

## РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОЦЕДУРЫ СБОРКИ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ СТУПЕНИ АВИАЦИОННОГО ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Равикович Ю.А., Архипов А.Н., Шевяков А.О.

Московский авиационный институт, МАИ, г. Москва, [shevakovart@yandex.ru](mailto:shevakovart@yandex.ru)

*Ключевые слова:* двухконтурный турбореактивный двигатель, вентилятор, рабочая лопатка вентилятора, сборка, балансировка, производственные отклонения.

Современные авиационные двухконтурные турбореактивные двигатели являются ключевым элементом авиационной промышленности, определяющим уровень технологичности и безопасности воздушных судов. Эффективность их работы, ресурс и надежность напрямую зависят от качества сборки вентиляторных ступеней, обеспечивающих до 80% общей тяги [1, 2].

Традиционные методы сборки вентиляторных ступеней фокусируются на компенсации статических моментов за счет диаметрально противоположного расположения лопаток с максимальной массой [3, 4]. Однако такой подход решает лишь проблему дисбаланса ротора, игнорируя локальные геометрические отклонения лопаток. Эти отклонения нарушают симметрию распределения давления в рабочем диапазоне, провоцируя рост аэродинамических потерь до 5% КПД. В условиях повышенных требований к топливной эффективности и экологичности двигателей подобные риски становятся недопустимыми.

Предлагаемое решение основано на комплексном подходе, объединяющем анализ геометрических параметров лопаток с динамическим моделированием их взаимодействия в венце. Математические алгоритмы позволяют учитывать не только массово-инерционные характеристики (традиционно оцениваемые при балансировке), но и аэродинамические эффекты, вызванные производственными отклонениями. Это позволяет повысить энергоэффективность и ресурс двигателей, снизить эксплуатационные риски и обеспечить соответствие строгим авиационным стандартам.

Методология включает четыре этапа, объединяющих цифровые технологии, математическое моделирование и алгоритмическую оптимизацию:

1. Сбор и анализ исходных данных:

– измерение геометрических отклонений (профиль, толщина, угол и т.д.) и массово-инерционных характеристик лопаток с помощью координатно-измерительных машин и моментных весов;

– формирование базы данных для идентификации критических отклонений.

2. Построение параметрических моделей лопаток с интеграцией измеренных геометрических и массовых параметров. Модели служат основой для последующего анализа и оптимизации.

3. Проведение численных экспериментов:

– CFD-анализ для оценки аэродинамических характеристик;

– FEA-анализ для расчета прочностных параметров.

4. Интеграция и оптимизация полученных данных в единую математическую модель, где алгоритм подбора лопаток минимизирует суммарный дисбаланс рабочего колеса (целевой показатель  $\leq 45$  (г·см)) и максимизирует КПД ступени (целевая эффективность  $\geq 92\%$ ).

Цикл повторяется итеративно до достижения заданных критериев качества, обеспечивая синхронизацию геометрических, динамических и аэродинамических параметров.

Тестирование разработанного метода на двигателях региональных самолетов общей тягой 8 тонн подтвердило его эффективность. Дисбаланс ротора сохранился на уровне менее 45 (г·см), а прирост КПД вентиляторной ступени составил порядка 1,5% за счет снижения аэродинамических потерь.

Предложенный подход преодолевает ограничения традиционных технологий, акцентируя взаимосвязь современных методов контроля геометрии, компьютерного моделирования и алгоритмической оптимизации, что соответствует глобальным трендам цифровизации авиастроения, обеспечивая новые стандарты качества и безопасности авиационных двигателей.

### **Список литературы**

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. Т.2. 368 с.
2. Елисеев Ю.С. и др. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2003. 511 с.
3. Никитин А.Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 269 с.
4. Рыженков В.М. Технология балансировки роторов авиадвигателей: Учебное пособие. М.: МАИ, 2022. 65 с.

### **Сведения об авторах**

Равикович Ю.А. – доктор технических наук, профессор, и.о. проректора по инновационной деятельности, заведующий кафедрой 203 «Конструкция и проектирование двигателей».

Архипов А.Н. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела.

Шевяков А.О. – аспирант, инженер 2 категории научно-исследовательского отдела.

## **DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE THE ASSEMBLY PROCEDURE FOR THE FAN STAGE OF AN AIRCRAFT TURBOFAN ENGINE**

Arkhipov A.N., Ravikovich Yu.A., Shevyakov A.O.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, [shevyakovart@yandex.ru](mailto:shevyakovart@yandex.ru)

*Keywords:* *turbofan engine, fan, fan blade, assembly, balancing, manufacturing deviations.*

This paper is one of the key results of a joint project between the Moscow Aviation Institute (MAI) and PJSC «UEC-Saturn» aimed at upgrading a low-pressure turbofan engine compressor for regional aircraft. The main goal of this project was to optimize the assembly process of the fan stage, taking into account the actual geometric characteristics of the manufactured blades. As part of this task, innovative measures have been developed and implemented to improve assembly accuracy and minimize manufacturing deviations.