



Модель оценки натягов по бандажным полкам лопаток при сборке рабочих колёс турбин

М. В. Янюкина	старший преподаватель кафедры инженерной графики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; yanjukina.mv@ssau.ru
М. А. Болотов	кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; bolotov@ssau.ru
Е. В. Кудашов	младший научный сотрудник; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; kudashov.ev@ssau.ru

От качества выполнения сборочного процесса зависит работоспособность изделия. Особое внимание при этом стоит уделять взаимодействию деталей во время сборки. В соединениях, где положение контактирующих деталей друг относительно друга является определяющим, для благополучной работы изделия необходимо выявить силовые факторы, оказывающие наибольшее влияние на положение соседних деталей. Это связано с тем, что под воздействием силовых факторов детали перемещаются, образуя натяги и зазоры в соединениях. По этой причине необходимо учитывать деформацию контактирующих деталей, вызванную воздействием силовых факторов. В исследовании разработан алгоритм расчёта сборочных параметров с учётом жёсткости контактирующих деталей, а также на примере рабочего колеса турбины получена модель, позволяющая прогнозировать положение лопаток под воздействием силового фактора, учитывая при этом жёсткость системы.

Ключевые слова: размерные цепи; силовой фактор при сборке

Цитирование: Янюкина, М. В. Модель оценки натягов по бандажным полкам лопаток при сборке рабочих колёс турбин / М. В. Янюкина, М. А. Болотов, Е. В. Кудашов // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №2. – С. 7–17. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-7-17

Введение

Работоспособность изделия определяется многими факторами: точностью изготовления составляющих деталей, свойствами материала, из которого они изготовлены, условиями среды функционирования агрегата и многими другими. Немаловажную роль играет качество сборки изделия, которое определяет выходные параметры узлов, состоящих из контактирующих деталей. В научных статьях сборочному процессу уделяется значительное внимание. Это связано с высокой степенью важности и сложности осуществления процесса.

Анализируя работы, связанные со сборочным процессом, можно выделить несколько направлений исследований: автоматизация сборочного процесса [1-6], выбор метода процесса сборки [7-13], применение виртуальной сборки [14-18] и другие. Не менее важным является

исследование взаимодействия деталей во время сборки и последующего функционирования изделия. В соединениях, где положение контактирующих деталей друг относительно друга является определяющим, для благополучной работы изделия необходимо выявить силовые факторы, оказывающие наибольшее влияние на положение соседних деталей. Это связано с тем, что под воздействием силовых факторов детали перемещаются, образуя натяги и зазоры в соединениях. По этой причине необходимо учитывать деформацию контактирующих деталей, вызванную воздействием силовых факторов. Стоит учитывать, что под воздействием силовых факторов меняется напряжённо-деформированное состояние деталей, зависящее от их жёсткости.

1 Постановка задачи

Одним из узлов, который определяет ресурс ГТД, является рабочее колесо турбины. В процессе сборки необходимо обеспечить натяг между стыковыми поверхностями бандажированных лопаток. Важной задачей является оценка действующих в ходе сборки силовых факторов.

Величина усилия P при расчёте названного натяга в месте непосредственного контакта может быть определена по формуле [19]:

$$P \approx \frac{b_0 - t_p \cos \beta_0}{\frac{1}{c_1} + \frac{t_p}{c_2} (t_p - b_0 \cos \beta_0)} \quad (1)$$

где t_p – шаг лопаток на радиусе расположения полков; b_0 – расстояние между контактными поверхностями соответственно до сборки; β_0 – угол наклона контактных поверхностей к окружающему направлению до сборки; P – сила контактного давления между бандажными полками; c_1 – жёсткость бандажной полки на сжатие (включая смятие по контактными поверхностям); c_2 – жёсткость лопатки на кручение.

При расчёте натяга между стыковыми поверхностями бандажированных лопаток следует учитывать соотношения:

$$t_p \cos \beta = b, \quad (2)$$

$$\Delta b = b - b_0 = \frac{P}{c_1}, \quad (3)$$

$$\Delta \beta = \beta - \beta_0 = -\frac{P t_p \sin \beta}{c_2}, \quad (4)$$

где b – расстояние между контактными полками после сборки; β – угол наклона контактных поверхностей к окружающему направлению после сборки.

На рисунке 1 показаны направления приложения усилия к контактирующим поверхностям соседних лопаток. Величина $\Delta \beta$ показывает, в какой мере повернётся лопатка при условии приложения силы P , при этом лопатка рассматривается как нежёсткое тело. Имея данные о геометрии лопатки до сборки, при выбранном усилии P можно определить изменение угла наклона контактной поверхности бандажной полки лопатки к окружающему направлению, а также расстояние между контактными поверхностями после сборки. Одновременно с подобными расчётами с целью определения величины сборочных параметров решают размерные цепи. При этом в размерных цепях необходимо учитывать и силовой фактор, например, в виде некоторого составляющего звена – вектора.

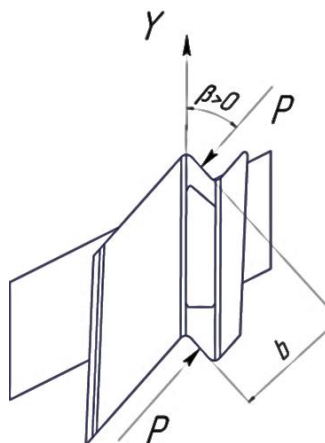


Рисунок 1 – Схематичное отображение силы, прикладываемой к стыковым поверхностям бандажа лопатки

Применяя принцип эквивалентности систем и заменяя действие реальных силовых факторов эквивалентными, можно получить расчётную схему, позволяющую прогнозировать выходные сборочные параметры изделия.

Однако рассчитав по формулам усилие, нельзя использовать данные в таком виде в размерной цепи, т.к. составляющими звеньями являются перемещения по координатным осям. Поэтому в рамках проектного расчёта на этапе технологической подготовки должна быть создана модель, позволяющая оценить параметры сопряжений деталей. Задав граничные значения силовых факторов в модели, можно получить положение деталей при сборке. Проанализировав результат расчётов, можно получить информацию о перемещении конкретных точек контактирующих поверхностей, которую можно представить в виде вектора, зависящего от величины силового фактора, что и требуется для использования в размерной цепи.

Проектный расчёт требует проверки и уточнения, так как модель может не учитывать (или неверно учитывать) жёсткость деталей (влияние допусков на профиль и др.), от которой зависит деформация контактирующих поверхностей, поэтому следует провести натурный эксперимент. Это позволит уточнить с помощью коэффициента расчётную модель и привести её к результату требуемой точности. Одним из вариантов подстройки модели могут являться свойства материала деталей.

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма определения сборочных параметров соединения.

Рассмотрим последовательность исследований на примере сборки рабочего колеса турбины. В качестве контактирующих деталей выступают соседние бандажированные лопатки. При сборке между лопатками должны быть выдержаны определённые параметры, главными из которых являются натяг по стыковым поверхностям бандажных полок, а также зазоры по замковым полкам и по бандажу. В статье [20] представлено описание размерных цепей для этих сборочных параметров. Однако не учтена жёсткость лопаток, а значит, и деформация стыковых площадок бандажа. Согласно блок-схеме (рисунок 2) в размерную цепь предлагается включить дополнительный вектор, описывающий деформацию, вызванную воздействием силового фактора. С учётом этого размерная цепь, приведённая в работе [20], приобретает вид:

$$\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 + \vec{V}_4 + \vec{V}_5 + \vec{V}_6 + \vec{V}_7 + \vec{V}_8 + \vec{V}_9 + \vec{V}_{10} + \vec{V}_{11} + \vec{V}_{12} + \vec{V}_{13} + \vec{V}_{14} + \vec{V}_{15} + \vec{V}_{16} = 0, \quad (7)$$

где $\vec{V}_1 - \vec{V}_{14}$ – составляющие векторы, характеризующие линейное движение цепи; \vec{V}_{15} – вектор, показывающий величину натяга между стыковыми поверхностями бандажа соседних лопаток; \vec{V}_{16} – вектор, характеризующий величину деформации.

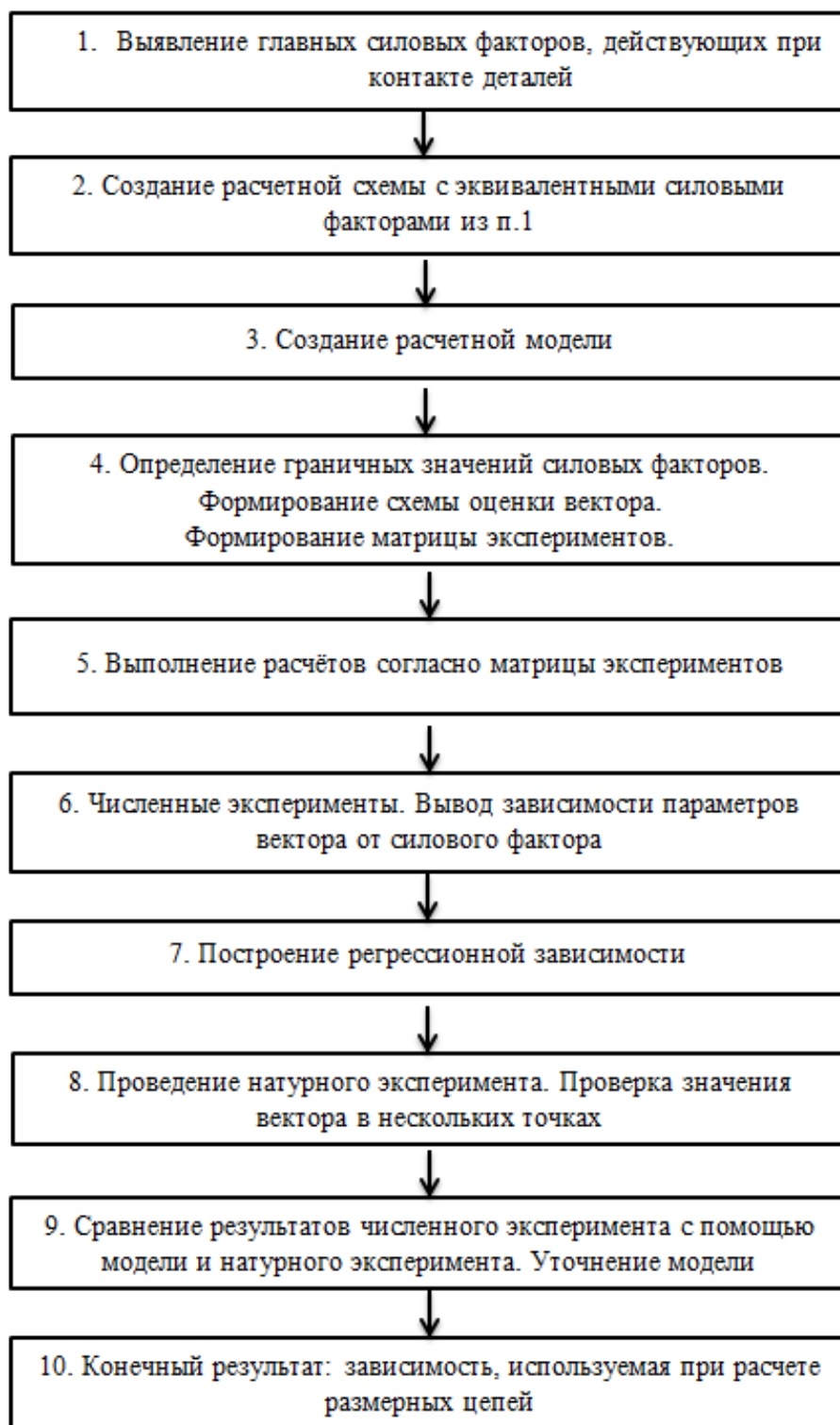


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчёта сборочных параметров с учётом жёсткости контактирующих деталей

2 Расчётная модель

Расчётная модель включает твердотельную модель лопатки, к которой приложены условия закрепления в области хвостовика и эквивалентная сила, действующая от соседней лопатки, рассчитанная по формуле (4). Для создания расчётной модели соединения лопаток используем расчётный комплекс Ansys.

В результате расчёта из модели сохраняются перемещения точек стыковых поверхностей лопаток. На основе полученных перемещений точек формируются параметры вектора \vec{V}_{16} , учитывающего деформации лопаток. В таблице 1 представлены значения перемещения точек стыковых поверхностей лопатки при условии приложения различных усилий. В столбцах 3-4 указана информация о перемещениях выбранной точки левой стыковой поверхности (относительно выбранного начала координат), а в столбцах 5-6 – соответственно, правой.

Таблица 1 – Результаты работы расчётной модели. Перемещение точки контакта

Момент, кг*м	Угол разворота предельный, град. мин	-X, X	-X, Y	+X, X	+X, Y
		мм	мм	мм	мм
1	2	3	4	5	6
0,13	0°22'	0,109773	-0,01644	0,121546	0,235681
0,26	0°44'	0,194214	-0,02908	0,215042	0,416974
0,33	1°06'	0,30322	-0,0454	0,335738	0,651007
0,45	1°28'	0,411458	-0,06161	0,455584	0,883391
0,53	1°50'	0,519696	-0,07781	0,575429	1,115776
0,63	2°12'	0,633308	-0,09482	0,701225	1,359698
0,78	2°34'	0,74999	-0,11229	0,83042	1,610212
0,89	2°43'	0,846713	-0,12678	0,937517	1,817875

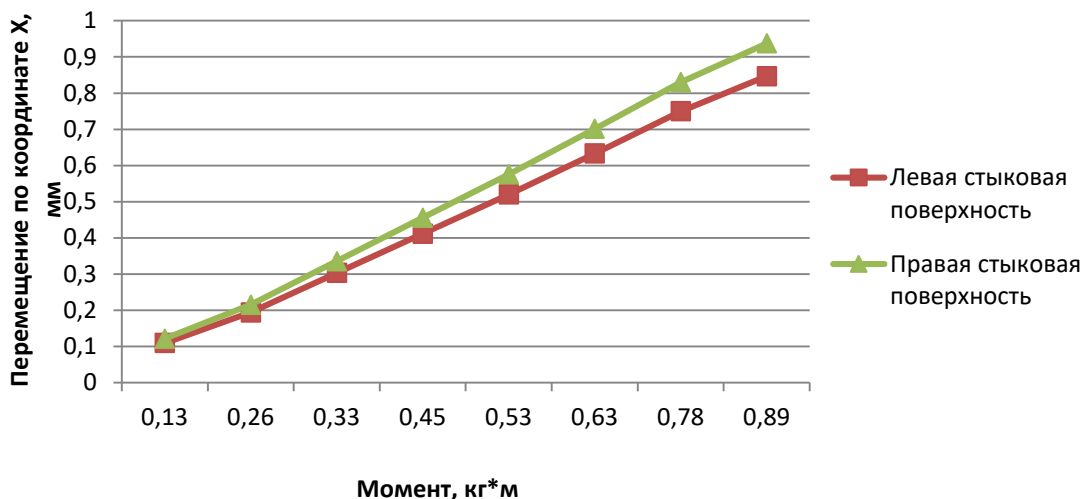
На рисунке 3 показаны графики, отражающие зависимость перемещения точек левой и правой стыковых поверхностей по координатам X (рисунок 3, а) и Y (рисунок 3, б) от воздействующего силового фактора (момента).

По графикам видно, что перемещение в направлении оси Y по левой и правой стыковым поверхностям происходит в противоположном направлении, что указывает на разворот бандажной части лопатки относительно замковой. Зависимости имеют линейный характер.

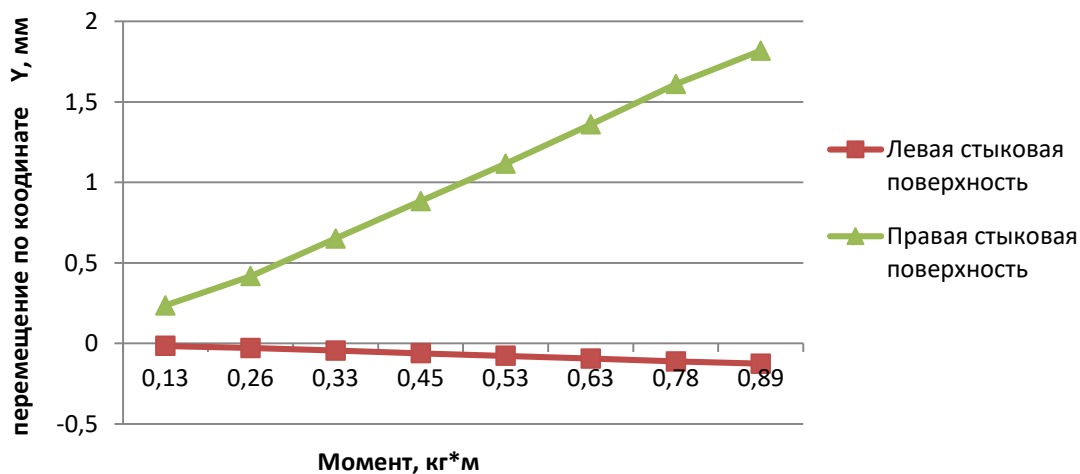
3 Эксперимент

Данная расчётная модель требует уточнения, как было сказано ранее, поэтому необходимо провести натурный эксперимент. Для осуществления эксперимента используется: приспособление для захвата и приложения усилия закрутки лопаток; индикаторные часы; динамометрический ключ; измеритель деформаций с использованием тензорезистора; технологическая оснастка для сборки колеса турбины.

Эксперимент выполнялся в следующей последовательности. Препарированные по схеме, представленной на рисунке 4, лопатки поочередно устанавливаются в специально подготовленное устройство, позволяющее жёстко закрепить хвостовую часть (1, рисунок 5) и одновременно с этим имеющее место для упора бандажной полки лопатки (левый фланец валика 2, рисунок 5). Поворотом шестигранного ключа (под него есть углубление в правой фланцевой части валика 2, рисунок 5) прикладывается усилие, момент, а именно производится закрутка лопатки, осуществляется замер. Показание прибора составляет величину деформации. В результате эксперимента получаем зависимость величины деформации от угла закрутки.



a



б

Рисунок 3 – Графики зависимости положения стыковых поверхностей от силового фактора

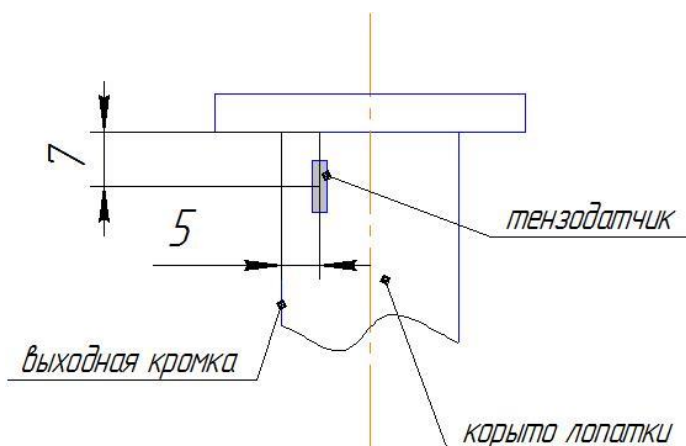


Рисунок 4 – Схема препарирования лопатки (установка тензодатчика)

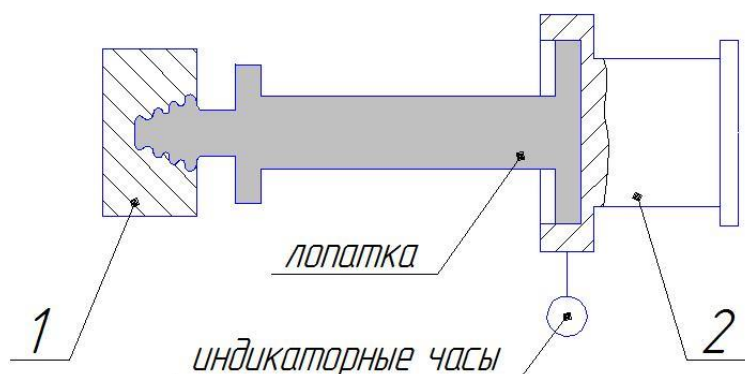


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

Используя данные эксперимента можно уточнить расчётную модель, реализованную в Ansys. В качестве коэффициента для приведения расчётной модели к реальной был выбран модуль упругости Юнга материала. Методом подбора выводим результат работы модели к значениям, полученным в натурном эксперименте. На рисунке 6 представлен график зависимости угла разворота бандажной полки лопатки от возникающей силы (момент) с учётом верификации расчётной модели на основе данных, полученных в натурном эксперименте.

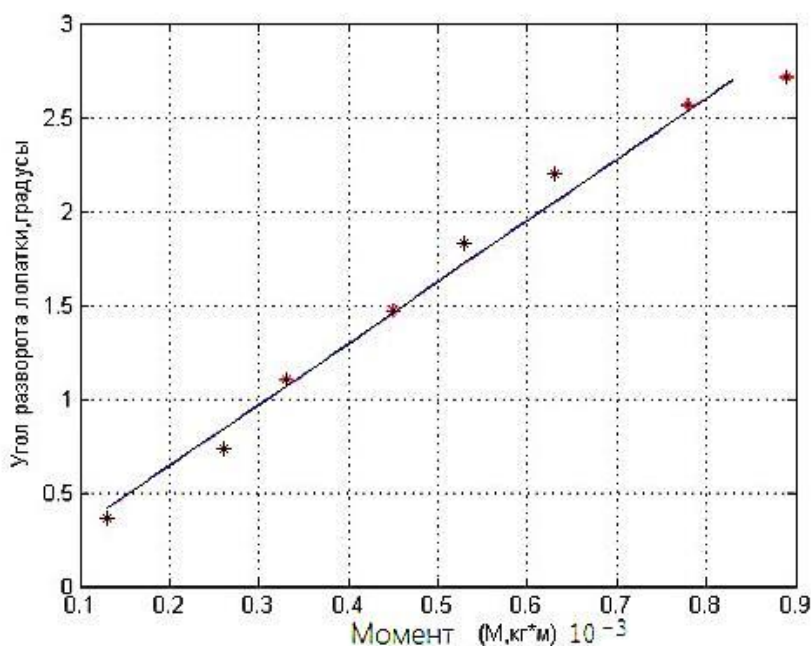


Рисунок 6 – График зависимости угла разворота торцевой части бандажной полки относительно замковой полки от силы, возникающей при сборке

Заключение

В рамках исследования был разработан алгоритм расчёта сборочных параметров с учётом жёсткости контактирующих деталей, а также на примере рабочего колеса турбины получена модель, позволяющая прогнозировать положение лопаток под воздействием силового фактора, учитывая при этом жёсткость системы. Определена зависимость угла разворота торцевой части бандажной полки относительно замковой полки от силы, возникающей при сборке. Построенный график зависимости можно использовать для определения величины

сборочного параметра (натяга по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток) других рабочих колёс. Это позволит сократить время сборки и снизить затраты на производство, что свидетельствует о повышении эффективности производственного процесса, а также снижении его трудоёмкости.

Список использованных источников

1. Полетаев, В. А. Анализ связей при автоматической сборке с помощью метода пространства конфигураций / В. А. Полетаев, Д. Е. Турчин // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2005. – №4-2(49). – С. 76-79.
2. Мартынов, В. Г. Роботизация и автоматизация сборочных процессов в современном промышленном производстве / В. Г. Мартынов // Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А. А. – 2013. – С. 120-123.
3. Климашов, В. Ю. Автоматизированная система контроля сборочных процессов на производстве и при проведении ремонтных работ / В. Ю. Климашов // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. Труды международного научно-промышленного форума. – 2016. – С.25.
4. Соколова, О. Ф. Придание робастных свойств сборочным процессам самолетостроительного производства / О. Ф. Соколова, Ф. Е. Ляшко, М. И. Соколова // Известия самарского научного центра российской академии наук. – 2017. – №4-2, Т.19. – С. 271-275.
5. Малкина, И. В. Автоматизация сборочного процесса изделий авиационной техники / И. В. Малкина, А. А. Крестьянсков // Машиностроение: инновационные аспекты развития. Материалы I международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 81-84.
6. Погадаева, Р. Р. Анализ состояния проблемы автоматизации сборочных процессов в машиностроении / Р. Р. Погадаева, А. В. Еркулев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. – 2019. – С.859-863.
7. Киричек, А. В. Совершенствование сборки методом пригонки вероятностным расчётом размерных цепей / А. В. Киричек, В. Ф. Начвай // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – №3. – С. 7-12.
8. Слащев, Е. С. Совершенствование метода сборки групповой взаимозаменяемости / Е. С. Слащев, В. Г. Осетров, В. Б. Федоров // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – №3. – С. 004-006.
9. Мохова, А. О. Анализ возможностей повышения качества изготовления машин с использованием различных методов сборки / А. О. Мохова, В. В. Непомилуев, А. А. Соловьева // Потенциал современной науки. – 2014. – №2. – С. 23-27.
10. Иванов, А. А. Оптимизация управления технологическим процессом сборки методом динамического программирования / А. А. Иванов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – №8. – С. 3-5.
11. Набатников, Ю. Ф. Метод селективной сборки соединений деталей машин в условиях мелкосерийного производства / Ю. Ф. Набатников // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №9. – С. 19-32.
12. Безбородов, И. А. Технологическая стратегия обеспечения точности сборки ДВС методом неполной взаимозаменяемости / И. А. Безбородов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – №9. – С. 07-11.
13. Ераткин, Д. В. Исследование точности сборки КШМ при ремонте двигателя методом размерного анализа / Д. В. Ераткин, В. А. Ермолов, А. И. Миргородский, В. И. Ковалевский // Механики XXI веку. – 2004. – №3. – С. 16-19.
14. Саблин, П. А. Подготовка производства к сборке изделий сложной формы методом электронного описания / П. А. Саблин, Б. Н. Марьин, А. М. Шпилёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – №12. – С. 3-8.
15. Шатских, Н. Ю. Разработка программного средства трехмерной визуализации сборочного технологического процесса / Н. Ю. Шатских, П. Ю. Гусев // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 7-ой международной научно-практической конференции. Редколлегия: А. А. Горохов (отв. Ред.). – 2017. – С. 398-401.
16. Сибирский, В. В. Использование компьютерных моделей пространственных размерных цепей и метода виртуальных сборок для повышения производительности монтажных операций / В. В. Сибирский, С. К. Чотчаева // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5-2(36). – С. 297-303.
17. Иванюк, А. К. Проведение имитационных исследований в современных САД средах / А. К. Иванюк, Ю. П. Сердобинцев // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления

этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016). Труды XVI-ой международной молодёжной конференции. – 2016. – С. 432-433.

18. Безъязычный, В. Ф. Технология Виртуальной сборки / В. Ф. Безъязычный, В. В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. – №6. – С. 3-14.

19. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1993. – 640 с., ил.

20. Yanyukina, M. V. Interrelated Dimensional Chains in Predicting Accuracy of Turbine Wheel Assembly Parameters / M. V. Yanyukina, M. A. Bolotov, N. V. Ruzanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327, Issue 2.

Model of evaluation of interference between blades shrouds during assembly of turbine impellers

M. V. Yanyukina	Senior Lecturer of Department of Engineering Graphics; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; yanyukina.mv@ssau.ru
M. A. Bolotov	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; bolotov@ssau.ru
E. V. Kudashov	Junior Research Assistant; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; kudashov.ev@ssau.ru

The workability of the product depends on the quality of the assembly process. Special attention should be paid to the interaction of parts during assembly. In joints where the position of the contacting parts relative to each other is decisive, for effective operation of the product, it is necessary to find the force factors that have the greatest impact on the position of neighboring parts. This is so because due to the influence of the force factor, the parts move and interference and gaps are formed in the joints. For this reason, it is necessary to take into account the deformation of the contacting parts caused by the influence of force factors. The study developed an algorithm for calculating assembly parameters taking into account the rigidity of the contacting parts. On the example of the turbine impeller, a model was obtained that allows predicting the position of the blades under the influence of the force factor, taking into account the rigidity of the system.

Keywords: dimension chains; assembly force factor

Citation: Yanyukina, M. V., Bolotov, M. A. and Kudashov, E. V. (2024), "Model of evaluation of interference between blades shrouds during assembly of turbine impellers", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 2, pp. 7-17. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-7-17. (In Russian; abstract in English).

References

1. Poletaev, V. A. and Turchin, D. E. (2005), "Analiz svyazey pri avtomaticheskoy sborke s pomoshch'yu metoda prostranstva konfiguratsiy" [Analysis of relationships in automatic assembly using the configuration space method], *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*, vol. 4.2(49), pp. 76-79. (In Russian).
2. Martynov, V. G. (2013), "Robotizatsiya i avtomatizatsiya sborochnykh protsessov v sovremennom promyshlennom proizvodstve" [Robotization and automation of assembly processes in modern industrial production], *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya. Materialy 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Otvetstvennyy redaktor Gorokhov A.A.* [Engineering and technology: ways of innovative development. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. Editor-in-chief Gorokhov A.A.], pp. 120-123. (In Russian).
3. Klimashov, V. Yu. (2016), "Automatic assembly control system in the production and repair work", *Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek. Trudy mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma [Proceedings of the 18th international scientific & industrial forum "Great Rivers"]*, vol. 5, P. 25. (In Russian).
4. Sokolova, O. F., Lyashko, F. E. and Sokolova, M. I. (2017), "Giving the robustness to aircraft assembly processes", *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, no. 4-2, vol.19, pp. 271-275.
5. Malkina, I. V. and Krest'yanskov, A. A. (2018), "Avtomatizatsiya sborochnogo processa izdeliy aviacionnoy tekhniki" [Assembly automation of aviation products], *Mashinostroenie: innovatsionnye aspekty razvitiya. Materialy I*

mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Mechanical engineering: innovative aspects of development. Proceedings of the 1st international scientific and practical conference], pp. 81-84. (In Russian).

6. Pogadaeva, R. R. and Erkulev, A. V. (2019), "Analiz sostoyaniya problemy avtomatizatsii sborochnykh protsessov v mashinostroenii" [State analysis of the problem of assembly automation in mechanical engineering], *Universitetskii kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury. Materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii*, pp.859-863. (In Russian).

7. Kirichek, A. V. and Nachvay, V. F. (2004), "Sovershenstvovanie sborki metodom prigonki veroyatnostnym raschetom razmernykh tsepey", *Assembling in mechanical engineering, instrument- making*, no. 3, pp. 7-12.

8. Slashhev, E. S., Osetrov, V. G. and Fedorov, V. B. (2013), "Improvement of Group Interchangeability Method of Assembly", *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 3, pp. 004-006. (In Russian).

9. Mohova, A. O., Nepomiluev, V. V. and Solov'eva, A. A. (2014), "Analisis of the possibility of improving machine building quality", *Potentsial sovremennoy nauki*, no. 2, pp. 23-27. (In Russian).

10. Ivanov, A. A. (2014), "Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami sborki metodom dinamicheskogo programmirovaniya", *Assembling in mechanical engineering, instrument- making*, no. 8, pp. 3-5. (In Russian).

11. Nabatnikov, Yu. F. (2008), "Metod selektivnoy sborki soedineniy detaley mashin v usloviyakh melkoseriynogo proizvodstva", *Assembling in mechanical engineering, instrument- making*, no. 9, pp. 19-32. (In Russian).

12. Bezborodov, I. A. (2013), "Tekhnologicheskaya strategiya obespecheniya tochnosti sborki DVS metodom nepolnoy vzaimozamenyaemosti", *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], no. 9, pp.07-11. (In Russian).

13. Eratkin, D. V., Ermolov, V. A., Mirgorodskiy, A. I. and Kovalevskiy, V. I. (2004), "Issledovanie tochnosti sborki KShM pri remonte dvigatelya metodom razmernogo analiza", *Mekhaniki XXI veku*, no. 3, pp. 16-19. (In Russian).

14. Sablin, P. A., Mar'in, B. N. and Shpilev, A. M. (2010), "Podgotovka proizvodstva k sborke izdeliy slozhnoy formy metodom elektronnoy opisaniya", *Assembling in mechanical engineering, instrument- making*, no. 12, pp. 3-8. (In Russian).

15. Shatskikh, N. Yu. and Gusev, P. Yu. (2017), "Razrabotka programmnogo sredstva trekhmernoy vizualizatsii sborochnogo tekhnologicheskogo protsesssa" [Development of software for three-dimensional visualization of the assembly technological process], *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh. Sbornik nauchnykh trudov 7-oy mezhhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Redkollegiya: A.A. Gorokhov (otv. Red.)* [Innovations, quality and service in engineering and technology. Collection of scientific papers of the 7th international scientific and practical conference. Editorial board: A. A. Gorokhov], pp. 398-401. (In Russian).

16. Sibirskiy, V. V., Chotchaeva, S. K. (2012), "Using computer models spatial dimension chains and database of virtual assemblies for improvement of assembly operations performance", *Vestnik of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University)*, no. 5-2(36), pp. 297-303. (In Russian).

17. Ivanyuk, A. K. and Serdobintsev, Yu. P. (2016), "Provedenie imitatsionnykh issledovaniy v sovremennykh CAD sredakh", *Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta (SAD/CAM/PDM - 2016). Trudy XVI-oy mezhhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii*, pp. 432-433. (In Russian).

18. Bez'yazychnyy, V. F. and Nepomiluev, V. V. (2011), "Tekhnologiya virtual'noy sborki", *Assembling in mechanical engineering, instrument- making*, no. 6, pp. 3-14.

19. Birger, I. A., Shorr, B. F. and Iosilevich, G. B. (1993), *Raschet na prochnost' detaley mashin: spravochnik* [Stress calculation of machine parts: handbook], Mashinostroenie, Moscow. (In Russian).

20. Yanyukina, M. V., Bolotov, M. A. and Ruzanov, N. V. (2018), "Interrelated Dimensional Chains in Predicting Accuracy of Turbine Wheel Assembly Parameters", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 327, issue 2.