; МАИ (национальный исследовательский университет).

**КРЕТИНИН Геннадий Валентинович**, д-р техн. наук, профессор, вед. инж. науч.-иссл. отдела; МАИ (национальный исследовательский университет).

**РАВИКОВИЧ Юрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор, проректор по науч. работе, зав. кафедрой «Конструкция и проектирование двигателей»; МАИ (национальный исследовательский университет).

**ХОЛОБЦЕВ Дмитрий Петрович**, нач. науч.-иссл. отдела; МАИ (национальный исследовательский университет).

**ШЕВЯКОВ Артем Олегович**, инж. науч.-иссл. отдела; МАИ (национальный исследовательский университет).

#### METADATA

**Title:** Automated construction of a parametric model of the fan blade.

**Authors:** A. N. Arkhipov <sup>1</sup>, G. V. Kretinin <sup>2</sup>, Y. A. Ravikovich <sup>3</sup>, D. P. Kholobtsev <sup>4</sup>, A. O. Shevyakov <sup>5</sup>

#### Affiliation:

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>anarkhipov.48@mai.ru, <sup>2</sup>kretinin.g@mail.ru,  
<sup>3</sup>yurav@mai.ru, <sup>4</sup>nio203\_mai@mai.ru,  
<sup>5</sup>shevyakov13@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 65-73, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The geometrical parameters necessary for creation of parametric model of a fan blade are chosen. A parametric 3D model of the fan blade has been developed. A program for modeling parametric 3D models of fan blades has been created. The principle of automated creation of parametric model of the fan blade in the CAD-system Siemens NX based on the results of control and measurement activities is presented. The obtained models can significantly reduce the time for preparation and carrying out mechanical integrity and aerodynamic calculations, and is an important step in the complex of measures for multidisciplinary robust optimization of the fan blades.

**Key words:** parametric model; two-circuit motor; fan; working blade; automation; control and measurement measures; robust optimization; CAD-system; NX, Python programming language.

#### About authors:

**ARKHIPOV, Alexander Nikolayevich**, Candidate of Science (Engineering); senior researcher of the Research Department.

**KRETININ, Gennady Valentinovich**, doctor of technical Sciences, Professor, leading engineer of the research Department.

**RAVIKOVICH, Yuri Alexandrovich**, Doctor of Science (Engineering); Vice Rector for Research; Head of the Department "Construction and Design of Engines".

**KHOLOBTSEV, Dmitri Petrovich**, Chief of the Research Department.

**SHEVYAKOV, Artem Olegovich**, engineer of the Research Department.