DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.07

УДК 62-251: 658.515

С.М. Белобородов^{1,2}, М.Л. Цельмер^{1,2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»», Пермь, Россия

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СБОРКИ РОТОРОВ

Рассматривается методика уравнивающей сборки роторов, при которой проводится процесс управления векторами локальных дисбалансов и эксцентриситетов. Сформулированы научно-методические, технологические и проектно-конструкторские проблемы, которые можно решить только комплексным внедрением адаптационного информационно обеспеченного технологического процесса. Сформулирована гипотеза исследования: заданный уровень динамической устойчивости роторов может быть обеспечен адаптацией к условиям эксплуатации в ходе проектирования и изготовления, что предусматривает прогнозирование появления дисбалансов, описание процесса сборки ротора, управление векторами дисбалансов и эксцентриситетов. Поставлена цель и определены задачи для ее решения. Проведен анализ существующих подходов к решению задач обеспечения динамически устойчивой работы роторов. Выявлено, что применяемые на сегодняшний день технологические процессы не решают задачи информационного сопровождения изделий, моделирования процессов и применения адаптационных технологических процессов. Разработана и изложена методика уравнивающей сборки роторов, позволяющая решить практические противоречия высокой точностью сборки и изготовления, снижением трудоемкости и себестоимости производства. Таким образом, актуальность поставленных задач определяет необходимость применения предложенной адаптационной информационно обеспеченной методики. Реализация методов для включения в технологический процесс требует разработки алгоритма на основе предложенной методики.

Ключевые слова: центробежный компрессор, ротор, вал, рабочее колесо, дисбаланс, уравнивающая сборка, информационное сопровождение изделий, балансировка, динамическая устойчивость.

S.M. Beloborodov^{1,2}, M.L. Tselmer^{1,2}

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² PSC Research and Production Association "Iskra"

INFORMATION SUPPORT FOR THE ASSEMBLY OF ROTORS

In this paper, the technique of balancing the assembly of rotors is considered, under which the process of control of the vectors of local imbalances and eccentricities is carried out. The scientific-methodical, technological and design-constructive problems are formulated, which can be solved only by complex introduction of the adaptive information-based technological process. The research hypothesis is formulated: a given level of dynamic stability of rotors can be provided by adaptation to operating conditions during design and manufacturing, which involves predicting the appearance of imbalances, a description of the process of assembling the rotor, managing the vectors of imbalances and eccentricities. The goal is set and the tasks for solving it are determined. An analysis of existing approaches to solving problems of ensuring dynamically stable operation of rotors is carried out. It is revealed that the technological processes applied to date do not solve the problem of information support of products, process modeling and application of adaptive technological processes. The technique of balancing assemblage of rotors is developed and outlined, allowing to solve practical contradictions with high accuracy of assembly and manufacturing by reduction of labor input and cost of production. Thus, the urgency of the tasks posed determines the need to apply the proposed adaptive information-based methodology. Implementation of methods for inclusion in the technological process requires the development of an algorithm based on the proposed methodology.

Keywords: centrifugal compressor, rotor, shaft, impeller, disbalance, balancing assembly, information support of products, balancing, dynamic stability.

Введение

Задачи современного производства всё больше концентрируются в области технологий. Это объясняется обострением противоречия между запрошенными параметрами, заданными с высокой точностью и необходимостью постоянного снижения себестоимости, продиктованной конкуренцией рынка. При этом формируется комплекс противоречий:

– между наличием неизвестного расположения локального дисбаланса и отсутствием процедуры описания локальных дисбалансов;

- между наличием сборочного дисбаланса элементов и отсутствием процедуры его коррекции без балансировки;
- между возможностью обеспечения динамической устойчивости ротора при сборке и отсутствием методики применения уравнивающей сборки роторов;
- между точностью и стоимостью изготовления.

Разумеется, такой комплекс противоречий может быть разрешен только внедрением активной интеллектуальной составляющей: информационное сопровождение изделия, моделирование технологических процессов, замена многоциклового технологического процесса на информационно обеспеченный адаптационный.

Используемые в настоящее время технологические процессы сборки роторов содержат многочисленные этапы балансировки. Каждый такой цикл накапливает неуравновешенные дисбалансы элементов и эксцентриситеты поверхностей [1–3].

Актуальность работы заключается в необходимости повышения точности сборки и снижения себестоимости изготовления за счет внедрения адаптационного информационно обеспеченного технологического процесса сборки роторов.

Проблемы сборки роторов

Применяемые на сегодняшний день технологические процессы не решают задачи информационного сопровождения изделий, моделирования процессов и применения адаптационных технологических процессов. Проблематику существующих процессов можно разделить на три блока:

1. Научно-методическая проблематика:
 - 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.
2. Технологическая проблематика:
 - 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.
3. Проектно-конструкторская проблематика:
 - несоответствие технических требований КД условиям эксплуатации ротора;
 - несоответствие заданных условий монтажа элементов ротора условиям эксплуатации;
 - несоответствие используемых государственных стандартов конструкции роторов;
 - отсутствие конструкторских методик прогнозирования и учета монтажных дисбалансов;
 - отсутствие технологических рекомендаций в период проектирования и конструирования роторов;
 - системные конструкторские ошибки в КД, обусловленные отсутствием у конструкторов знаний в области динамической устойчивости роторов.

Научно-методические, технологические и проектно-конструкторские несоответствия можно решить только комплексным внедрением адаптационного информационно обеспеченного технологического процесса.

Цель работы – обеспечение заданного уровня динамической устойчивости роторов за счет использования метода уравнивающей сборки.

Поставленная цель определяет необходимость решения следующих задач:

1. Установление зависимостей между точностью сборки и погрешностями изготовления.
2. Установление зависимостей между эксцентриситетами детали и монтажными дисбалансами.
3. Установление закономерностей и зависимостей между устранением локальных дисбалансов и эксцентриситетов и обеспечением заданного уровня динамической устойчивости ротора.
4. Разработка метода уравнивающей сборки роторов.
5. Создание алгоритма проектирования технологического процесса.

Первоначальное представление определенных целей и задач позволяет сформировать гипотезу исследования. Заданный уровень динамической устойчивости роторов может быть обеспечен адаптацией к условиям эксплуатации в ходе проектирования и изготовления, что предусматривает прогнозирование появления дисбалансов, описание процесса сборки ротора, управление векторами дисбалансов и эксцентриситетов.

Постановка задачи

Использование математического моделирования позволяет проводить поиск закономерностей и решений уравнивающей сборки роторов, что обеспечивает управление технологическим процессом сборки ротора [4].

При создании математической модели необходимо:

- Выбрать критерий оптимизации, т.е. показатель, оптимума которого необходимо достичь изменением других параметров и факторов:

$$A = f(\Delta R, \Delta W) \rightarrow \min,$$

где A – критерий оптимизации; ΔR – изменение величины динамического изгиба ротора; ΔW – изменение величины вибрации.

- Определить целевую функцию, т.е. установить зависимость выбранного критерия от известных управляемых переменных факторов:

$$A = f(I_i, \sum i_i, \Delta, L, D),$$

где I_i – локальный дисбаланс; $\sum i_i$ – сумма локальных дисбалансов; Δ – биение основных поверхностей; L – длина пролетной части вала (участка вала); D – диаметр участка вала;

- Установить ограничения, т.е. определить пределы изменения переменных факторов, обеспечивающих работоспособность ротора как системы:

$$Lime(I_i) \rightarrow 4 \text{ мкм}, Lim \sum i_i(I_i) \rightarrow 4 \text{ мкм}, 6 \leq \Delta \leq 15 \text{ мкм},$$

где $e(I_i)$ – удельный локальный дисбаланс.

Применение математического моделирования в уравнивающей сборке ротора подразумевает управление векторами дисбалансов. При этом дисбалансы следует рассматривать применительно к каждой конкретной ситуации:

- при изготовлении деталей – общий начальный и распределение локальных дисбалансов;
- при сборке роторов – распределение локальных сборочных дисбалансов исходя из заранее заданных параметров сборки;
- при балансировке деталей и роторов – распределение начальных локальных дисбалансов;

– при монтаже роторов – исходя из распределения локальных монтажных дисбалансов и доступности плоскостей коррекции [5, 6].

Управление векторами дисбалансов при проведении сборки ротора зависит от выбора основных и вспомогательных поверхностей элементов. Классификацию поверхностей деталей по признаку конструктивного назначения целесообразно представить в следующем виде:

- исполнительные (рабочие) поверхности, с помощью которых деталь выполняет свое служебное назначение в машине;
- основные (посадочные) базирующие поверхности, которыми данная деталь присоединяется к другим деталям;
- вспомогательные (присоединительные) базирующие поверхности, служащие для присоединения других деталей к данной;
- свободные (конструкционные) поверхности, не сопрягаемые с другими поверхностями при работе машины и лишь определяющие конструктивную завершенность форм детали [7].

Дисбалансы и эксцентриситеты поверхностей образуются при изготовлении элементов ротора (погрешности изготовления), при сборке (погрешности взаимной установки). В текущих технологических процессах при сборке дисбалансы и эксцентриситеты накапливаются, и, следовательно, усложняется задача уравнивания ротора, появляется трудоемкая и дорогостоящая процедура поэтапной многоплоскостной балансировки ротора [8, 9].

Основной целью сборки и балансировки роторов является динамически устойчивая работа ротора в составе энергетической установки. Ротор, сбалансированный на станке в соответствии с требованиями, предъявляемыми к его уравниванию и оценке остаточного дисбаланса, может быть динамически неустойчивым при работе. Это объясняется тем, что предварительно результаты и качество сборки и балансировки ротора можно оценить только на балансировочном оборудовании. Именно поэтому появилась необходимость в разработке методики уравнивающей сборки роторов, при которой проводится сборка с управлением векторами локальных дисбалансов элементов и эксцентриситетов поверхностей.

Существует несколько подходов к решению задач обеспечения динамически устойчивой работы роторов. В работах А.И. Глейзера предлагается применение комплексных методов вероятностного и статистического прогнозирования дисбаланса роторов, основанных на использовании результатов уравнивания и экспериментальных данных [10, 11]. Такой метод позволяет обеспечить заданный уровень динамически устойчивой работы ротора при сборке и балансировке с распределенными локальными дисбалансами в лабораторных условиях. В производстве реальной продукции применение данной методики требует постоянного инженерно-технического контроля и расчетов на каждом этапе сборки и балансировки, что усложняет технологию сборки и не решает задачи постоянного снижения себестоимости изготовления.

В работах Е.В. Урьева предлагается методика многоплоскостной балансировки роторов на разгонно-балансировочных стендах, правила выбора частот коррекции и мест расположения плоскостей коррекции, учитывающие конструктивные особенности роторов [12, 13]. Данный метод предполагает устранение локальных дисбалансов в местах изгибов валов на рабочих частотах вращения. Для этого необходимо дорогостоящее балансировочное оборудование, работающее на высоких скоростях. При этом обеспечивается высокая степень автоматизации технологического процесса балансировки роторов с резким увеличением энергоемкости, при этом решается задача обеспечения уравнивания ротора на заданном уровне с увеличением количества циклов балансировки и, как следствие, увеличение стоимости изготовления. Кроме того, устраняя изгибы вала, высокочастотная балансировка не устраняет виброактивности ротора, обусловленной локальными дисбалансами и деформациями рабочих колес.

Известна методика уравнивания ротора, при применении которой предварительно проводится подготовка элементов ротора: низкочастотная многоплоскостная балансировка вала, двухплоскостная балансировка рабочих колес ротора. Сборка и многоплоскостная балансировка ротора проводится по заранее заданным параметрам [14, 15]. В результате получа-

ют уравновешенный ротор, соответствующий заранее заданным параметрам, но не решается практическое противоречие между заданными с высокой точностью параметрами и необходимостью снижения трудоемкости производства и себестоимости изготовления.

Решение задачи

Методика уравнивающей сборки роторов позволяет решить практические противоречия с высокой точностью сборки и изготовления снижением трудоемкости и себестоимости производства. Методика состоит из двух этапов.

Первый этап – подготовка элементов ротора к сборке. Блок-схема работ при подготовке элементов ротора к сборке показана на рис. 1. На данном этапе проводят измерение и паспортизацию параметров вала и насадных элементов ротора, также проводят расчет параметров балансировки всех элементов ротора и балансируют их. После этого проводят измерения и паспортизацию сбалансированных насадных элементов и вала ротора.

Важнейшей составляющей информационного сопровождения изделий является измерение параметров и паспортизация данных. Именно благодаря этому появляется возможность замены многоциклового технологического процесса сборки ротора на адаптационный уравнивающий.

Рис. 1. Блок-схема работ при подготовке элементов к сборке

При подготовке вала ротора и насадных элементов к сборке проводят измерение и запись параметров и характеристик деталей. У вала ротора определяют и маркируют максимальное радиальное биение контрольного пояска. Контрольный поясок – место максимального изгиба вала после механической обработки, необходим для параметризации сборки и распределения дисбалансов при уравнивающей сборке. Также измеряют и маркируют точки максимального радиального биения в плоскостях установки элементов ротора на вал для последующего уравнивания дисбалансов при сборке. У насадных элементов (рабочих колес) выполняют измерение радиального биения контрольного пояска (середина контактной поверхности лабиринтного уплотнения) относительно установочной поверхности балансировочной оправки. Полученные при измерениях значения обязательно заносят в сопроводительную документацию на детали.

Для проведения адаптационной сборки проводят расчет параметров балансировки. В этом расчете учитывают паспортизованные значения измерений, массово-геометрические параметры элементов ротора, а также задают требования по качеству балансировки и точности последующей сборки ротора. В результате получают необходимые для проведения балансировки величины и направления дисбалансов участков вала и насадных элементов ротора.

Балансировка вала заключается в поэтапных циклах двухплоскостной балансировки. Целесообразно начинать балансировку с пары плоскостей, ближайших к поверхностям опор, по-

следующие этапы балансировки проводятся с выбором плоскостей коррекции от периферии к центру вала. Остаточные дисбалансы направляют диаметрально противоположно максимальному биению контрольного пояса. При этом получившиеся дисбалансы должны соответствовать рассчитанным ранее значениям по величине и направлению.

Балансировку насадных элементов (рабочих колес) проводят на паспортизованной конической оправке по двум плоскостям коррекции при заранее заданных параметрах установки. При установке насадных элементов на балансировочную оправку радиальное биение посадочной поверхности оправки разворачивают диаметрально противоположно направлению максимального радиального биения уплотнительной поверхности рабочего колеса. При балансировке обеспечивается заданное направление и величины остаточных дисбалансов.

После проведения всех циклов балансировки элементов ротора получившиеся параметры (значения и направления остаточных дисбалансов) записывают в сопроводительную документацию для дальнейшего использования при сборке ротора.

Второй этап уравнивающей сборки – сборка ротора с заранее заданными параметрами дисбалансов (величина и направление). Блок-схема работ по сборке ротора показана на рис. 2.

Сборку ротора проводят с установкой всех элементов ротора на вал с заданной ориентацией, управлением векторами дисбалансов и эксцентриситетов. Максимальные биения контактной поверхности рабочих колес разводят диаметрально противоположно с максимальными биениями посадочных поверхностей вала, а дисбалансы насадных элементов ротора направляют диаметрально противоположно дисбалансам участков вала.

При экспериментальных сборках практически определено повышение точности сборки не менее чем на 15 %. За счет применения уравнивающей сборки объем балансировочных работ при изготовлении ротора снизился на 25–30 % [15].

Проверку уравнишенности ротора после сборки проводят на балансировочном оборудовании. При несоответствии ротора заданным параметрам необходимо провести коррекцию дисбалансов. После завершения работ при сборке ротора с заранее заданными дисбалансами полученные параметры уравнишивания заносят в сопроводительную документацию.

Рис. 2. Блок-схема работ при сборке ротора с заранее заданными параметрами дисбалансов

Обсуждение результатов

Таким образом, актуальность поставленных задач определяет необходимость применения предложенной методики уравнивающей сборки ротора. Реализация методов для включения в технологический процесс требует разработки алгоритма на основе предложенной методики. Для успешного применения методов уравнивающей сборки и информационного сопровождения изделий требуется организация дополнительного автоматизированного рабочего места для обеспечения выполнения задач по паспортизации и расчетам параметров сборки.

Экспериментальная проверка разработок в области уравнивающей сборки ротора и информационного сопровождения изделий позволяет внедрить разработанную методику в технологические процессы, повысить за счет этого точность сборки не менее чем на 15 %, снизить при этом себестоимость изготовления за счет исключения многоэтапной процедуры балансировки ротора (объем балансировочных работ снижается на 25–30 %) и уравновесить дисбалансы элементов и эксцентриситеты поверхностей в процессе сборки ротора.

Библиографический список

1. Бишоп Р., Паркинсон А. Применение балансировочных машин для уравнивания гибких роторов // Конструирование и технология машиностроения. – 1972. – № 2. – С. 66–84.
2. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya. Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030113-1-030113-5.
3. Цимберов Д.М. Общая схема обеспечения функциональной безопасности при проектировании технологических процессов сборки перекачивающих агрегатов // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2014. – № 12-2. – С. 270–275.
4. Таха Х. Введение в исследование операций: в 2 кн.: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – Кн. 2. – 496 с.
5. Корнеев Н.В. Метод и устройство вибростабилизационной обработки для снижения эксплуатационного дисбаланса гибких роторных систем // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2007. – Т. 9. – С. 707–711.
6. Цимберов Д.М. Информационная модель диагностирования газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // Транспортное дело России. – 2014. – № 4(113). – С. 52–53.
7. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
8. Непомилуев В.В. Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Рыбинск: Изд-во Рыбинск. гос. авиац. техн. ун-та, 2000. – 44 с.
9. Базров Б.М., Таратынов О.В., Клепиков В.В. Технология сборки машин / под общ. ред. Б.М. Базрова. – М.: Спектр, 2011. – 368 с.
10. Глейзер А.И. Вероятностные методы решения конструкторско-технологических задач снижения вибраций роторных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 1996. – 34 с.
11. Глейзер А.И., Корнеев Н.В. Дисбаланс и балансировка роторных систем. – Тольятти, 2004. – 240 с.
12. Урьев Е.В. Основы надежности и технической диагностики турбомашин. – Екатеринбург, 1996. – 70 с.
13. О нормировании качества балансировки гибких роторов / Е.В. Урьев, А.В. Кистойчев, Е.Ю. Дегтярева, М.М. Львов, М.А. Биялт, А.В. Швацкий, А.М. Деминов // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 11–12. – С. 9–18.
14. Ковалев А.Ю. Технологическое обеспечение уравниваемости высокоскоростных роторов с магнитными подшипниками на основе компенсационного метода сборки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Рыбинск, 2013. – 16 с.
15. Белобородов С.М. Методология обеспечения динамической устойчивости валопроводов высокоскоростных газотурбинных агрегатов на основе адаптационной сборки роторов: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2011. – 334 с.

References

1. Bishop R., Parkinson A. Primeneniye balansirovochnykh mashin dlya uravnoveshivaniya gibkikh ro-torov [The use of balancing machines for balancing flexible rotors]. *Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroyeniya*, 1972, no. 2.
2. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya. Impact of Magnetic Suspension Stiffness on Aeroelastic Compressor Rotor Vibrations of Gas Pumping Units. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1770, pp. 030113-1-030113-5.
3. Tsimberov D.M. Obshchaya skhema obespecheniya funktsional'noy bezopasnosti pri proyektirovanii tekhnologicheskikh protsessov sborki perekachivayushchikh agregatov [General scheme for ensuring functional safety in the design of technological processes for assembling pumping units]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2014, no. 12-2, pp. 270-275.
4. Takha K.H. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy: v 2 kn. Kn. 2: per. s angl [Introduction to the study of operations: in 2 books. Book 2: Translation from English]. Moscow: Mir, 1985, 496 p.
5. Korneyev N.V. Metod i ustroystvo vibrostabilizatsionnoy obrabotki dlya snizheniya ekspluatatsion-nogo disbalansa gibkikh rotornykh sistem [Method and device of vibration stabilization treatment to reduce

operational disbalance of flexible rotor systems]. *Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra RAN*, 2007, Vol. 9, pp. 707-711.

6. Tsimberov D.M. Informatsionnaya model' diagnostirovaniya gazoturbinnikh gazoperekachivayushchikh agregatov [Information model for diagnosing gas turbine gas pumping units]. *M. Transportnoye delo Rossii*, 2014, no. 4(113), pp. 52-53.

7. Bezyazychnyy V.F. Metod podobiya v tekhnologii mashinostroyeniya [Similarity method in engineering technology]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2012, 320 p.

8. Nepomiluyev V.V. Razrabotka tekhnologicheskikh osnov obespecheniya kachestva sborki vysokotochnykh uzlov gazoturbinnikh dvigateley [Development of technological fundamentals for quality assurance of assembly of high-precision components of gas turbine engines]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Rybinsk: Izd-vo RGATA, 2000, 44 p.

9. Bazrov B.M., Taratynov O.V., Klepikov V.V. Tekhnologiya sborki mashin [Technology of assembling machines]. Moscow: Spektr, 2011, 368 p.

10. Gleyzer A.I. Veroyatnostnyye metody resheniya konstruktorsko-tekhnologicheskikh zadach snizheniya vibratsiy rotornykh mashin [Probabilistic methods for solving engineering and technological problems of reducing vibrations of rotary machines]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 1996, 34 p.

11. Gleyzer A.I., Korneyev N.V. Disbalans i balansirovka rotornykh sistem [Imbalance and balancing of rotor systems]. Tolyatti, 2004, 240 p.

12. Uryev Ye.V. Osnovy nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki turbomashin [Basics of reliability and technical diagnostics of turbomachines]. Yekaterinburg, 1996, 70 p.

13. Uryev Ye.V., Kistoychev A.V., Degtyareva Ye.Yu., Lvov M.M., Biyalt M.A., Shvatskiy A.V., Deminov A.M. O normirovanii kachestva balansirovki gibkikh rotorov [On the standardization of the quality of balancing of flexible rotors. Heavy Engineering]. *Tyazheloye mashinostroyeniye*. 2016, no. 11-12, pp. 9-18.

14. Kovalev A.Yu. Tekhnologicheskoye obespecheniye uravnoveshennosti vysokoskorostnykh rotorov s magnitnymi podshipnikami na osnove kompensatsionnogo metoda sborki [Technological support of the balance of high-speed rotors with magnetic bearings based on the compensation method of assembly]. Abstract of candidate's degree dissertation. Rybinsk: Izd-vo RGATU, 2013, 16 p.

15. Beloborodov S.M. Metodologiya obespecheniya dinamicheskoy ustoychivosti valoprovodov vysokoskorostnykh gazoturbinnikh agregatov na osnove adaptatsionnoy sborki rotorov [Methodology for ensuring the dynamic stability of shafts of high-speed gas turbine units based on the adaptive assembly of rotors]. Doctor's degree dissertation. Perm: Izd-vo PNIPU, 2011, 334 p.

Об авторах

Белобородов Сергей Михайлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29), заместитель начальника отдела ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: bsm723@iskra.perm.ru).

Цельмер Марк Леонидович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29), руководитель группы ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: cml723@iskra.perm.ru).

About the authors

Sergei M. Beloborodov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Technology of Machine Building, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation), Deputy Department Head, PSC Research and Production Association “Iskra” (28, Akademik Vedeneyev st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: bsm723@iskra.perm.ru).

Mark L. Tselmer (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Technology of Machine Building, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation), Team Manager, PSC Research and Production Association Iskra (28, Akademik Vedeneyev st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: cml723@iskra.perm.ru).