

УДК 62.251

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.04

**Д.Г. Сайнаков, И.Л. Будницкий, А.П. Козлов**

ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ДИСБАЛАНСЫ РОТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО СБОРКЕ**

Повышенные вибрации газотурбинного двигателя снижают надежность и общий срок службы двигателя. Основная причина появления повышенных вибраций – динамическая неуравновешенность (динамический дисбаланс) одного или нескольких роторов двигателя. Динамическая неуравновешенность, в свою очередь, является совокупным проявлением статической и моментной неуравновешенности ротора.

Одна из причин появления недопустимых значений дисбалансов ротора – несовершенство геометрических параметров деталей, т.е. погрешности изготовления этих деталей. Несмотря на то что в настоящее время к точности изготовления деталей газотурбинного двигателя предъявляются жесткие требования, изготовить деталь без погрешностей невозможно.

При стыковке нескольких роторов суммирующиеся погрешности изготовления деталей могут привести к смещению центра масс роторов, а также к перекосу их осей, что в свою очередь приводит к увеличению дисбалансов собранного ротора. В результате вибрации собранного двигателя значительно превышают допустимые.

Анализируется проблема влияния погрешностей изготовления деталей на дисбалансы ротора газотурбинного двигателя при его сборке. Проводится обзорный анализ методов решения данной проблемы, представленных в современных научных работах. Приводится методика 3D-моделирования сборки ротора газотурбинного двигателя с учетом векторов биений для прогнозирования статического и моментного дисбалансов собранного ротора. По результатам моделирования рассчитаны смещения центра масс анализируемого ротора и перекосы его оси при различных положениях векторов биений. Сделан вывод о целесообразности применения рассматриваемой методики при проектировании современных газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, вибрация, дисбаланс, ротор, деталь, сборка, торцевые и радиальные биения, погрешность изготовления, сборка, 3D-моделирование.

**D.G. Sainakov, I.L. Budnickiy, A.P. Kozlov**

UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

## **INFLUENCE OF ERRORS IN THE MANUFACTURE OF PARTS ON THE IMBALANCES OF THE GAS TURBINE ENGINE ROTOR DURING ITS ASSEMBLY**

Increased vibrations of a gas turbine engine reduce the reliability and overall service life of the engine. The main reason for the appearance of increased vibrations is the dynamic imbalance (dynamic imbalance) of one or more engine rotors. Dynamic unbalance in its turn is a cumulative manifestation of static and moment unbalance of the rotor.

One of the reasons for the appearance of unacceptable values of rotor imbalances is the imperfection of the geometric parameters of the parts, that is, the manufacturing errors of these parts. Despite the fact that at present there are strict requirements for the accuracy of manufacturing parts of a gas turbine engine, it is impossible to manufacture a part without errors.

When joining several rotors, the summing errors in the manufacture of parts may lead to a shift in the center of mass of the rotors, as well as to a misalignment of their axes, which in turn leads to an increase in the imbalances of the assembled rotor. As a result of the vibration of the assembled engine significantly exceed the permissible.

The problem of the influence of errors in the manufacture of parts on the unbalances of the gas turbine engine rotor during its assembly is analyzed. A review analysis of the methods for solving this problem, presented in modern scientific papers, is carried out. A technique for 3D modeling of the GTE rotor assembly is given, taking into account the beat vectors to predict the static and moment imbalances of the assembled rotor. Based on the simulation results, the displacements of the center of mass of the analyzed rotor and the distortions of its axis are calculated for different positions of the beat vectors. The conclusion is made about the expediency of applying the considered methodology in the design of modern gas turbine engine.

**Keywords:** gas turbine engine, vibration, imbalance, rotor, detail, assembly, end and radial runouts, manufacturing error, assembly, 3D modeling.

При работе газотурбинного двигателя (ГТД) могут возникать значительные вибрации, которые отрицательным образом сказываются на работоспособности как отдельных узлов, так и всего двигателя в целом, снижая надежность и общий срок службы двигателя. Причины появления виб-

рации ГТД, способы борьбы с ними, а также последствия, к которым могут привести повышенные вибрации, описаны в работах [1–3].

Основная причина появления вибрации – динамическая неуравновешенность одного или нескольких роторов двигателя, которая представляет собой отклонение оси вращения этого ротора от центральной оси инерции (ЦОИ), проходящей через центр масс ротора.

Динамическая неуравновешенность ротора, приводящая к повышенным вибрациям, является совокупным проявлением статической и моментной неуравновешенности. При статической неуравновешенности центральная ось инерции смещается относительно оси вращения ротора на величину  $e$ , называемую эксцентриситетом (ось вращения параллельна главной оси инерции). При моментной неуравновешенности центральная ось инерции пересекается с осью вращения ротора под некоторым углом  $\varphi$  (перекос оси ротора). При динамической неуравновешенности центр масс ротора смещается сразу в двух направлениях – вдоль оси в сторону одной из опор и в направлении, перпендикулярной к оси вращения плоскости.

В настоящее время к изготовлению деталей ГТД предъявляются жесткие требования, одно из которых – обеспечение максимально возможной в производстве точности. Тем не менее изготовить идеально точную деталь невозможно, поэтому при проектировании деталей на их размеры накладываются допуски, значения которых показывают, в каких диапазонах может изменяться размер изготавливаемой детали, т. е. с какой максимальной погрешностью данная деталь может быть изготовлена.

Роторы ГТД состоят из большого количества деталей: валов, дисков, промежуточных колец, проставок, дефлекторов, лабиринтных уплотнений и других. При сборке ротора или, например, при стыковке двух роторов, когда детали роторного пакета последовательно базируются и крепятся друг к другу, погрешности их изготовления суммируются также последовательно.

Значительнее других в данном случае оказывают влияние допуски торцевых и радиальных биений, которые являются совместным проявлением отклонений формы и расположения поверхностей.

Суммирование погрешностей изготовления деталей при сборке приводит к тому, что параметры собранного ротора не соответствуют заданным требованиям. Для решения данной проблемы роторы двигателя иногда перебирают несколько раз, проводят многократную балансировку и доработку деталей. В некоторых случаях проводят полную раскомплектовку ротора и перестыковку всех деталей ротора.

Кроме этого, немаловажную роль играют и зазоры в посадках при сборке роторов. Слишком большие значения зазоров могут стать причиной увеличения дисбалансов ротора, так как будут являться причиной смещения центра масс ротора.

Проблема влияния погрешностей изготовления деталей на качество сборки роторов ГТД актуальна в настоящее время, поэтому она рассматривается во многих современных научных работах.

В работе [4] на примере газогенераторов различных ГТД рассматривается несколько способов достижения минимального значения несоосности элементов ротора газогенератора, в том числе – уменьшение количества и повышение точности деталей, входящих в силовую схему ГТД, а также проверка торцевого биения при контроле вращения ротора относительно статора.

В работах [5, 6] предлагается обеспечивать требуемое качество сборки и допустимые значения дисбалансов роторов путем индивидуального подбора собираемых деталей методом компьютерного (построение математической модели) моделирования.

В работе [7] описывается способ построения математических моделей сборочного процесса, который позволяет создавать управляемый процесс сборки с помощью влияния на суммирование погрешностей (виртуальная сборка).

Методика, описанная в работе [8] и направленная на повышение качества и снижение суммарных погрешностей сборки, основана на построении и расчете 3D-моделей деталей. Данный способ позволяет уже на начальном этапе создания конструкции достичь требуемых параметров.

В работе [9] для повышения качества сборки роторов предлагается методика уравнивающей сборки, при которой проводится процесс управления векторами локальных дисбалансов и эксцентриситетов.

В работе [10] предлагается специальный метод сборки узлов авиационного двигателя, позволяющей контролировать осевые зазоры с помощью построения и расчета плоских размерных цепей.

В настоящей работе проводится исследование влияния допусков торцевых и радиальных биений на статический и моментный дисбаланс ротора ГТД при его сборке. Цель работы заключается в разработке методики, которая позволит, задав торцевые и радиальные биения деталей ротора, спрогнозировать значения дисбалансов собранного ротора.

### Объект исследования

Наиболее остро проблема влияния погрешностей изготовления деталей на дисбалансы ротора ГТД проявляется при стыковке двух роторов: появляется эксцентриситет одного или сразу двух роторов, а также нарушается взаимное положение роторов друг относительно друга (несоосность валов этих роторов и перекося оси одного ротора относительно оси другого). В результате собранный ротор имеет значительные отклонения статического и моментного дисбалансов от допустимых значений, т. е. ротор динамически неуравновешен, что является причиной повышенной вибрации всего двигателя.

На рис. 1 приведен элемент ротора газогенератора ГТД, состоящий из двух роторов – ротора компрессора высокого давления (КВД) и ротора турбины высокого давления (ТВД), а также деталей, обеспечивающих соединение и фиксацию этих роторов. Описание конструкции, а также процесс сборки и разборки данного ротора показан в [11–13].

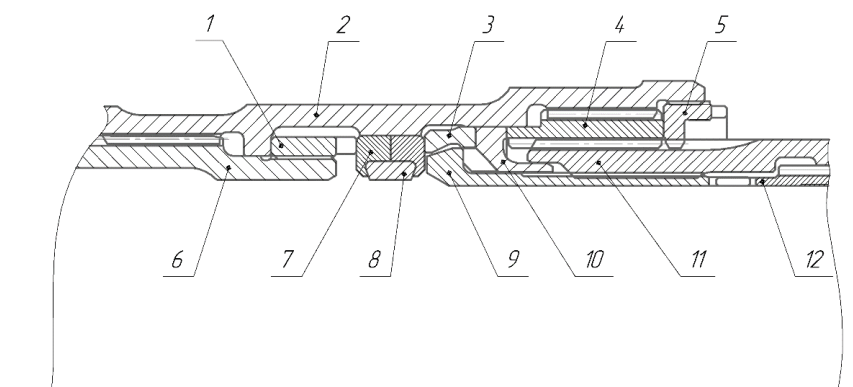


Рис. 1. Место соединения роторов КВД и ТВД: 1 – гайка вала КВД; 2 – вал привода КВД; 3 – кольцо контролочное; 4 – втулка соединительная (штицевая); 5 – гайка вала привода; 6 – вал КВД; 7 – обойма; 8 – Втулка; 9 – втулка стяжная; 10 – кольцо сферическое; 11 – вал ТВД; 12 – втулка контролочная

В настоящей работе будет смоделирован данный ротор газогенератора и проведен анализ влияния торцевых и радиальных биений деталей на смещение центра масс вала ротора ТВД (эксцентриситет) и перекося его оси относительно оси вала КВД.

### Методика 3D-моделирования сборки ротора с учетом векторов торцевых и радиальных биений деталей

Для оценки влияния несовершенства изготовления деталей на статические и моментные дисбалансы ротора предлагается методика, основанная на 3D-моделировании сборки ротора ГТД с учетом векторов торцевых и радиальных биений деталей.

Методика исследования заключается в следующем:

- 3D-моделирование деталей, влияние параметров которых на смещение центра масс и перекося оси ротора ТВД необходимо оценить;
- задание моделям деталей допусков торцевых и радиальных биений;

- виртуальные сборки ротора с учетом заданных допусков. При каждой сборке ротора изменяются угловые положения деталей (углы выбираются произвольным образом) для того, чтобы векторы биений были ориентированы под различными углами в пространстве с целью набора статистических данных для дальнейшего исследования;

- при каждой сборке ротора замеряется положение центра масс вала ТВД (для расчета статического дисбаланса), а также измеряется перекося оси вала ТВД относительно оси вала КВД (для расчета моментного дисбаланса).

На рис. 1 приведен чертеж места соединения двух роторов, которое было смоделировано в ходе проведения исследования. В качестве исходных данных принимались чертежи деталей. Так как все детали представляют собой тела вращения, построение их 3D-моделей выполняется по одному принципу – при помощи вращения эскиза.

В качестве примера показаны построенные 3D-модели вала КВД и вала ТВД (рис. 2, *а*, рис. 2, *б*), втулки шлицевой (рис. 3, *а*) и вала привода КВД (рис. 3, *б*).

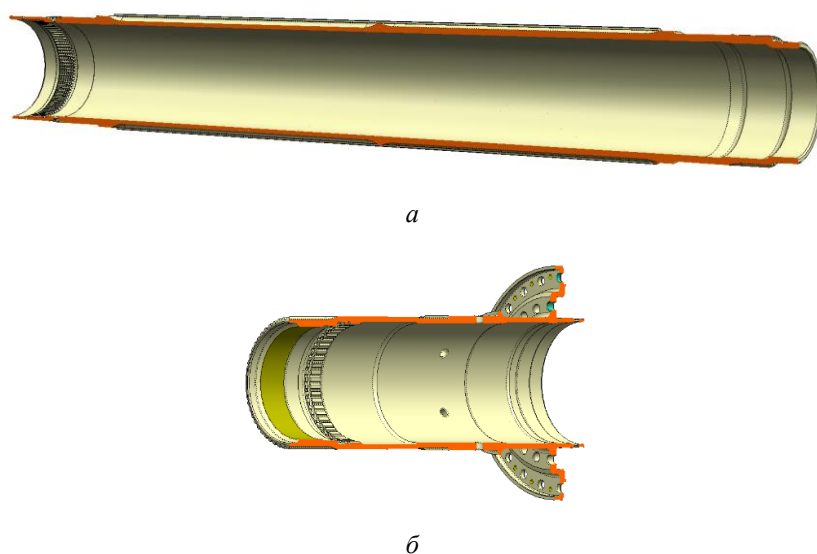


Рис. 2. 3D-модели деталей: *а* – вал КВД; *б* – вал ТВД

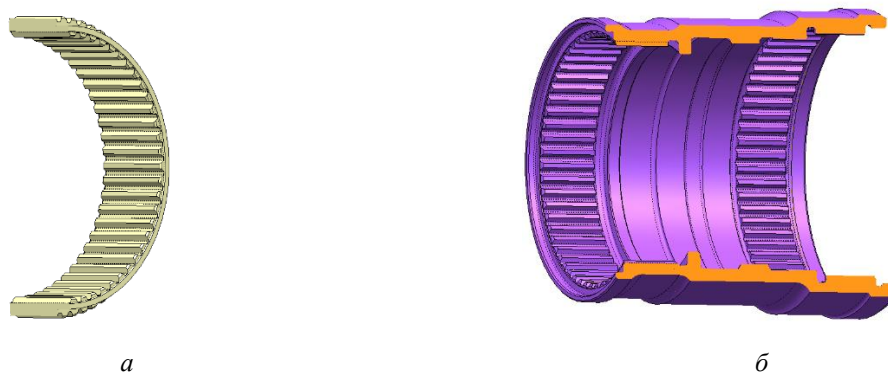


Рис. 3. 3D-модели деталей: *а* – втулка шлицевая; *б* – вал привода КВД

Указанные детали (см. рис. 2, 3) в радиальном направлении сопрягаются по шлицам. Сами по себе шлицы являются наиболее ответственными и трудно контролируемыми поверхностями в конструкции детали. Даже небольшие значения радиальных биений шлицев приводят к значительному смещению центра масс (эксцентриситету) как самих деталей, так и всего собранного

ротора. Анализ влияния неблагоприятного сочетания допусков шлицевых поверхностей деталей на работу узлов ГТД рассмотрен в [14].

Радиальные биения деталей моделировались с помощью инструмента, позволяющего перемещать поверхность детали на определенную величину в радиальном направлении. Величина перемещения в данном случае задается как половина допуска радиального биения. Радиальная поверхность переносится в направлении оси  $z$ . Торцевые биения моделировались путем построения дополнительной плоскости (удаленной от поверхности на величину допуска) на торцевой поверхности детали.

Торцевые и радиальные биения моделировались на поверхностях, которые являются сопрягаемыми (см. рис. 1). Их величины задавались согласно конструкторской документации на каждую деталь. Окончательная модель собранного ротора для дальнейшего исследования показана на рис. 4.

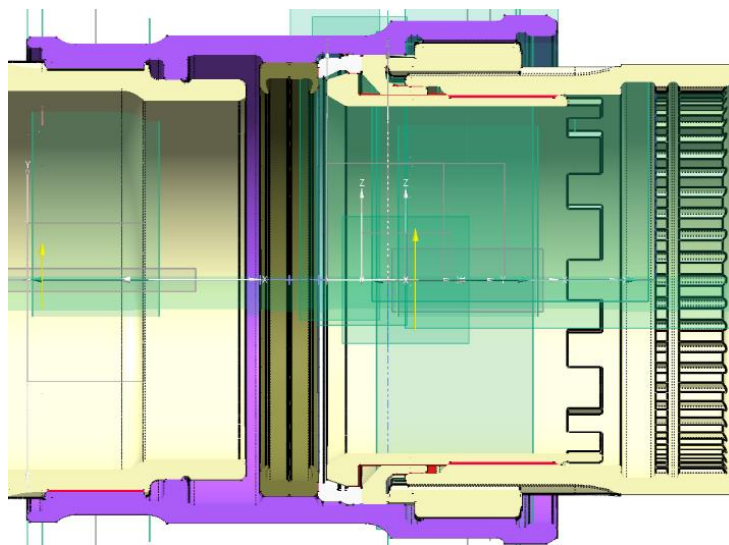


Рис. 4. Модель собранного ротора для исследования

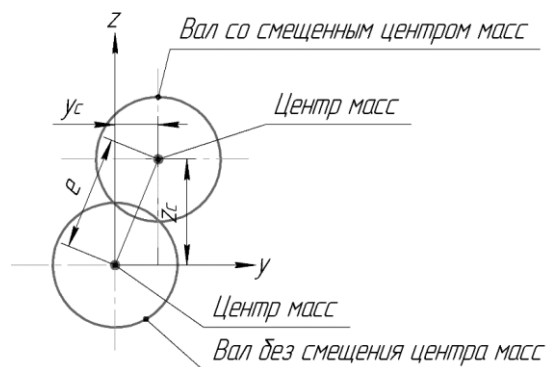


Рис. 5. Схема для определения эксцентриситета ротора

### Результаты моделирования

В данной работе проводилось исследование влияния биений на эксцентриситет и перекос оси вала ТВД относительно вала КВД. Величина смещения центра масс ротора ТВД (эксцентриситета) рассчитывалась следующим образом. Сначала программой были вычислены координаты центра масс ротора ТВД в собранном роторе газогенератора в трех проекциях:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Величина смещения центра масс (эксцентриситета  $e$ ) в данном случае определяется согласно схеме, приведенной на рис. 5, и формуле

$$e = \sqrt{y_c^2 + z_c^2}, \quad (1)$$

где  $y_c$  – расстояние между центрами масс в проекции на ось  $y$ ;  $z_c$  – расстояние между центрами масс в проекции на ось  $z$ .

Для измерения перекоса оси ротора были выполнены измерения плоского угла между осью вращения  $x$  и осью вала ТВД.

Результаты расчета смещения центра масс вала ТВД и перекоса оси вала ТВД при различных виртуальных сборках ротора (при произвольных углах постановки деталей) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Полученные смещения центра масс и перекосы оси вала ТВД

№ сборки ротора	Смещение центра масс вала ТВД, мм	Перекося оси вала ТВД, град
1	0,04933	1,43721
2	0,04897	1,53623
3	0,02351	1,94353
4	0,05357	1,05435
5	0,05012	1,22565
6	0,01884	1,26020
7	0,02632	0,57576
8	0,02002	2,98429
9	0,03080	0,76057
10	0,02146	2,75817
11	0,02884	2,98429
12	0,01124	0,76057
13	0,02568	2,75817
14	0,04299	2,52507
15	0,04974	0,10467
16	0,01236	2,90902
17	0,04023	1,67394
18	0,03034	0,04799
19	0,01245	0,27941
20	0,02386	2,83244

Таблица 2

Полученные статические и моментные дисбалансы ротора ТВД

№ сборки ротора	Статический дисбаланс $Q_{ст}$ , г·мм	Моментный дисбаланс $Q_m$ , кг·м <sup>2</sup> ·рад
1	9126	0,18587
2	9060	0,19868
3	4349	0,25135
4	9911	0,13636
5	9272	0,15851
6	3485	0,16298
7	4869	0,07446
8	3704	0,38595
9	5698	0,09836
10	3971	0,35671
11	5336	0,38595
12	2080	0,09836
13	4751	0,35671
14	7952	0,32656
15	9202	0,01354
16	2287	0,37622
17	7443	0,21649
18	5613	0,00621
19	2302	0,03614
20	4414	0,36632

От значений эксцентриситета и перекоса оси ротора можно легко перейти к статическому и моментному дисбалансам, тем самым, выявив связь между биениями и дисбалансами, а значит, и вибрациями ротора.

Статический дисбаланс ротора  $Q$ , зависящий от величины смещения центра масс (эксцентриситета) рассчитывается по формуле

$$Q = me, \quad (2)$$

где  $m$  – масса ротора, г;  $e$  – смещение центра масс ротора (эксцентриситет), мм.

Моментный дисбаланс  $T$  ротора, зависящий от перекоса оси ротора, рассчитывается по формуле

$$T = I\varphi, \quad (3)$$

где  $I$  – главный момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – перекоз оси ротора, рад.

Результаты расчета дисбалансов по формулам (2) и (3) приведены в табл. 2.

Анализируя результаты расчетов дисбалансов, можно сделать вывод, что как статические, так и моментные дисбалансы ротора принимают довольно большие значения при всех сборках ротора. Это можно объяснить следующими причинами:

- при построении модели ротора использовались только максимальные допуски торцевых и радиальных биений (взяты из конструкторской документации), что привело к максимальным значениям смещения центра масс ротора ГТД и перекосу оси ротора ГТД, а значит, и к максимальным значениям дисбалансов. Приведенные расчеты выполнены для иллюстрации серьезности влияния рассматриваемых в работе конструктивных факторов на дисбалансы;
- в работе рассматривались только начальные дисбалансы ротора, полученные расчетным путем. Для снижения дисбалансов ротора ГТД балансируют, а значения остаточных дисбалансов (дисбалансы после балансировки) должны быть значительно ниже начальных дисбалансов. Например, к роторам современных ГТД предъявляются требования, согласно которым допустимый остаточный дисбаланс ротора должен составлять не более 100...200 г·мм в зависимости от плоскостей коррекции;
- кроме перечисленных выше причин, стоит отметить, что при увеличении размеров выборок и использовании реальной информации о разбросе производственных параметров (биения деталей), методика, разработанная в данной работе, позволит оценивать дисбаланс ротора намного точнее.

### Выводы

Несмотря на то что в настоящее время к точности изготовления деталей ГТД предъявляются самые жесткие требования, при сборке роторов происходит последовательное суммирование погрешностей изготовления деталей, что приводит к резкому снижению качества собранной конструкции. В результате собранный ротор оказывается динамически неуравновешен, его дисбаланс значительно превышает допустимый, что является причиной повышенных вибраций всего двигателя.

Для решения данной проблемы предлагаются различные методики, применяющиеся в современном машиностроении, основанные, как правило, на автоматизированном расчете параметров, влияющих на неуравновешенное состояние ротора.

Предлагается методика оценки влияния допусков торцевых и радиальных биений на статический и моментный дисбаланс ротора ГТД, основанная на 3D-моделировании сборки ротора с учетом различного положения векторов биений в пространстве. Данная методика позволяет, задав биения деталей, рассчитать смещение центра масс и перекоз оси ротора ГТД для дальнейшего расчета дисбалансов и вибраций ротора уже на этапе проектирования. Кроме этого, методика позволяет спрогнозировать значения дисбалансов от биений для реального двигателя для того, чтобы в конечном итоге внести изменения в уже существующую конструкцию.

Однако использование только описанного подхода не может быть единственно верным, так как на неуравновешенное состояние ротора двигателя влияют и множество других, не менее важных, факторов. Например, в работе [15] описаны возможные погрешности, которые могут возникать не только при изготовлении деталей и сборке роторов, но и при их балансировке. Поэтому рассматриваемая проблема требует разностороннего анализа и комплексного решения.

### Библиографический список

1. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / ред. В.Н. Челомей. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В.В. Болотина. – 352 с.
2. Арянин Б.В. Статическая и динамическая балансировка газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1967. – 70 с.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 4. – 192 с.
4. Семериков И.А. Обеспечение соосности опор ротора газогенератора в конструкциях современных авиационных двигателей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 112–124.
5. Непомилуев В.В., Семенов А.Н. Компьютерное моделирование процесса сборки как способ обеспечения его качества // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. – 2020. – № 1. – С. 153–157.
6. Непомилуев В.В., Семенов А.Н. Перспективные направления совершенствования качества сборки изделий машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8–2. – С. 71–78.
7. Тимофеев М.В., Тимофеева Е.В. Повышение эффективности процессов сборки роторов газотурбинных двигателей на основе технологии их имитационного моделирования // Известия МГТУ. – 2014. – № 1(19). – С. 184–186.
8. Примак Д.Д., Волков И.А., Масыгин В.Б. Методика расчета размерного анализа конструкций для деталей типа тел вращения с применением геометрических моделей деталей // Омский научный вестник. – 2017. – № 6 (156). – С. 28–32.
9. Белобородов С.М., Цельмер М.Л. Информационное обеспечение сборки роторов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 4(51). – С. 74–81.
10. Епифанов Р.А. Сборка узлов (модулей) авиадвигателя Д-36 с использованием плоских размерных цепей // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. – № 160. – С. 120–124.
11. Нихамкин М.А., Зальцман М.М. Конструкция основных узлов двигателя ПС-90А: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – 108 с.
12. Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы. – М.: Машиностроение, 2005. – 336 с.
13. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.
14. Высотский А.В., Иванов А.В. Анализ работы узла турбины газотурбинного двигателя при неблагоприятном сочетании допусков на основе контактной задачи метода конечных элементов // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 3 (43). – С. 67–70.
15. Рьженков В.М., Тихомиров В.В. Погрешности балансировки роторов газотурбинных двигателей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Т. 15, № 2. – 2019. – С. 145–150.

### References

1. V.N. Chelomey. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik [Vibration with technique: Reference book in 6 vols]. – Vol.1 Kolebaniya lineynykh sistem [Oscillations of linear systems]. Moscow: Mashinostroeniye, 1978, 352 p.
2. Aryanin B.V. Statischeckaya i dinamichesckaya balansirovka gazovykh turbin [Static and dynamic balancing of gas turbines]. Moscow: Mashinostroeniye, 1967, 70 p.
3. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Aircraft engine and power generation gas turbine development fundamentals]. Moscow: Mashinostroeniye, 2008, Vol. 4, 192 p.
4. Semerikov I.A. Ensuring the engine core bearing support alignment of modern aero-engines // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2014, no.37, pp. 112-124.
5. V.V. Nepomiluev, A.N. Semenov. Kompyuternoye modelirovaniye protsesssa sborki kak sposob obespecheniya yego kachestva [Computer simulation of the assembly process as a way to ensure its quality]. Technical operation of water transport: problems and ways of development, 2020, No. 1, pp. 153-157.
6. V.V. Nepomiluev, A.N. Semenov. Perspektivn-yye napravleniya sovershenstvovaniya kachestva sborki izdeliy mashinostroyeniya [Promising directions for improving the quality of assembly of engineering products]. Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU), 2016, no. 8–2, pp. 71-78.



7. M.V. Timofeev, E.V. Timofeeva. Povysheniye effektivnosti protsessov sborki rotorov gazoturbinnnykh dvigateley na osnove tekhnologii ikh imitatsionnogo modelirovaniya [Improving the efficiency of assembly processes for gas turbine engine rotors based on simulation technology]. *Izvestiya MGTU*, 2014, No. 1(19), pp. 184-186.

8. D.D. Primak, I.A. Volkov, V.B. Masyagin. Metodika rascheta razmernogo analiza konstruksiy dlya detaley tipa tel vrashcheniya s primeneniyyem geometricheskikh modeley detaley [Method for calculating the dimensional analysis of structures for parts such as bodies of revolution using geometric models of parts]. *Omsk Scientific Bulletin*, 2017, No. 6 (156), pp. 28-32.

9. Beloborodov S.M. Information support for the assembly of rotors / S.M. Beloborodov, M.L. Tselmer / *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, no.4 (51), pp. 74-81.

10. Yefifanov R.A. Sboraka uzlov (moduley) aviadvigatelya D-36 s ispolzovaniyyem ploskikh razmernykh tsepey [Assembly units (modules) the aengine D-36 with use circuits flat]. *Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA)*, 2010, no.160, pp. 120-124.

11. Nikhamkin M.A., Zaltsman M.M. Konstruksiya osnovnykh uzlov dvigatelya PS-90A: ucheb. posobiye [The design of the main components of the PS-90A engine: tutorial]. Perm, Perm State Technical University, 2002, 108 p.

12. Zrelou V.A. Otechestvennyye gazoturbinnnyye dvigateli. Osnovnyye parametry i konstruktivnyye skhemy [Domestic gas-turbine engines. Key parameters and design concepts]. Moscow: Mashinostroeniye, 2005, 336 p.

13. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Aircraft engine and power generation gas turbine development fundamentals]. Moscow: Mashinostroeniye, 2008, Vol. 2, 368 p.

14. Vysotsky A.V., Ivanov A.V. Analiz raboty uzla turbiny gazoturbinnogo dvigatelya pri neblagopriyatnom sochetanii dopuskov na osnove kontaktnoy zadachi metoda konechnykh elementov [Analysis of turbine unit operation of gas turbine engine with unfavorable tolerance combination on the basis of fem contact problem]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2010, no.3 (43), pp. 67-70.

15. Ryzhenkov V.M., Tikhomirov V.V. Pogreshnosti balansirovki rotorov gazoturbinnnykh dvigateley [Balancing errors of rotors of gas turbine engines]. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, vol. 15, 2019, no.2, pp. 145-150.

#### Об авторах

**Сайнаков Даниил Геннадьевич** (Пермь, Россия) – инженер отдела исследования вибрации, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614010, Комсомольский пр., 93, e-mail: sainakov-dg@avid.ru).

**Будницкий Илья Леонидович** (Пермь, Россия) – инженер отдела исследования вибрации, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614010, Комсомольский пр., 93, e-mail: budnickiy-il@avid.ru).

**Козлов Артем Павлович** (Пермь, Россия) – начальник отдела исследования вибрации, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614010, Комсомольский пр., 93, e-mail: kozlov-ap@avid.ru).

#### About the authors

**Daniil G. Sainakov** (Perm, Russian Federation) – Vibration Research Engineer, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614010, Perm, e-mail: sainakov-dg@avid.ru).

**Ilya L. Budnickiy** (Perm, Russian Federation) – Vibration Research Engineer, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614010, Perm, e-mail: budnickiy-il@avid.ru).

**Artem P. Kozlov** (Perm, Russian Federation) – Head of Vibration Research Department, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614010, Perm, e-mail: kozlov-ap@avid.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 31.05.2022

Одобрена: 20.06.2022

Принята к публикации: 10.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Сайнаков, Д.Г. Влияние погрешностей изготовления деталей на дисбалансы ротора газотурбинного двигателя при его сборке / Д.Г. Сайнаков, И.Л. Будницкий, А.П. Козлов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* – 2022. – № 70. – С. 41–49. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.04

Please cite this article in English as: Sainakov D.G., Budnickiy I.L., Kozlov A.P. Influence of errors in the manufacture of parts on the imbalances of the gas turbine engine rotor during its assembly. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 70, pp. 41-49. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.04