

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.02

УДК 621.452, 004.94

Е.Ю. Печенина, М.А. Болотов, В.А. Печенин

Самарский университет, Самара, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ РАБОЧИХ КОЛЕС КОМПРЕССОРА

Статья направлена на совершенствование технологий комплектации рабочих колес компрессора. Одним из ключевых параметров качества сборки компрессорных лопаток является равномерность натягов в соединении антивибрационных полок лопаток. Авторами разработан алгоритм для комплектации лопаток в рабочем колесе компрессора, позволяющий добиться снижения величин натяга и равномерности их распределения. Ядром алгоритма является разработанная математическая модель для расчета площадей натягов антивибрационных полок со стороны спинки и корыта, вычисляемых на основании контролируемых отклонений пера и антивибрационной полки. По вычисляемым площадям лопатки сортируются по возрастанию площади натяга со стороны спинки и по убыванию со стороны корыта. На завершающем этапе производится расстановка лопаток путем последовательного их выбора из двух рядов, каждую следующую лопатку размещают в корпусе рядом с ранее установленными лопатками с изменением направления обхода. Алгоритм реализован на языке Python, проведено 1000 вычислительных экспериментов, в которых моделировалось отклонение параметров для 84 лопаток комплекта. Работа алгоритма сравнивалась с расстановкой лопаток в случайном порядке. В результате среднеквадратическое отклонение возникающих натягов снизилось с 0,54 до 0,132 мм².

Ключевые слова: рабочая лопатка, натяг, алгоритм, математическая модель, качество, компрессор, допуск, площадь, сборка, двигатель.

E.Yu. Pechenina, M.A. Bolotov, V.A. Pechenin

Samara University, Samara, Russian Federation

DEVELOPMENT OF THE COMPRESSOR IMPELLER CONFIGURATION ALGORITHM

The article addresses the improvement of compressor impeller configuration methods. One of the key parameters of compressor blade assembly quality is the uniform tension in the blade shroud joint. The authors have developed an algorithm for arranging the blades in the compressor impeller, which allows reducing the tension and ensures its uniform distribution. The algorithm kernel is based on a mathematical model developed for calculating shroud tension areas on the suction side and pressure side based on controlled deviations of the airfoil and shroud. The computed areas are used to sort the blades by the increasing tension area on the suction side and the decreasing one on the pressure side. At the final stage, the blades are arranged by their successive choice from among two rows and each next blade from the rows is installed in the casing, next to the pre-installed blades, with the change in the bypass direction. The algorithm is written in Python; 1,000 computing experiments were made to simulate the deviation of the parameters for 84 blades in the set. The algorithm function was compared to the arbitrary arrangement of the blades. As a result, the root-mean-square deviation of the originating tensions decreased from 0.54 mm² to 0.132 mm².

Keywords: blade, preload, algorithm, mathematical model, quality, compressor, tolerance, area, assembly, engine.

В условиях растущей конкуренции на рынках наукоёмкой продукции требуется сведение к минимуму времени разработки до начала производства, значительное снижение себестоимости при обеспечении всех требований к качеству. Для обеспечения высокого качества в производстве можно или уменьшать допуски на изготовление отдельных деталей, или повышать качество сборки изделия. В рамках традиционных методов оба направления ведут к существенному повыше-

нию трудоемкости и, как следствие, стоимости. Например, на стадии сборки процесс суммирования погрешностей составляющих звеньев размерных цепей (представляющих собой размеры деталей в сборке) является неуправляемым, а значит, случайным [1]. Это приводит к тому, что сборочные параметры случайно распределены внутри некоторой области. Кроме того, традиционные методы предполагают наличие длительного периода отработки конструкторских и технологиче-

ских решений. Значимой научно-технической проблемой является проблема повышения качества изделий в условиях ресурсных ограничений, включающих время производства и денежные затраты [2]. Особенные трудности в изготовлении и сборке авиационного двигателя вызывают роторы и статоры компрессоров и турбин [3].

Традиционно комплектацию лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) выполняют вручную с использованием специальных методик (сортировка по массе или по нескольким геометрическим параметрам). В серийных производствах часто применяют методы расстановки лопаток, основанные на одном или нескольких параметрах их отклонений. Когда отклонений несколько, используют комбинацию данных отклонений, получая комплексный параметр [4]. Лопатки сортируют по выбранному критерию и расставляют в соответствии с ним. Например, в [5] предложен способ расстановки лопаток по измеренным радиальному и тангенциальному статистическому моментам, по которым лопатки классифицируют в пары и последовательно устанавливают с диаметрально противоположным расположением лопаток. В работе [6] предлагается способ расстановки сопловых лопаток ГТД осуществлять путем их размещения в корпусе по итогам измерений площади горла решетки. На каждой лопатке измеряют площади горла решетки со стороны корыта и со стороны спинки. Лопатки сортируют по возрастанию или убыванию площади горла решетки по корыту или спинке, располагают их в ряд с максимальной или минимальной площадью горла решетки, каждую следующую лопатку из ряда размещают в корпусе рядом с установленными с изменением направления обхода.

Использование ручной комплектации приводит к необходимости выполнения переборок узлов и характеризуется неоптимальностью достигаемых эксплуатационных параметров [7; 8]. В частности, при испытании двигателя из-за наличия высоких натягов в местах стыков антивибрационных полок может и происходить вылет одной из лопаток в

диске компрессора, что приводит к браку всех лопаток в диске и соседних дисках.

Новые расчётные цифровые методы призваны преодолеть технологический барьер по повышению качества ответственных высоконагруженных лопаточных венцов при одновременном снижении затрат на их производство [9]. Для этого необходима разработка принципов и методов, позволяющих учитывать действительную геометрию [10; 11] рабочих поверхностей лопаток в ходе выполнения их сборки. Действительная геометрия деталей в производстве получается по результатам измерений [12–15], в том числе при внедрении цифровых методов на первых этапах можно не менять саму методологию измерений, использовать получаемые в настоящее время данные по отклонениям.

Целью статьи является повышение точности и снижение трудоемкости сборки рабочих колёс компрессоров за счёт разработки алгоритма расстановки рабочих лопаток, позволяющего снизить неравномерность натягов в местах контакта антивибрационных полок.

Описание разработанного алгоритма расстановки лопаток

Номинальные размеры и допуски на изготовление лопаток предполагают наличие натяга между антивибрационными полками, его величина определяется конструктором. Натяги определяются сочетанием геометрических отклонений соседних лопаток, а также геометрическими отклонениями пазов, в которые они вставляются. На рис. 1 приведен лопаточный венец без диска.

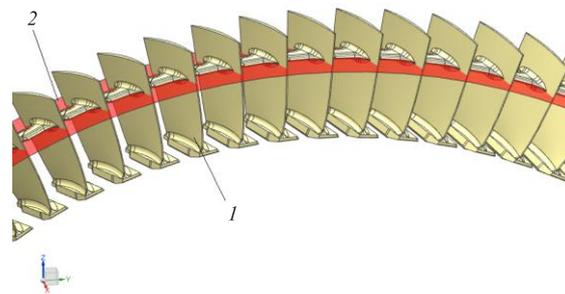


Рис. 1. Сборка лопаточного венца компрессора: 1 – лопатка; 2 – сечение в месте антивибрационной полки

Если рассечь лопатку 1 на высоте антивибрационной полки цилиндрической поверхностью, концентричной оси вращения ротора, и сделать развертку сечения на плоскость, то получится плоский срез в месте антивибрационной полки, где и происходит стык лопаток. В разработанном алгоритме центральное место занимает модель для расчета возникающих натягов лопаток.

Разработка модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке

Исходными данными, получаемыми в производстве для выполнения расстановки рабочих лопаток, являются: а) фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток (l_{sp}); б) фактические значения угла касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии (γ_b). Ввиду наличия только двух параметров, модель оценки натягов можно представить как задачу на плоскости. На рис. 2 приведена развертка на плоскости сечения лопатки в месте антивибрационной полки.

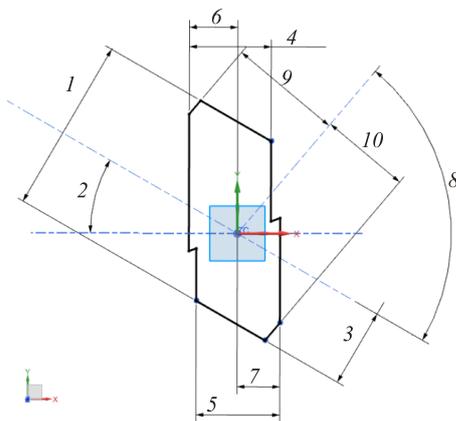


Рис. 2. Сечение лопатки в месте антивибрационной полки: 1 – l_{sp} ; 2 – γ_b ; 3 – l_p ; 4 – t_s ; 5 – t_p ; 6 – t_{hp} ; 7 – t_{hs} ; 8 – α_s ; 9 – d_s ; 10 – d_p

Для построения модели необходимо, кроме контролируемых параметров, использовать дополнительные геометрические пара-

метры, заданные в конструкторской модели, а именно: расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p ; толщина полки со стороны спинки t_s и часть этой толщины со стороны входной кромки до оси t_{hs} ; толщина полки со стороны корыта t_p и часть этой толщины со стороны выходной кромки до оси t_{hp} ; угол среза полок α_s ; расстояние до плоскости среза со стороны спинки d_s и корыта d_p .

Модель оценки натягов по антивибрационным полкам основана на расчете площадей пересечения двух соседних лопаток в двумерной постановке. Изменение площадей зависит от параметров l_{sp} и γ_b . На рис. 3 приведена геометрическая интерпретация модели оценки натягов.

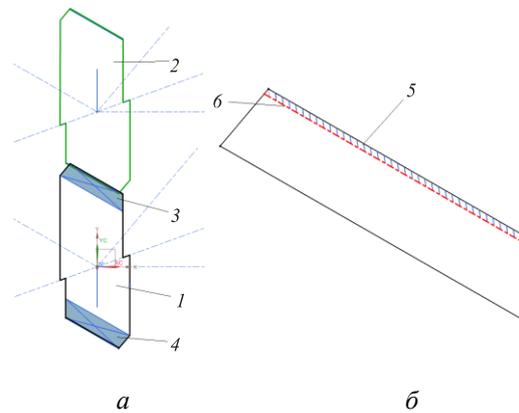


Рис. 3. Модель собранного состояния двух лопаток: а) 1 – первая лопатка, 2 – вторая лопатка, 3 – площадь со стороны спинки; 4 – площадь со стороны корыта; б) площадь со стороны спинки; 5 – площадь натяга; 6 – линия натяга

Модель сводится к расчету площадей натяга между лопатками. Натяг G между двумя лопатками (со стороны корыта первой лопатки S_{p1} и спинки второй S_{p2}) можно вычислить по формуле

$$G = S_{p1} + S_{p2}. \quad (1)$$

Для расчета площадей натяга вычисляются координаты точек четырехугольника, образованного пересечением антивибрационной полки с линией нулевого натяга b (рис. 3, б). В зависимости от параметров l_{sp} и γ_b вершины четырехугольника на рис. 3, б, представляющие собой часть анти-

вибрационной полки со стороны корыта, перемещаются. Линия нулевого натяга остается, и площадь натяга меняется.

Расчет любой площади натяга производится по формуле

$$S = d_1 \cdot d_2 \cdot \sin(\varphi) / 2, \quad (2)$$

где d_1, d_2 – диагонали получающегося четырехугольника; φ – угол между диагоналями.

В результате, используя в качестве входных параметров измеренные значения параметров l_{sp} и γ_b и конструкторские размеры, на выходе из модели для каждой лопатки рассчитываются величины площадей натяга, со стороны спинки и корыта. Опирируя данными массивами площадей и формулой (1) можно выполнить расстановку лопаток, при которой натяги между парами лопаток будут распределены равномерно.

Этапы алгоритма расстановки лопаток

Рассмотрим этапы разработанного алгоритма.

На первом этапе производится измерение параметров l_{sp} и γ_b лопаток.

На втором этапе вычисляются натяги для каждой лопатки с использованием разработанной модели, характеризующиеся величинами площадей превышения нулевого натяга S_p со стороны корыта и S_s со стороны спинки. Данные площади используются как ключевой параметр для их расстановки.

На третьем этапе производится сортировка лопаток по возрастанию площади натяга со стороны спинки и по убыванию со стороны корыта. Образуется два ряда упорядоченных по параметру площади лопаток.

На четвертом этапе выбирается первая по порядковому номеру лопатка из возрастающего ряда по величине S_s . Лопатка убирается из обоих рядов. Вторая лопатка выбирается, как первая, из убывающего ряда по величине S_p . Выбранная лопатка также убирается из обоих рядов. Каждую следующую лопатку (3, 4...N) из рядов размещают в корпусе рядом с ранее установленными лопатками с изменением направления обхода.

В качестве второй лопатки выбирают первую по порядковому номеру из оставшихся в возрастающем ряду по величине S_s . На рис. 4 схематично приведены лопатки и их порядковые номера в рядах S_s и S_p .

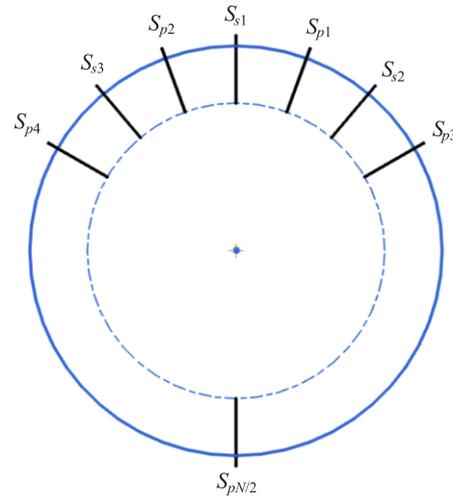


Рис. 4. Схема расстановки лопаток в корпусе

Блок-схема разработанной методики приведена на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма расстановки лопаток комплекта

Алгоритм, обозначенный на четвертом этапе разработанной методики, приведен на рис. 6.

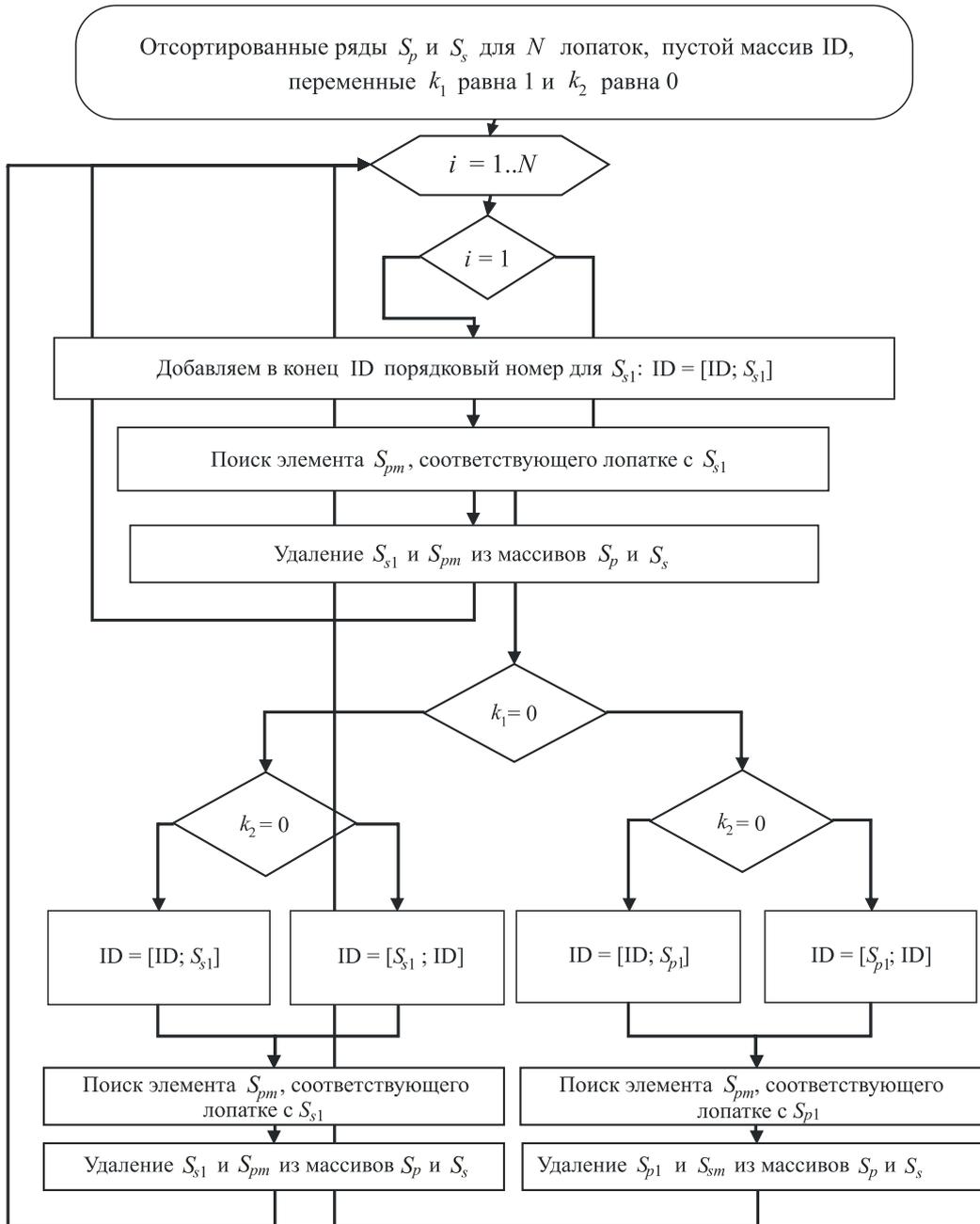


Рис. 6. Блок-схема этапа формирования массива порядковых номеров

С использованием разработанного алгоритма рассеивание натягов уменьшается, их величина становится более равномерной вдоль диска.

Проведение вычислительных экспериментов

Алгоритм был реализован на языке Python. Было проведено 1000 вычислительных экспериментов, в каждом из которых моделировалось отклонение параметров для вы-

бранного типа лопаток. Количество лопаток в комплекте составляет 84 штуки.

Номинальная величина натяга G_d составляет 0,5 мм, допуск на его изменение 0,2–1,1 мм. Допуск отклонения толщины l_{sp} составил от 0,1 до 0,15 мм; допуск отклонения угла γ_b составил от $-6'$ до $6'$ [16]. Моделирование параметров производилось по нормальному закону распределения. На рис. 7 приведены гистограммы отклонений этих двух параметров для одного комплекта.

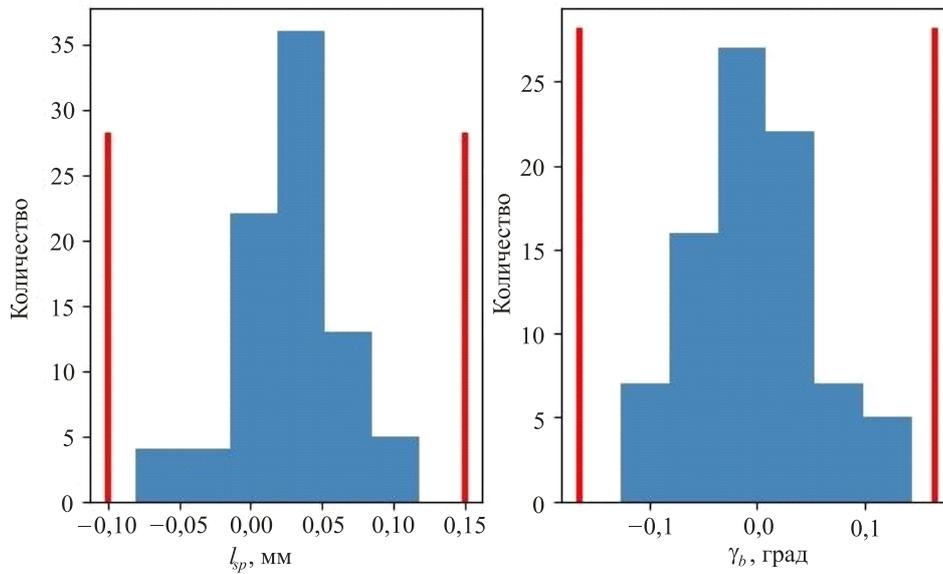


Рис. 7. Гистограммы отклонений для l_{sp} и γ_b

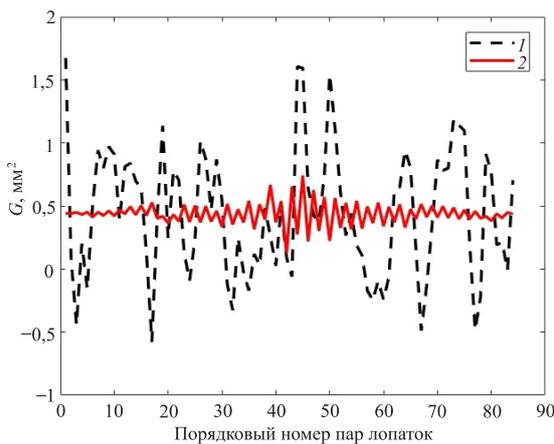


Рис. 8. Натяги между парами лопаток в комплекте:
 1 – до применения разработанной методики;
 2 – после применения разработанной методики

Результаты работы алгоритма сравнивались с результатами, полученными при случайной расстановке лопаток. Подход случайной расстановки заключается в использовании для комплектации случайного неупорядоченного массива лопаток. На рис. 8 приведен график изменения натягов при расстановке лопаток случайным образом и с применением разработанного алгоритма.

В таблице приведены полученные в результате экспериментов величины площадей натягов. Таблица служит обобщением всех

1000 экспериментов, т.е. приведенные максимальные \max_g , минимальные \min_g величины и среднеквадратические отклонения σ_g натягов в соединении вычислялись для всего множества реализаций отклонений.

Параметры при комплектации лопаток компрессора

Параметр	Расстановка лопаток случайным образом			Расстановка лопаток по разработанному алгоритму		
	\min_g	\max_g	σ_g	\min_g	\max_g	σ_g
$G, \text{мм}^2$	-1,791	2,746	0,540	0,323	1,033	0,132

Среднеквадратическое отклонение удалось снизить в четыре раза. Также разработанный алгоритм позволил расставить лопатки без превышения поля допуска на натяг.

Выводы

Измеренную геометрию можно использовать для проведения виртуальной сборки, т.е. создания набора адекватных цифровых математических моделей собранного изделия, учитывающих наиболее существенные свойства и процессы данного конкретного экземпляра какого-либо реального изделия. На основании подобного виртуального изделия можно определять сборочные геометрические и физические параметры до проведения реальной сборки и испытаний. Таким образом, тех-

нология виртуальной сборки позволяет сократить трудоемкость процесса и выбрать оптимальный вариант сборки, обеспечивающий требуемые показатели качества.

В частности, можно проводить комплектацию деталей на основании данных об их действительной геометрии. В то же время в разработанном алгоритме фактически не учитываются массы лопаток, ввиду того что в рассматриваемой ступени массы лопаток вно-

сят малый вклад в дисбаланс, который можно устранить на стадии окончательной балансировки. Тем не менее дальнейшим развитием является доработка модели для учета такого параметра, как масса лопатки. Используя разработанный алгоритм можно повысить качество процессов сборки компрессоров двигателя, сократив при этом трудоемкость проведения работ за счет исключения пробных сборок и снижения времени подбора лопаток.

Библиографический список

1. Безъязычный В.Ф., Непомилуев В.В. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 8. – С. 18–25.
2. A new type haptics-based virtual environment system for assembly training of complex products / P.J. Xia [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 58, № 1. – P. 379–396.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 365 с.
4. Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Makeев А.Б. Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – №7 (216). – С. 313–319.
5. Способ расстановки лопаток ротора турбомшины: пат. 2319841 Рос. Федерация / Бержер Даниэль (FR), Граншьер Жан-Луи (FR); заявл. 15.07.2003; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 23. – 6 с.
6. Способ расстановки сопловых лопаток газотурбинного двигателя: пат. 2397330 Рос. Федерация / Лебедев В.М., Коган Б.П., Виноградов А.В. – № 2008135854/06. заявл. 04.09.2008; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23. – 6 с.
7. A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods / H. Chen [et al.] // Computer-Aided Design. – 2014. – Vol. 53. – P. 1–13.
8. Непомилуев В.В., Майорова Е.А. Исследование возможности повышения качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путем учета компенсирующей способности деталей при использовании метода индивидуального подбора // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 9. – С. 11–14.
9. Безъязычный В.Ф., Непомилуев В.В. Технология виртуальной сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. – № 6. – С. 3–14.
10. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces / S. Samper [et al.] // Journal of computing and information science in engineering. – 2009. – Vol. 9. – № 4.
11. Mansuy M., Giordano M., Davidson J.K. Comparison of two similar mathematical models for tolerance analysis: T-map and deviation domain // Journal of Mechanical Design. – 2013. – Vol. 135. – № 10. – P. 101008.
12. Monchaud S. 2D and 3D image sensors // Traditional and Non-Traditional Robotic Sensors. – Springer, Berlin, Heidelberg, 1990. – P. 73–82.
13. Pahk H.J., Ahn W.J. Precision inspection system for aircraft parts having very thin features based on CAD/CAI integration // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1996. – Vol. 12, № 6. – P. 442–449.
14. Schneider M., Friebe H., Galanulis K. Validation and optimization of numerical simulations by optical measurements of tools and parts // International Deep Drawing Research Group. – 2008. – P. 327–332.
15. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity / O.V. Zakharov [et al.] // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2016. – Vol. 1. – P. 241–244.
16. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. – М., 1986. – 36 с.

References

1. Bez'yazychnyy V.F., Nepomiluyev V.V. Nekotoryye problemy sovremennogo sborochnogo proizvodstva i perspektivy ikh preodoleniya [Some problems of modern assembly production and prospects for overcoming them]. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2009, no. 8, pp. 18-25.
2. Xia P. J. et al. A new type haptics-based virtual environment system for assembly training of complex products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 379-396.
3. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Fundamentals of designing aircraft engines and power plants]. M.: Mashinostroyeniye, 2008, vol. 2, 365 p.
4. Osipovich D.A., Yarushin S.G., Makeyev A.B. Issledovaniye algoritmov podbora lopatok pri sborke soplovykh apparatov gazoturbinnogo dvigatelya [Investigation of the algorithms for the selection of blades during the assembly of gas turbine engine nozzles]. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2018, no. 7 (216), pp. 313-319.
5. Sposob rasstanovki lopatok rotora turbomashiny: pat. 2319841 Ros. Federatsiya / Berzher Daniel' (FR), Transh'yer Zhan-Lui (FR); zayavl. 15.07.2003; opubl. 20.03.2008. Byul. № 23. 6 p.
6. Sposob rasstanovki soplovykh lopatok gazoturbinnogo dvigatelya: pat. 2397330 Ros. Federatsiya. № 2008135854/06 / Lebedev V.M., Kogan B.P., Vinogradov A.V.; zayavl. 04.09.2008; opubl. 20.08.2010. Byul. № 23; 6 p.
7. Chen H. et al. A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods. *Computer-Aided Design*, 2014, vol. 53, pp. 1-13.
8. Nepomiluyev V.V., Mayorova E.A. Issledovaniye vozmozhnosti povysheniya kachestva izgotovleniya vysokotochnykh izdeliy mashinostroyeniya putem ucheta kompensiruyushchey sposobnosti detaley pri ispol'zovanii metoda individual'nogo podbora [Study of the possibility of improving the quality of manufacturing high-precision engineering products by taking into account the compensating ability of parts when using the method of individual selection]. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2009, no. 9, pp. 11-14.
9. Bez'yazychnyy V.F., Nepomiluyev V.V. Tekhnologiya virtual'noy sborki [Virtual assembly technology]. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2011, no. 6, pp. 3-14.
10. Samper S. et al. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces. *Journal of computing and information science in engineering*, 2009, vol. 9, no. 4.
11. Mansuy M., Giordano M., Davidson J. K. Comparison of two similar mathematical models for tolerance analysis: T-map and deviation domain. *Journal of Mechanical Design*, 2013, no. 10 (135), pp. 101008.
12. Monchaud S. 2D and 3D image sensors. *Traditional and Non-Traditional Robotic Sensors*. 1990, pp. 73-82.
13. Pahk H. J., Ahn W. J. Precision inspection system for aircraft parts having very thin features based on CAD/CAI integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1996, no. 6, pp. 442-449.
14. Schneider M., Friebe H., Galanulis K. Validation and optimization of numerical simulations by optical measurements of tools and parts. *International Deep Drawing Research Group*, 2008, pp. 327-332.
15. Zakharov O. V. et al. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 2016. pp. 241-244.
16. OST 1 02571-86. Lopatki kompressorov i turbin. Predel'nyye otkloneniya razmerov, formy i raspolozheniya pera, Moscow, 1986, 36 p.

Об авторах

Печенина Екатерина Юрьевна (Самара, Россия) – аспирант, инженер кафедры «Технологии производства двигателей», Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева (Самара, 443086, ул. Московское шоссе, 34), e-mail: ek-ko@list.ru.

Болотов Михаил Александрович (Самара, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии производства двигателей», Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева (Самара, 443086, ул. Московское шоссе, 34), e-mail: mai.kl.bol@gmail.com.

Печенин Вадим Андреевич (Самара, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии производства двигателей», Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева (Самара, 443086, ул. Московское шоссе, 34), e-mail: v.a.pechenin@ssau.ru.

About the authors

Ekaterina Yu. Pechenina (Samara, Russian Federation) – Postgraduate Student, Engineer of the Department of Engine Manufacturing Technologies, Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086), e-mail: ek-ko@list.ru.

Mikhail A. Bolotov (Samara, Russian Federation) – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engine Manufacturing Technologies, Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086), e-mail: maikl.bol@gmail.com.

Vadim A. Pechenin (Samara, Russian Federation) – PhD, Associate Professor of the Department of Engine Manufacturing Technologies, Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086), e-mail: v.a.pechenin@ssau.ru.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Поступила: 25.04.2022

Одобрена: 07.05.2022

Принята к публикации: 04.08.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Печенина, Е.Ю. Разработка алгоритма для комплектации рабочих колес компрессора / Е.Ю. Печенина, М.А. Болотов, В.А. Печенин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 14–22. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.02

Please cite this article in English as: Pechenina E.Yu., Bolotov M.A., Pechenin V.A. Development of the compressor impeller configuration algorithm. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 69, pp. 14-22. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.02