

УДК 623.4

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.10

С.М. Белобородов¹, В.Я. Модорский², Д.М. Цимберов¹

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

²Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБМЕРЗАЮЩИХ РОТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Предложенная статья посвящена искусственным материальным системам, работающим в условиях дефицита информации для эффективного управления. Проблематика рассматривается на примере роторов, работающих в условиях обледенения поверхностей турбоагрегатов, применяемых в авиации и теплоэнергетическом комплексе. Проведен анализ мер обеспечения динамической устойчивости роторов, поверхности которого подвержены обледенению, приводящему к неуправляемому увеличению локальных дисбалансов.

Актуальность проблематики обусловлена как общей тенденцией научно-технического прогресса, направленной на совершенствование технологий и видов продукции, так и современными вызовами экономики. К ним следует прежде всего отнести удовлетворение потребности в технологических процессах и видах продукции, максимально приближенных к запросам по показателям ресурса работы, себестоимости, стоимости эксплуатации и утилизации. Одновременно с этим обстановка на производстве осложнена враждебным отношением так называемых стран запада к развитию российской промышленности, особенно в авиации, теплоэнергетическом комплексе, обороне, электронике и т.д.

Все это создает сложное научно-техническое противоречие, отягощенное дефицитом материального обеспечения: финансовая необеспеченность и отсутствие ряда комплектующих, поставляемых ранее недружественными странами. По результатам анализа динамического состояния систем определено направление ее технологического обеспечения. Предложены два метода обеспечения динамической устойчивости наиболее проблемных элементов роторов: колес центробежных и осевых компрессоров (турбин).

При этом метод прецизионной подготовки элементов роторов к сборке предназначен для обеспечения установки элемента на вал с минимизированным эксцентриситетом образующей уплотнения и без дисбаланса, а метод эксцентриситетно-виртуальной сборки колес турбин – для уравнивания ротора с заранее известным дисбалансом. Применение разработанных методов позволяет решить сформулированное научно-техническое противоречие, существенно поднять качество продукции, снизить трудоемкость и стоимость производства. Технологические процессы с использованием этих методов прошли апробацию в промышленных условиях.

Ключевые слова: система, технология, сборка, поверхность, обледенение, динамическая устойчивость, дисбаланс, эксцентриситет, ротор, вибрация.

S.M. Beloborodov¹, V.Ya. Modorsky², D.M. Cimberov¹

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

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ENSURING DYNAMIC STABILITY OF FREEZING ROTORS BY TECHNOLOGICAL METHODS

The proposed article is devoted to artificial material systems operating in conditions of information scarcity for effective management. The problem is considered on the example of rotors operating in conditions of icing of surfaces of turbine units used in aviation and the thermal power complex. The analysis of measures to ensure the dynamic stability of rotors, whose surfaces are subject to icing, leading to an uncontrolled increase in local imbalances, is carried out.

The relevance of the problem is due to both the general trend of scientific and technological progress aimed at improving technologies and types of products, and modern challenges of the economy. These should primarily include meeting the need for technological processes and types of products that are as close as possible to the requests in terms of the resource of work, cost, cost of operation and disposal. At the same time, the situation at the production site is complicated by the hostile attitude of the so-called Western countries to the development of Russian industry, especially in aviation, the thermal power complex, defense, electronics, etc.

All this creates a complex scientific and technical contradiction, burdened by a shortage of material support: financial insecurity and the absence of a number of components supplied by previously unfriendly countries. Based on the results of the analysis

of the dynamic state of the systems, the direction of its technological support is determined. Two methods are proposed to ensure the dynamic stability of the most problematic elements of rotors: wheels of centrifugal and axial compressors (turbines).

At the same time, the method of precision preparation of rotor elements for assembly is designed to ensure the installation of the element on the shaft with minimized eccentricity of the forming seal and without imbalance, and the method of eccentricity-virtual assembly of turbine wheels is designed to balance the rotor with a pre-known imbalance. The application of the developed methods makes it possible to solve the formulated scientific and technical contradiction, significantly improve the quality of products, reduce the labor intensity and cost of production. Technological processes using these methods have been tested in industrial conditions.

Keywords: system, technology, assembly, surface, icing, dynamic stability, imbalance, eccentricity, rotor, vibration.

Рассматриваются искусственные материальные системы, в которых не хватает информации для эффективного управления, т.е. считаются сложными. Если система создана на основе жестких ограничений, то она отличается быстродействием, необходимой дискретностью, высокой эффективностью при отсутствии внешних вызовов, но ее работа сопровождается перенапряжением, повышенным расходом энергии и других ресурсов, быстрой потерей работоспособности, снижением производительности и повышением рисков.

В современных условиях более рациональными являются динамически устойчивые системы, которые отличаются большей способностью возвращаться в исходное состояние после большого возмущения. Такие системы отличаются наличием активных взаимосвязанных и взаимовлияющих непрерывных процессов обмена веществами, энергией и информацией, а также их преобразованием. Кроме того, эти системы отличаются выраженной диссипацией энергии [1], а при определенных обстоятельствах процессы сопровождаются и потерей информации.

Решение проблемы управления динамической устойчивостью сложных систем позволит обеспечить опережающее развитие наиболее важной области современной российской экономики – ее теплоэнергетической сферы. Теплоэнергетика рассматривается в рамках доктрины, определяющей направление развития теоретических и практических наук, производства, эксплуатации, всех видов обеспечения и утилизации объектов и систем. Наиболее важной частью этой сферы является транспортная составляющая, обеспечивающая логистику экономики.

Развитие технологических процессов изготовления любого продукта транспортного машиностроения опирается на достаточно сложный комплекс ранее выполненных разработок (экспериментальных исследований, различных видов моделирования, анализа сходных процессов и применения апробированных решений) и гипотез, построенных на новых теоретических основах. При этом основная масса внедряемых разработок имеет явно выраженную преемственность и прямую связь с действующими технологиями.

Это обусловлено высокой степенью интеграции таких элементов производственных систем, как станочное оборудование, приспособления и инструмент, обрабатываемые материалы, применяемые технологии обработки и сборки, измерений и контроля и т.п. Вся эта система устойчиво функционирует только при отлаженной системе управления, подготовки, распределения и расстановки кадров. Систему управления можно считать современной только при наличии определенных самонастраивающихся элементов: новаторство, система обеспечения заданного уровня качества, инициативных разработок, самообучения и самосовершенствования персонала, прогнозирования последствий принимаемых решений. При этом изменения, вносимые в такие системы, всегда будут сопровождаться изменениями в смежных элементах.

Кардинальная, революционная перестройка такой производственной системы – явление крайне редкое и нетипичное. Основное направление развития производственной системы – постоянная поэтапная модернизация всех ее элементов при обязательном условии соблюдения последовательности операций, обусловленной логической связью элементов.

Динамически развивающееся производство предусматривает постоянное повышение качества продукции обеспечивается проектированием и внедрением перспективных видов продуктов, развитием технологий, совершенствованием технологических процессов, периодическим обновлением станочного оборудования, приспособлений и инструмента, средств измерения и контроля, уровнем управления, подготовки и расстановки кадров, соответствующим поставленным задачам при постоянном снижении производственных затрат.

Описание проблемы

В современной промышленно-экономической ситуации, когда при сохраняющейся потребности в традиционных видах продуктов, производимых сложившимся комплексом предприятий машиностроения, появляется потребность в новых продуктах, имеются разработки [2–5], обеспечивающие появление новых продуктов и новых технологий, процесс управления производством резко усложняется. Это усугубляется и объективной необходимостью перемещения значительной части материальных средств, наиболее талантливых ученых, инженеров и управленцев в новую и перспективную сферу.

В такой традиционной сфере материального производства, как теплоэнергетика, ситуация осложняется объективно обусловленным резким повышением затрат на новые материалы, утилизацию, разработку новых технологий [6–9] и технологического оборудования и т.д.

При этом основная масса нерешенных задач сосредоточена вокруг наиболее важных и наиболее напряженных составляющих роторов авиадвигателей и турбоагрегатов (далее – турбоагрегаты), работающих в условиях периодического обмерзания поверхностей.

Сложившиеся объективные условия производства – повышение затрат на организацию производства и повышение требований к качеству изделий – составляют основное современное технико-экономическое противоречие. Решение такого противоречия возможно только при разработке комплекса мер, содержащих преимущественно интеллектуальную составляющую.

Детальная проработка проблематики позволяет выделить ее технологические аспекты: несоответствие балансировочных схем конструкциям отдельных узлов и деталей (элементов) ротора; погрешности сборки отдельных элементов ротора; несоответствие жесткости ротора центробежным силам, обусловленным его локальными дисбалансами; недостатки технологических процессов механической обработки и сборки: недостаточная точность изготовления отдельных элементов, входящих в ротор и примитивный характер сборки и балансировки, неоправданное превышение количества проводимых балансировочных работ.

Проявление этих аспектов обусловлено вполне объективными причинами: недостаточно изучены закономерности процесса балансировки роторов с элементами, эксцентрично установленными при сборке; недостаточно изучены закономерности влияния полученного в процессе серийной сборки роторов дисбаланса, оборотов, материалов, габаритных размеров, координат подшипников и др. на величину вибрации роторов; отсутствуют научно обоснованные модели и методики, позволяющие устанавливать основные закономерности, взаимосвязи между сборкой и балансировкой отдельных элементов и сборкой и балансировкой всего ротора и обеспечивающие минимизацию вибраций.

Преодоление этих факторов вполне может быть выполнено при выполнении исследований:

- изучение закономерностей процессов балансировки роторов с элементами, эксцентрично установленными при сборке;
- изучение закономерностей влияния частот вращения, материалов, габаритных размеров, координат подшипников и др. на величину вибрации серийной сборки роторов,
- разработка научно обоснованных моделей и методик, позволяющие устанавливать основные закономерности, взаимосвязи между сборкой и балансировкой отдельных элементов и сборкой, и балансировкой всего ротора, обеспечивающие минимизацию вибраций на всех режимах работы.

В основе разработки такого комплекса должно лежать решение основного технического противоречия:

- между наличием неизвестного расположения дисбалансов вала (ротора) и отсутствием метода их описания,
- между наличием монтажного дисбаланса и отсутствием метода его коррекции,
- между точностью изготовления и его стоимостью.

Разрешение этого противоречия возможно на основе применения принципов адаптации (позднелат. *adaptatio* – прилаживание, приспособление, от лат. *adapto* – приспособляю), в частности – на основе применения методов адаптирующей сборки, моделирования и коррекции локальных монтажных дисбалансов, а также применения адаптирующих методик центрирования валов.

Эти задачи могут быть решены с использованием рабочей гипотезы: заданный уровень динамической устойчивости валопровода турбоагрегата может быть обеспечен адаптацией его элементов к условиям эксплуатации в ходе технологических процессов сборки, что предусматривает прогнозирование, описание, минимизацию их локальных и коррекцию монтажных дисбалансов.

Разработка методов сборки

Валопроводы турбоагрегатов состоят из роторов, имеющих дисбалансы в нескольких плоскостях, положение их неизвестно. Описание распределения локальных дисбалансов позволит решить задачу многоплоскостного уравнивания ротора в ходе его сборки.

Решение предложенной проблемы требует разработки новых методов сборки, обеспеченных информационной базой. Методы должны содержать имитационные составляющие и обеспечивать снижение трудоемкости работ с одновременным повышением качества сборки.

Материалы и методы

В статье рассматриваются два технологических метода, обеспечивающих заданный уровень динамической устойчивости сложной системы роторов турбоагрегатов.

Метод прецизионной подготовки элементов роторов к сборке предназначен для обеспечения установки элемента на вал с минимизированным эксцентриситетом образующей уплотнения 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.

Технологическая подготовка производства (ТПП) подготовки элемента 1 к сборке предусматривает его предварительную балансировку с использованием технологической оправки 2 (рисунк, а). Элементы представляют собой сложные сборные конструкции и включают в себя консольные детали. При этом не учитываются величина и направление эксцентриситета оправки. Не учитывается также и положение эксцентриситета посадочной поверхности вала.

Кроме того, эта балансировка проводится без учета положения начальных локальных дисбалансов этого элементов (I_1, I_2), ее схема приведена на рисунке, б. Уравнивание элемента проводится введением дисбаланса $I_{кор}$, диаметрально противоположного суммарному дисбалансу $I_{сум}$. При этом коррекция проводится симметрично по двум поверхностям элемента. Это приводит к распределению $I_{кор}$ в виде одинаково направленных дисбалансов I_1^* и I_2^* . При суммировании I_1, I_2, I_1^* и I_2^* появляются взаимно уравнивающие дисбалансы I_1^P и I_2^P . На рабочих частотах, превышающих балансировочные в 6–20 раз, изгибающее усилие, приложенное к консольной части и обусловленное дисбалансом I_2^P , увеличивается в 36–400 раз. Это приводит к появлению значительного динамического дисбаланса ротора.

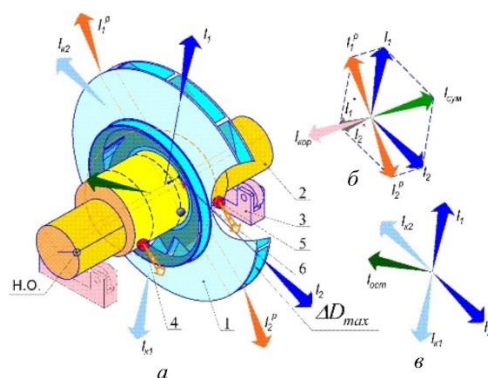


Рис. Схема подготовки элемента ротора к сборке: а – общий вид (Н.О. – нейтральная ось); б – схема балансировки без учета размещения начальных дисбалансов, в – схема балансировки с учетом размещения начальных дисбалансов. 1 – элемент, 2 – оправка, 3 – опора балансировочного станка, 4, 5 – уравнивающие грузики, 6 – имитирующий грузик

Следовательно, сформулирована задача сборки ротора с дисбалансами элементов, обусловленными эксцентриситетами рабочих и балансировочных поверхностей (e_e) вала, посадочных и балансировочных поверхностей элемента ($e_{опр}$) на оправке, а также с необходимой минимизацией эксцентриситета внешней образующей элемента ($e_{обр}$) относительно посадочной поверхности на валу.

Задача минимизации радиального биения внешней образующей элемента решается его установкой с диаметрально противоположным разворотом эксцентриситетов посадочной поверхности вала и образующей элемента: $\varphi_v = \varphi_{обр} + 180^\circ$.

Задача минимизации дисбаланса, обусловленного эксцентриситетами установки элемента на оправку, решается уравниванием дисбаланса, обусловленного эксцентриситетом установки на оправку, установкой двух равноудаленных от центра массы элемента грузов, масса каждого из которых определяется как

$$m_y = \frac{\Delta D_{опр} \cdot M_i}{2(D+h)}, \quad (1)$$

При этом место установки грузов диаметрально противоположно максимальному радиальному биению посадочной поверхности оправки.

Задача минимизации дисбаланса, обусловленного эксцентриситетом установки элемента на вал (ΔD_e), решается имитацией дисбаланса. Дисбаланс имитируется установкой груза на поверхность оправки со стороны максимального радиального биения образующей. Его масса определяется по формуле

$$m_u = \frac{\Delta D_e \cdot M_i}{D+h}. \quad (2)$$

При этом выходные параметры уравновешенности элемента характеризуются его заданным остаточным дисбалансом, совпадающим с направлением эксцентриситета его внешней образующей ($I_{ост} = e_e \cdot M_i$), при направлении дисбаланса:

$$\varphi_I = \varphi_{обр}. \quad (3)$$

Взаимное двухплоскостное уравнивание I_1 и $I_{к1}$, I_2 и $I_{к2}$ обеспечит отсутствие изгибающих усилий, приложенных к консольной части элемента (см. рисунок, в). Блок-схема алгоритма прецизионной подготовки элемента к сборке приведена на рисунке.

Прецизионная подготовка элемента к сборке обеспечивает его установку на подготовленный вал без монтажного дисбаланса, создает условия для минимизации локальных дисбалансов ротора.

По имеющемуся опыту это обеспечивает уменьшение эксцентриситета внешней образующей в 3–4 раза, при снижении стоимости работ по установке колеса на ротор на 20–25 %.

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.

Типовой технологический процесс предусматривает минимизацию дисбалансов колес турбин на основе применения нескольких методов: виртуальной сборки с использованием программного обеспечения, сборки с использованием универсальной диаграммы, сборки с использованием 2- и 4-лучевых схем. Последующий технологический процесс сборки роторов турбин почти всегда завершается балансировкой.

Начальный дисбаланс и собранного колеса, и ротора турбины минимизируется применением выбранного метода сборки, остаточный дисбаланс нормализуется балансировкой. Последующая сборка валопроводов, в которые объединяются роторы турбин, создает монтажные дисбалансы, обусловленные эксцентриситетами их установки. Затем дисбалансы устраняют балансировкой.

Для повышения точности сборки и снижения объема ее работ предлагается проводить сборку колес с использованием n -лучевых схем, исходя из заранее заданных параметров дисбаланса

колеса с одновременным контролем уравновешенности в ходе сборки. Перед сборкой сортируют лопатки, укладывая их по мере уменьшения их относительной статической неуравновешенности ($I_{осн}$).

Учитывая заранее определенную n -лучевую схему, из общего количества лопаток m изымают n лопаток с максимальной $I_{осн}$ и устанавливают их в качестве маркеров равномерно по окружности колеса. Оставшееся количество лопаток разбивают на группы, по степени уменьшения $I_{осн}$:

$$k = \frac{m - n}{2n}, \quad (4)$$

где k – количество групп.

Используя параметры имеющегося начального дисбаланс колеса I_n рассчитывают параметры виртуальных ступенчатых дисбалансов $I_{всд}$:

$$I_{всд}^- = \frac{I_n^-}{k}. \quad (5)$$

Используя программное обеспечение, составленное по математической модели:

$$\begin{cases} I_x = \left(k I_{всд} \cos \alpha_{всд} + \sum_{i=1}^m I_i \cdot \cos \alpha_i \right), \\ I_y = \left(k I_{всд} \sin \alpha_{всд} + \sum_{i=1}^m I_i \cdot \sin \alpha_i \right), \\ I_{кт} = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}, \\ \alpha_{кт} = \arctg \frac{I_x}{I_y}, \end{cases} \quad (6)$$

выполняют моделирование сборки колеса турбины: введение первого виртуального ступенчатого дисбаланса, попарная укладка лопаток первой группы к лопаткам-маркерам, начиная с лопаток с максимальной относительной статической неуравновешенностью (ОСН), контроль уравновешенности смоделированной укладки, повторение циклов укладки, контроль и коррекция смоделированного комплекта.

Такая укладка обеспечивает соблюдение требований по ограничению разницы ОСН, противоположно установленных, и соседних лопаток и минимизирует неуравновешенность колеса при укладке каждой группы. Постоянный контроль величины и направления дисбаланса после укладки группы позволяет корректировать порядок укладки следующей группы. При увеличении числа n повышается уравновешенность собранного колеса, причем n может быть четным и нечетным. По результатам исследования разработаны инженерные решения изобретательского уровня, имеющие патентную защиту [10–15].

Обсуждение результатов

Внедрение разработанных методов в технологические процессы НПО «Искра» позволяет сделать заключение, что технологический процесс управляемой сборки обеспечивает снижение динамических нагрузок на опоры и гибкие элементы валопроводов в 3–5 раз. Их применение в полном объеме позволило существенно снизить виброактивность роторов. Так роторы с частотой вращения до 100 Гц показывали уровень перемещений в опорах в 5–15 мкм, а с частотой вращения 150 Гц – в 5–20 мкм во всем рабочем диапазоне. При сборке роторов с частотой вращения 230 Гц и применением части методов виброперемещение опор роторов не превышало 30 мкм.

Увеличение виброперемещения опор роторов при прохождении 1 критической скорости – не более, чем в 2 раза в сравнении с рабочим диапазоном было отмечено в ходе приемосдаточных и пуско-наладочных работ.

Применение метода расчетно-объемной подготовки вала к последующей сборке создает экономию средств на 20–30 % (в зависимости от сложности изделия) за счет исключения операции балансировки.

Одновременно с этим снижает трудоемкость технологических процессов, а, кроме этого, позволяет заменять технологические операции виртуальным моделированием.

Дискретность грузиков в 0,5 г позволяет провести коррекцию дисбаланса трансмиссии, вызванного эксцентриситетом ее установки, до пределов требований конструкторской документации.

Выводы

1. Разработанные, апробированные и внедренные в технологические процессы адаптирующие методы сборки обеспечивают высокий технико-экономический эффект: одновременно со снижением объема работ, повышается точность сборки.

2. Разработанное программное обеспечение позволит создать автоматизированные рабочие места:

– инженера-технолога сборочного цеха для проектирования технологического процесса по заранее заданным параметрам сборки роторов;

– оператора сборочных работ для формирования блока исходных данных состояния валов после изготовления и параметров для каждого этапа сборки;

– испытателя на стенде приемо-сдаточных испытаний.

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, Petrov V.Yu. 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, 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 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. – pp. 625–627.

7. Семенов А.Н., Непомилуев В.В. Учет взаимодействия деталей в сборочных системах как способ повышения качества и работоспособности // *СТИН*. – 2019. – № 2. – С. 24–27.

8. 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.

9. Песин М.В., Макаров В.Ф., Мокроносов Е.Д. Особенности технологического процесса формообразования резьб на изделиях машиностроения, обеспечивающего повышение качества изделия и снижение его себестоимости // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2011. – № 6 (18). – С. 20–21.

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. Semenov A.N., Nepomiluyev V.V. Uchet vzaimodeystviya detaley v sborochnykh sistemakh kak sposob povysheniya kachestva i rabotosposobnosti [Taking into account the interaction of parts in assembly systems as a way to improve quality and efficiency]. *STIN*, 2019, No. 2, pp. 24-27.

8. 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.

9. Pesin M.V., Makarov V.F., Mokronosov YE.D. Osobennosti tekhnologicheskogo protsessa formoobrazovaniya rez'b na izdeliyakh mashinostroyeniya, obespechivayushchego povysheniye kachestva izdeliya i snizheniye 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.

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, 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).

Цимберов Дмитрий Михайлович (Пермь, Россия) кандидат военных наук, начальник кафедры «Эксплуатация техники», Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации (Пермь, 614030, Гремячий лог, 1, e-mail: cimberovdm@rosgvard.ru).

About the authors

Sergey M. Beloborodov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of “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 of Department “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).

Dmitriy M. Tsimberov (Perm, Russian Federation) – CScinMartial Sciences, Head of the Department “Equipment Operation”, Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation (1, Gremyachiy log str., Perm, 614030, e-mail: cimberovdm@rosgvard.ru).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФ № 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: 28.09.2022

Одобрена: 30.09.2022

Принята к публикации: 10.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Белобородов, С.М. Обеспечение динамической устойчивости обмерзающих роторов технологическими методами / С.М. Белобородов, В.Я. Модорский, Д.М. Цимберов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* – 2022. – № 70. – С. 104–111. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.10

Please cite this article in English as: Beloborodov S.M., Modorsky V.Ya., Cimberov D.M. Ensuring dynamic stability of freezing rotors by technological methods. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 70, pp. 104-111. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.10