

УДК 623.4
DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.09

С.М. Белобородов¹, В.Я. Модорский², А.И. Неверов¹

¹Пермский военный институт войск национальной гвардии
Российской Федерации, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ВИБРАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ СБОРКИ РОТОРОВ С ОБМЕРЗАЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Проведен анализ известных решений вибрационных задач технологическими методами и сформулирована их математическая постановка. Определено направление исследования и сформулирована гипотеза решения минимизационной задачи. Предложено решение минимизации вибрационных параметров роторов с периодически обмерзающими поверхностями за счет придания им упруго-напряжённого состояния, приведены результаты его апробации в условиях промышленного производства.

Ключевые слова: сборка, балансировка, дисбаланс, эксцентриситет, ротор, вибрация.

S.M. Beloborodov¹, V.Ya. Modorsky², A.I. Neverov¹

¹Perm Military Institute of the National Guard Troops of Russian Federation,
Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

VIBRATION PROBLEMS IN THE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ASSEMBLING ROTORS WITH FREEZING SURFACES

The article analyzes the known solutions of vibration problems by technological methods and formulates their mathematical formulation. The direction of the research is determined and the hypothesis of solving the minimization problem is formulated. A solution is proposed to minimize the vibration parameters of rotors with periodically freezing surfaces by giving them an elastic-stressed state, the results of its testing in industrial production conditions are presented.

Keywords: assembly, balancing, imbalance, eccentricity, rotor, vibration.

В современном производстве все большее распространение получают экономичные технологические процессы, отличающиеся малой энергоёмкостью, сокращением количества технологических операций и затраченного времени, а также более рациональным использованием материальных и человеческих ресурсов [1–9]. Вибрация присуща и живому, и неживому миру: все частицы и тела имеют свои комплексы характерных частот, из которых можно выделить критические (экстремальные) и рабочие (нормированные). Вибрация по своему влиянию, как и все физические явления, не имеет собственной положительной или отрицательной окраски. В одной части процессов вибрация – отрицательный фактор эксплуатации (сопутствующий эффект), способствующая повышенному износу изделия, а в ряде случаев – приводящая к аварийному останову или его разрушению. В другой части – является основным (или составным) элементом рабочего процесса (целевой эффект).

Таким образом, в описанной ситуации необходимо определить меры, обеспечивающие в одном случае – минимизацию вибрационных характеристик (виброскорость, виброускорение), а в другом – максимизацию, предусматривающую наиболее полное приближение к преобразованию затраченной энергии в рабочий вибропроцесс. Описанная ситуация является научно-технической и реализуется в условиях конкурентного производства.

Если рассматривать поле применения минимизационной задачи то следует выделить две группы: изделия, где рабочий процесс предусматривает минимизацию вибрации (вооружение, военная и специальная техника, насосы, компрессоры, точные обрабатывающие станки, двигатели и машины, обеспечивающие подвижность различного назначения) – здесь решается только задача минимизации вибрации.

Решение этой прикладной задачи целесообразно рассмотреть на примере наиболее распространенных и наиболее перспективных машин. Наиболее характерной машиной, эксплуатация которой требует минимизировать вибрацию, можно считать центробежный компрессор. Это – машина длительной эксплуатации, а потому вибрация является основным фактором скорости износа подшипников.

Материалы и методы

При решении минимизационной задачи целесообразные результаты обеспечивались применением ряда методов сборки и балансировки, обеспечивающих снижение нагрузки на наиболее слабое звено силовой цепи – на опорные подшипники скольжения. Особенность конструкции таких подшипников заключается в заведомом ослаблении их вкладышей относительно шеек. Такая конструкция позволяет существенным образом снизить стоимость эксплуатации: замена тонкостенных вкладышей несравнимо дешевле ремонта шеек. А сам ремонт шеек в эксплуатации рассматривается не как штатная, а как аварийная ситуация.

Поскольку подшипники воспринимают всю статическую и динамическую нагрузку, следует сразу оговорить в какой части можно добиться какого-либо прогресса. Есть два понятия, роль которых следует разделять: грузоподъемность и нагрузка. Грузоподъемность статическая и динамическая определяют максимально допустимую нагрузку в состоянии покоя и в состоянии вращения при работе. Эта характеристика определяет потенциальную возможность применения подшипников в конкретной технической ситуации. При проектировании вряд ли кто-то будет рассматривать подшипниковый узел как подставку, а потому при проведении основных расчётов всегда учитывают и скорость вращения. Таким образом, нагрузку в интересах точности скорости расчетов следует делить на статическую, определяемую техническим заданием и зависящую от постоянных факторов: вес и скорость вращения ротора и динамическую, определяемую центробежной силой его элементов и локальными изгибами. Последствия воздействия этих факторов достаточно серьезны, поскольку они снижают динамическую устойчивость роторов, что приводит к увеличению нагрузки на подшипники (и определено из практики) на довольно значимую величину: до 40 % от статической нагрузки, ее минимизация – увеличивает ресурс на 30 %.

Статическая нагрузка определяется массой ротора, приходящейся на каждую опору и частотой вращения ротора. Для характеристики этой нагрузки принят комплексный pv -фактор, представляющий собой произведение удельного давления (вес части ротора, приходящийся на единицу площади проекции вкладыша) и скорости вращения ротора.

Гораздо сложнее описывается динамическая нагрузка: ротор, сбалансированный на низкочастотном оборудовании, рассматривается как квазижесткий. В ходе работы, особенно при прохождении критических частот, он подвергается различным изгибам. В интересах более детального описания в статье рассматривается только один изгиб по первой моде, при этом целесообразным является изгиб, противоположный по направлению имеющемуся изгибу, обусловленному погрешностями изготовления и определяемому измерением максимального радиального биения средней части ротора.

Остаточные дисбалансы, распределение которых не нормируется государственными стандартами, а на большинстве предприятий – и внутренними документами, каждый раз создает индивидуальную картину напряжений, определяемых главным моментом дисбалансов. Это приводит к уникальным схемам распределения сил и неожиданным результатам при испытаниях: в од-

ной и той же крупной партии, при изготовлении и сборке по одним техническим условиям встречаются как высокоустойчивые роторы, так и неработоспособные, и динамически неустойчивые.

Для обеспечения предсказуемого результата сборки роторов разработана методическая база, обладающая защитой патентами РФ № 2372594, 2372595, 2418198, 2426014, 2431064, 2449180, 2522700, 2531158, 2554666, 2565119:

- расчетно-объемный метод подготовки валов к сборке – предназначен для обеспечения сборки ротора без дисбалансов и заключается в многоплоскостном уравнивании вала с одновременной подготовкой параметров установки элементов ротора.
- расчетно-имитационный метод подготовки валов к сборке – предназначен для обеспечения коррекции монтажных дисбалансов валов и роторов с несовпадающими балансировочными и рабочими осями вращения и заключается в расчете локальных монтажных дисбалансов, их имитации во время балансировки ротора и коррекции при установке на рабочие поверхности.
- метод прецизионной подготовки элементов роторов к сборке – предназначен для обеспечения установки элемента на вал с минимизированным эксцентриситетом внешней образующей и без дисбаланса, заключается в коррекции дисбаланса, обусловленного погрешностью установки элемента на оправку, диаметрально противоположной установкой эксцентриситета внешней образующей относительно эксцентриситета посадочной поверхности на валу и обеспечением заранее заданной величины дисбаланса со стороны эксцентриситета внешней образующей.
- метод эксцентриситетно-виртуальной сборки колес турбин – предназначен для уравнивания ротора с заранее известным дисбалансом и заключается в установке комплекта лопаток с дисбалансом, противоположным известному по направлению и равным по величине.
- метод расчетно-эксцентриситетной сборки – предназначен для обеспечения уравниваемости ротора при сборке и заключается в соединении заранее подготовленных элементов при взаимном уравнивании локальных дисбалансов.
- расчетно-эксцентриситетный метод коррекции монтажных дисбалансов элементов валопровода – предназначен для обеспечения уравниваемости всех элементов собранного валопровода и заключается в коррекции локальных дисбалансов по результатам замеров эксцентриситетов и расчетов.

Применение этих методов по отдельности или в комплексе обеспечивает повышение динамической устойчивости роторов или валопровода в целом, однако не обеспечивает устранение вибрации до уровня, исключающего износ подшипников вследствие динамической нагрузки.

Следовательно, преобразование энергии, затраченной в рабочем процессе, в вибрацию может быть описана в безразмерном виде как:

$$W = f(A)$$

где A – энергия, затраченная в рабочем процессе; W – количество энергии, преобразованной в вибрацию.

В итоге математическую постановку частных задач можно сформулировать как:

$$E = \sum_{k=1}^n (1 - MW) \text{ при } W \rightarrow 0$$

где E – эффективность работы устройства, M – масса функционирующего элемента.

Результаты и обсуждение

Для определения комплекса мер, снижающих динамическую нагрузку на подшипники до пренебрежительно малых величин необходимо составить силовую модель ротора.

Вследствие погрешностей изготовления, большая часть которых обусловлена неравножесткостью заготовки вала ротора, вполне предсказуемы положение и величины начальных дисбалансов изготовленного вала. Если эта деталь будет сбалансирована с заданными параметрами дисба-

лансов (величина и направление), позволяющими выпрямлять ее при работе, то этот прием одновременно приведет и к увеличению нагрузки на подшипники. Увеличение этой нагрузки обусловлено тем, что при выпрямлении вала появляется динамический дисбаланс, совпадающий по направлению с остаточным дисбалансом. Все это приводит к повышению центробежной силы и повышению нагрузки на опоры.

Таким образом, задача состоит в обеспечении управляемого изгиба ротора в сторону, противоположную его максимальному биению (т.е. – его выпрямления) с одновременным снижением нагрузки на опоры.

При разработке новых методов сборки и балансировки были использованы частные исследования [11–13], результаты которых были запатентованы. Это относится к изобретению (патент РФ № 2554669) обеспечивающему повышение точности балансировки за счет минимизации монтажного дисбаланса рабочего колеса ротора, обусловленное его деформацией при установке; способу балансировки (патент РФ № 2628850), направленному на повышение точности; высокоточному способу сборки валопровода (патент РФ № 2630954) с минимизацией эксцентриситета масс трансмиссии за счет управления положениями эксцентриситетов соединительных поверхностей всех роторов и многоплоскостной коррекции остаточных дисбалансов; нового технического решения (патент РФ № 2744244) при котором достигается повышение точности сборки за счет последовательного снижения дисбалансов в ходе технологического процесса; новый способ сборки (патент РФ № 2731506), который обеспечивает снижение объема работ при ее заданной точности и изобретение (патент РФ № 2743926) направленное на повышение точности балансировки роторов с магнитным подвесом.

Государственный стандарт 1940-1-2007 в разделе 4.2 описывает положение дисбаланса комбинацией пары кососимметричных роторов, определяющих главный момент дисбаланса и главного вектора дисбаланса, определяющего неуравновешенность ротора. Такое распределение векторов может быть использовано и в исследуемой ситуации: вводя последовательно пары кососимметричных роторов и главные дисбалансы можно обеспечить требуемую деформацию вала.

На этой основе можно сформулировать рабочую гипотезу: выпрямление собранного ротора при работе можно обеспечить приложением двух пар кососимметричных дисбалансов, а снижение нагрузки на опоры – приложением двух нормированных дисбалансов, направленных в сторону максимального биения ротора.

Для выпрямления ротора целесообразно условно разделить его на две части. Плоскость раздела при этом будет проходить по центру масс ротора. Каждая половина ротора, если она будет подвержена центробежным силам, обусловленным парой кососимметричных роторов, будет стремиться занять положение, близкое к оси вращения, проходящей через центры опорных шеек ротора. При этом точка, относительно которой будет осуществляться поворот половины ротора при изгибе, будет находиться в центре масс этой половины. Это позволит выполнить первую часть задачи – выпрямление ротора.

Схема приложения дисбалансов приведена на рисунке.

Для выполнения второй части задачи необходимо приложить дисбалансы к центрам масс обеих половин ротора и направить их в сторону максимального биения ротора. Тогда при изгибе ротора под воздействием пар кососимметричных центробежных сил, когда наиболее массивная – средняя – часть ротора переместится в сторону, противоположную биению. Это приведет к образованию динамического дисбаланса, сонаправленного с изгибом. Такой дисбаланс приводит к дополнительной центробежной силе. В то же время ранее обеспеченные и приложенные к центрам масс половин ротора дисбалансы уравновесят возникшие динамические дисбалансы.

При этом общая нагрузка на опоры ротора снизится: дополнительная центробежная сила, обусловленная динамическим дисбалансом, будет уравновешена центробежными силами, обусловленными ранее обеспеченными дисбалансами.

Такое распределение дисбалансов позволит выполнить поставленную задачу.

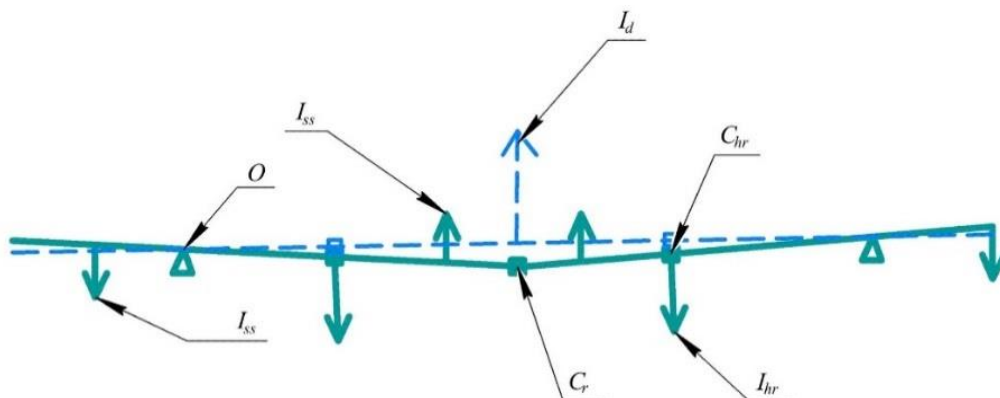


Рис. Схема приложения дисбалансов: I_d – динамический дисбаланс, C_r – центр масс ротора, C_{hr} – центр масс половины ротора, I_{hr} – главный вектор дисбаланса половины ротора, O – опоры ротора, I_{ss} – кососимметричные дисбалансы

Что касается величин приложенных дисбалансов, то они определяются расчетом и зависят от целого комплекса параметров: масс участков роторов, продольных размеров, номинальной частоты вращения, количества критических скоростей роторов. Методика расчетов имеется, но в статье не рассматривается.

Представленный метод обеспечения динамической устойчивости отработан в ходе изготовления и испытаний роторов компрессоров серии НЦ с двумя секциями. При этом адаптация метода к производственным процессам проходила на роторах с частотой вращения в 150 Гц с восьмью рабочими колесами. Ротор был приспособлен для последовательной и параллельной работы секций.

При приемо-сдаточных испытаниях был достигнут уровень виброперемещений опорных шеек ротора в опорах в пределах 4–6 мкм. Для сравнения, уровень вибрации для прекращения работы компрессора по сигналу «предупреждение» был 60 мкм, а «аварийный останов» – 70 мкм.

Таким образом, применение разработанного метода сборки роторов, обеспечивающего повышение жёсткости ротора за счет упругодеформированного состояния, придает ему необходимую динамическую устойчивость, снижает износ опорных поверхностей подшипников

Достоверность исследования подтверждается сходимостью результатов теоретического исследования с экспериментально полученными данными.

Выводы

Вибрационные задачи в производственных процессах составляют важный сегмент исследовательской и инженерной работы.

1. Вибрационная задача должна формулироваться на проектном уровне и реализовываться при разработке конструкторской и технологической документации.

2. Целесообразное определение и постоянное измерение параметров вибрационных процессов является важнейшей составляющей испытаний.

3. Достигнутое снижение вибрации в 10 и более раз в опорных подшипниках является подтверждением целесообразности применения разработанного метода в смежных областях производства.

4. При рациональном решении задач снижения вибрации в узлах трения нагрузка на опоры ротора может быть снижена на 40 %, а ресурс работы агрегата по этому показателю может быть увеличен до 30 %.

5. Промышленная апробация и экспериментальные исследования предложенных методов убедительно доказывают их эффективность.

Библиографический список

1. Shmakov A.F., Modorskii V.Ya. Energy Conservation in Cooling Systems at Metallurgical Plants // *Metallurgist*. – 2016. – № 59. – P. 882–886
2. Mekhonoshina E.V., Modorskii V. Ya, V. Yu Petrov. Numeric simulation of the interaction between subsonic flow and a deformable profile blade on the compressor experiment phase // *Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015)*. – 2015. – P. 211-218.
3. Mekhonoshina E. V., Modorskii V. Ya. Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2016. – Vol. 1770, No. 1. – P.030113. – 6 p.
4. Butymova L.N., Modorskii V.Ya, Petrov V.Yu. Numerical modeling of interaction in the dynamic system “gas-structure” with harmonic motion of the piston in the variable section pipe // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2016. – Vol. 1770, No. 1. – P.030103. – 6 p.
5. Gaynutdinova D.F., Modorsky V.Ya., Masich G.F. Infrastructure of data distributed processing in high-speed process research based on hydroelasticity tasks // *Procedia Computer Science*. – 2015. – no. 66 (2015). – P. 556-563.
6. Nepomiluev V.V., Semenov A.N. Virtual Testing in Assembly // *Russian Engineering Research*. – 2019. – Vol. 39, No. 7. – P. 625–627.
7. Мешкас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // *Известия тульского государственного университета. Технические науки*. – 2016. – № 8-2. – С. 291-299.
8. Песин М.В., Макаров В.Ф., Мокронос Е.Д. Особенности технологического процесса формообразования резб на изделиях машиностроения, обеспечивающего повышение качества изделия и снижение его себестоимости // *Экспозиция Нефть Газ*. –2011. – № 6 (18). – С. 20-21
9. Beloborodov S.M., Makarov V.F., Tselmer M.L. Controlled assembly of rotors // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 2. – P. 233-240.
10. Providing gas-dynamic tests for 2fsi subsystems / S.M. Beloborodov, V.Y. Petrov, V.Y. Modorskii, M.L. Tselmer // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – no. 2027. – P. 040089.
11. Макаров В.Ф., Никитин С.П. Зависимость предела выносимости деталей из жаропрочных сплавов от технологических параметров глубинного шлифования // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф.* – 2014. – С. 16–20.

References

1. Shmakov A.F. and Modorskii V.Ya. Energy Conservation in Cooling Systems at Metallurgical Plants // *Metallurgist*, 2016, no. 59, pp. 882-886.
2. Mekhonoshina, E.V., V. Ya Modorskii, and V. Yu Petrov. Numeric simulation of the interaction between subsonic flow and a deformable profile blade on the compressor experiment phase // *Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015)*, 2015, pp. 211-218.
3. Mekhonoshina, E.V., and V.Ya Modorskii. Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2016, Vol. 1770, No. 1, P.030113, 6 p.
4. Butymova, L. N., V. Ya Modorskii, and V. Yu Petrov. Numerical modeling of interaction in the dynamic system “gas-structure” with harmonic motion of the piston in the variable section pipe // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2016, Vol. 1770, No. 1, P.030103, 6 p.
5. Gaynutdinova, Dinara F., Vladimir Ya Modorsky, and Grigoriy F. Masich. Infrastructure of data distributed processing in high-speed process research based on hydroelasticity tasks // *Procedia Computer Science*, 2015, no. 66 (2015), pp. 556-563.
6. Nepomiluev V.V., Semenov A.N. Virtual Testing in Assembly // *Russian Engineering Research*, 2019, Vol. 39, No. 7, pp. 625-627.
7. A.E. Meshkas, V.F. Makarov, V.V. Shirinkin. Tekhnologii, pozvolyayushchiye povysit effektivnost obrabotki kompozitsionnykh materialov metodom frezerovaniya [Technologies that improve the efficiency of processing composite materials by milling]. *Bulletin of the Tula State University. Technical sciences*, 2016, no. 8-2, pp. 291-299.
8. Pesin M.V., Makarov V.F., Mokronosov YE.D. Osobennosti tekhnologicheskogo protsessa formoobrazovaniya rez'b na izdeliyakh mashinostroyeniya, obespechivayushchego povysheniye kachestva izdeliya i snizheni-

ye yego sebestoimosti [Features of the technological process of forming threads on engineering products, providing an increase in the quality of the product and a reduction in its cost]. Exposition Oil & Gas, 2011, no. 6(18), pp 20-21

9. Beloborodov S.M., Makarov V.F., Tselmer M.L. Controlled assembly of rotors // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020, Vol. 2, pp. 233-240.

10. Beloborodov S.M., Petrov V.Y., Modorskii V.Y., Tselmer M.L. Providing gas-dynamic tests for 2fsi subsystems // AIP Conference Proceedings, 2018, no. 2027, pp. 040089.

11. Makarov V.F., Nikitin S.P. Zavisimost predela vynoslivosti detaley iz zharoprochnykh splavov ot tekhnologicheskikh parametrov glubinnogo shlifovaniya [Dependence of the endurance limit of parts made of heat-resistant alloys on the technological parameters of deep grinding]. Collection of scientific papers of the XI-th International Scientific and Practical Conference: Modern tool systems, information technologies and innovations, 2014, pp. 16-20.

Об авторах

Белобородов Сергей Михайлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции артиллерийского вооружения», Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации (Пермь, 614030, Гремячий лог д. 1, e-mail: beloborodoff2011@yandex.ru).

Модорский Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», директор Центра высокопроизводительных вычислительных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614900, Комсомольский пр., 29, e-mail: modorsky@pstu.ru).

Неверов Александр Иванович (Пермь, Россия) – начальник кафедры «Конструкции артиллерийского вооружения», Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации (Пермь, 614030, Гремячий лог, 1, e-mail: neverovai@rosgvard.ru).

About the authors

Sergey M. Beloborodov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department “Design of Artillery Weapons”, Perm Military Institute of the National Guard Troops of Russian Federation (1, Gremyachiy log str., Perm, 614030, e-mail: beloborodoff2011@yandex.ru).

Vladimir Ya. Modorskii (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions”, director of the High-Performance Computing Systems PNRPU center, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: modorsky@pstu.ru).

Aleksandr I. Neverov (Perm, Russian Federation) – Head of Department “The Artillery Armament Design” Perm Military Institute of the National Guard Troops of Russian Federation (1, Gremyachiy log str., Perm, 614030, e-mail: neverovai@rosgvard.ru).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-20118 и Минобрнауки Пермского края (Соглашение №с-26/1203 от 30.06.22 г.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Поступила: 23.09.2022

Одобрена: 30.09.2022

Принята к публикации: 10.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Белобородов, С.М. Вибрационные задачи в технологических процессах сборки роторов с обмерзающими поверхностями / С.М. Белобородов, В.Я. Модорский, А.И. Неверов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 97–103. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.09

Please cite this article in English as: Beloborodov S.M., Modorsky V.Ya., Neverov A.I. Vibration problems in the technological processes of assembling rotors with freezing surfaces. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 70, pp. 97-103. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.09