DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.07

УДК 62-135

А.Ф. Сальников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОДАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Описан алгоритм построения модального анализа при формировании волнового поля в деталях сложной геометрии. Показано, что, используя алгоритм модального вычета, можно с определенной достоверностью строить диагностическую модель по определению технического состояния объекта, возможных дефектов, отклонений в геометрических размерах (например, разнотолщинность, отклонение от заданного размера и т.д.), а также изменения плотности материала, микротрещин в теле конструкции. Показано, что данный алгоритм может использоваться без определенных знаний априорного волнового поля объекта, поскольку для выявления различных отклонений его структуры достаточно использовать определенное количество датчиков (не менее двух), установленных определенным образом по геометрическим плоскостям и их переходам, формирующим пространственную геометрию изделия. Проведено поэлементное «прослушивание» определенных однотипных зон детали при модальном их возбуждении, построен алгоритм определения ее технического состояния. С помощью анализа изменения волнового поля, формируемого поочередно от датчика к датчику, в объекте выстраивается алгоритм распознавания. Следовательно, получаемая оценка технического состояния объекта может быть построена на структурных характеристиках конкретного элемента, детали или сборки в целом. Приведен алгоритм диагностики сложных пространственных деталей на примере дефлектора второй ступени турбины высокого давления двигателя ПС-90А и кольца 0 ступени компрессора двигателя ПС-90ГП-2. Волновой алгоритм построен на анализе виброакустических откликов конструкции с использованием модального анализа при формировании виброакустических полей в изделии и на выявлении влияния различных дефектов на изменение амплитудно-частотных характеристик волнового поля исследуемой детали. Приведены результаты оценки состояния исследуемых деталей.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, техническая диагностика, модальный анализ, амплитудно-частотная характеристика, волновое поле, дефект, частотный анализ.

A.F. Salnikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEFINITION OF TECHNICAL CONDITION OF LARGE-SIZE DETAILS OF GAS-TURBINE ENGINES BY METHOD OF VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS

An algorithm for constructing a modal analysis in the formation of the wave field in the details of complex geometry is described. It is shown that, using the algorithm of modal deduction, it is possible to build a diagnostic model with a certain reliability to determine the technical condition of the object, to determine possible defects, deviations in geometric dimensions (for example, different thickness, deviation from a given size, etc.), in addition, changes in the density of the material, microcracks in the body of the structure. It is shown that this algorithm can be used without certain knowledge of the a priori wave field of the object, since to detect various deviations of its structure it is enough to use a certain number of sensors (at least two) installed in a certain way on the geometric planes and their transitions that form the spatial geometry of the product. Elementwise "listening" to certain areas of similar detail in their modal excitation, is based algorithm including determining its technical state. With the help of analysis of changes in the wave field, formed alternately from the sensor to the sensor in the object is built recognition algorithm. Therefore, the resulting assessment of the technical condition of the object can be based on the structural characteristics of a particular element, part or Assembly as a whole. The algorithm of diagnostics of complex spatial details on an example of a deflector of the second stage of the turbine of high pressure of the engine PS-90A and a ring "0" of a stage of the compressor of the engine PS-90GP-2 is resulted. The wave algorithm is based on the analysis of vibroacoustic responses of the structure using modal analysis in the formation of vibroacoustic fields in the product and the identification of the effect of various defects on the change in the amplitude-frequency characteristics of the wave field of the part under study. The results of the assessment of the condition of the studied parts are presented.

Keywords: non-destructive testing, technical diagnostics, modal analysis, amplitude-frequency characteristic, wave field, defect, frequency analysis.

Диагностика технического состояния сложных пространственно-геометрических деталей газотурбинных двигателей осуществляется на всех этапах технологического процесса изготовления, сборки и эксплуатации в составе двигателя [1]. Широко используемые ультразвуковые, рентгеновские, магнитные, акустические и другие методы неразрушающего контроля позволяют решать вопросы диагностики и оценки технического состояния элементной базы двигателя. Тем не менее существующие методы технической диагностики не обеспечивают 100%-ную выявляемость дефектов. Это связано иногда с отсутствием доступа к исследуемой зоне, недостаточной разрешающей способностью приборов, «затенением» и другими технологическими факторами, снижающими достоверность проводимой технической диагностики [2–6]. Кроме того, конструктивные материалы, используемые для изготовления сложных деталей, не обладают анизотропными свойствами, что приводит к появлению деструктивного изменения несущей способности в различных сечениях конструкции детали. Эти зоны могут служить источниками возникновения микротрещин и других дефектов, которые в процессе эксплуатации могут приводить к отказу в работе двигателя.

Наиболее перспективным в решении вопросов технической диагностики может стать волновой метод, включающий в себя алгоритм акустического [7] и вибрационного [8, 9] методов неразрушающего контроля с определенными доработками в системе программного анализа и обработки сигналов измерения волнового поля в объеме конструкции сложной детали. Известно, что волновой фронт при движении по телу детали взаимодействует со структурой материала детали, с элементной базой детали, что приводит к его изменению и, соответственно, к изменению амплитудно-частотных характеристик самого волнового поля, устанавливающегося в объекте. Любая локация в теле конструкции детали, микротрещина, сам конструктивный элемент пространственной детали будут создавать определенный волновой «портрет», который может быть объектом анализа в технической диагностике исследуемого объекта. В этом случае необходимо решить ряд следующих задач:

- построение алгоритма выявления связи по изменению волнового поля объекта с его элементной базой и наличием в нем различных дефектов;
- обеспечение высокой чувствительности и малой инерционности средств измерения волнового поля в совокупности с построением самого измерения волнового поля как в локальной точке объекта, на его поверхности или в его объеме;
- идентификация элементов изменения в волновом поле объекта с конкретной причиной, вызвавшей эти изменения;
- построение допустимого диапазона изменения в элементах характеристик в волновом поле объекта, обеспечивающего необходимую работоспособность и ресурс его работы.

Данные задачи достаточно сложны, но решаемы. Так, для анализа качества сварного шва полиэтиленоармированных труб (ПАТ) разработана методика на основе модального анализа виброакустическим методом и внедрена в технологический процесс строительства трубопроводов из ПАТ [11]. Применительно к деталям сложной пространственной формы газотурбинных двигателей данная задача решается впервые.

Алгоритм исследования волнового поля детали сложной пространственной конструкции связан с использованием ее модальных свойств при воздействии динамических нагрузок [12–14]. Нагрузки приводят к возникновению механических и акустических колебаний конструктивных элементов пространственной детали. Вследствие этого конструкция объекта представляет собой как бы набор отдельных механических систем с разными степенями свободы. Это является основой анализа мод колебаний в волновом поле изделия, с помощью которого может быть проведен анализ поведения конструкции путем определения и оценки всех резонансных частот или мод, имеющихся в характеристиках элементов конструкции. Реакция, соответствующая механическим и акустическим колебаниям в изделии, имеет точно такую же структуру энергии накопления, как при энергии удара, рассеивает ее в виде механических колебаний с нескольки-

ми дискретными частотами, соответствующими модальным частотам элементной базы изделия, и может быть представлена в следующих областях:

- в физической области сложная геометрическая деформация элементов объекта – с помощью набора простых независимых графиков деформации или форм мод;
- во временной области реакция в виде механических (или акустических) колебаний, которые представлены как набор затухающих колебаний в виде синусоид;
- в частотной области анализ временного сигнала дает спектр, содержащий серию пиков, соответствующих спектрам реакций систем на механическое воздействие;
- в модальной области реакция детали представлена в виде модальной модели, построенной на основе набора моделей систем с определенной степенью свободы.

Поскольку форма моды представляет собой перемещение всех точек конструкции при соответствующей модальной частоте, одиночная модальная координата может быть использована для представления всего вклада этой моды в общую деформацию конструкции в целом от определенного элемента конструкции, входящего в объект.

Необходимо учитывать из условий физических взаимодействий колебаний элементной базы объекта следующие обстоятельства:

- любая вынужденная динамическая деформация конструкции и колебания элементов, возникшие в виде волнового поля, могут быть представлены в виде взвешенной суммы форм мод этих колебаний как их собственных частот;
- каждая мода этих колебаний в волновом поле детали может быть представлена в виде модели системы, имеющей определенную степень свободы.

На основе принятой степени свободы элементной базы для объекта будут строиться математический алгоритм и программа обработки результатов измерения волнового поля объекта. За основу принимается известный алгоритм, который используется в технической диагностике виброакустическим методом [14–17].

Истинное физическое перемещение в любой точке сложной конструкции детали всегда является комбинацией всех мод колебаний элементов этой конструкции. При гармоническом возбуждении, близком к модальной частоте, 95 % перемещений могут быть связаны с соответствующей конкретной формой мод, а при случайном возбуждении имеется тенденция к произвольной комбинации всех форм мод. Произвольная комбинация всех форм мод будет выстраивать волновое поле объекта с учетом разной скорости распространения волны ее диссипации колебательной энергии по модам и наличия дефектов, тем самым формируя фактическую волновую картину исследуемой детали. Ввиду этого в исследованиях необходимо оценивать не только интегральную характеристику спектра колебаний, но и обязательно его мгновенные значения для различного периода времени изменения волнового поля детали.

В любом случае форма мод представляет собой внутреннее динамическое свойство совершающей «свободные» механические колебания (без воздействия внешних сил) конструкции. Она отображает относительное перемещение всех частей конструкции для конкретной моды. Это условие позволяет осуществлять выбор размещения точек замера виброакустического поля в конструктивно сложной пространственной детали, тем самым устраняя недоступность осуществления контроля элементной базы сложной детали.

Для построения диагностики сложной детали необходима информация о структуре амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), их изменении во времени у тестового образца, т.е. своеобразном «портрете» годной детали. Как правило, его нет. В этом случае необходимо проведение дополнительного цикла исследований, связанных с наработкой определенных структур изменения АЧХ, полученных при параллельной обработке результатов измерения волнового поля с двух и более датчиков, расположенных на определенных расстояниях друг от друга. В этом случае импульсная нагрузка на деталь осуществляется в зоне установки датчика поочередно у каждого датчика. Поскольку датчики во время эксперимента не меняют своего положения, условием качественной оценки технического состояния детали будет степень идентично-

сти волнового поля в амплитудно-частотном диапазоне измерений. Набор данных для деталей одного типоразмера позволит построить диагностическую модель для производства – годный или брак. А формирование наперед заданных дефектов в детали позволит построить модель их распознавания с указанием вида и координат дефекта. Кроме того, связав наличие определенных размеров дефектов с конструктивной несущей способностью в составе газотурбинного двигателя, можно разработать методику оценки остаточного ресурса его элементной базы в процессе эксплуатации.

Исследовательская работа состоит из двух этапов.

Первый этап включает построение волновой картины объекта исследования. Для этого деталь делят на определенные зоны с постоянными геометрическими характеристиками. Определив границы этих зон как точки замера волнового поля, объект подвергают динамическому нагружению. Поочередно импульсная нагрузка объекта осуществляется у границы зоны условного деления. Затем поочередно нагружаются все элементы разбиения детали. Осуществляется запись результатов возникающего волнового поля в изделии и обработка полученных сигналов.

Второй этап включает измерение волнового поля в областях исследуемой детали со значительными изменениями в АХЧ и коэффициентов затухания модальных колебаний характерных элементов в конструкции детали. Исследования строятся по аналогии с первым этапом, только датчики устанавливаются таким образом, чтобы полученная область охватывала предполагаемую зону дефекта.

При проведении работ применялся многоканальный (8 каналов записи и одновременной их обработки) синхронный анализатор виброакустических сигналов «Камертон» (изготовитель НПО «РОС», г. Пермь, Россия), который позволяет проводить исследование волнового поля объекта и его неоднородности (рис. 1).

Рис. 1. Многоканальный синхронный анализатор и дефлектор второй ступени ТВД

Проверка возможности использования волнового поля деталей сложной формы для построения их технической диагностики проводилась на дефлекторах второй ступени ТВД двигателя ПС-90А, чертеж которого представлен на рис. 2 (на рис. 1 он показан справа от прибора).

Для исследования было выбрано пять однотипных деталей дефлектора. Два образца изделий были с видимыми трещинами пушечного замка и три изделия – условно годных.

Анализ волнового поля на втором этапе проводился по вибрационным сигналам трех датчиков, которые случайным образом устанавливались по телу дефлектора. Количество положений датчиков для одной детали варьировалось от 3 до 5.

Выполнение работ по виброакустической диагностике дефлектора проводилось по схеме с установкой трех датчиков:

- на дефлекторе (рис. 2, а);
- на дефлекторе в сборе с диском (рис. 2, б).

Исходной информацией для оценки общего состояния изделия и его диагностики являются периодические измерения вибрации в момент ударного нагружения конструкции.

Для исследования спектральной составляющей сигнала были применены быстрое преобразование Фурье и алгоритм определения коэффициента затухания определенной (выделенной) моды колебаний.

Рис. 2. Места установки датчиков вибрации на дефлектор второй ступени ТВД двигателя ПС-90А

Анализ условий оценки волнового поля в изделии основан на следующих принципах: импульсное возбуждение приводит к возникновению в изделии резонансных волновых процессов с особенностями распространения их в пространстве и во времени. При наличии несплошностей (раковин, трещин), а также при старении материала условия прохождения вызванных импульсной нагрузкой колебаний на различных участках объекта в значительной степени отличаются друг от друга [16]. Это позволяет выявить однородные и неоднородные участки в объекте.

При анализе состояния объекта в каждом сигнале определялись скорость звука в среде, скорость затухания резонансных колебаний, несущая частота, наличие отклонений значений частоты от нормального для данного объекта диапазона значений, производилось распознавание образов гармоник несущих частот.

При анализе результатов исследования одномоментно проводилось качественное сравнение мгновенных и интегральных спектров сигналов в одних частотных диапазонах спектров годных и дефектных узлов, полученных от одних и тех же датчиков, установленных на определенной точке детали.

В качестве примера приведены характерные участки в амплитудно-частотном диапазоне при обработке сигнала с трех датчиков, установленных на годном и дефектном дефлекторах (рис. 3).

В качестве примера приведены спектры годного изделия и имеющего трещины пушечного замка.

Сравнительный анализ спектрограмм показывает качественное несоответствие амплитудно-частотных характеристик годного и дефектного дефлекторов. Качественное сравнение спектрограмм двух дефлекторов показывает, что происходит изменение несущих частот спектрограмм. Если на годном дефлекторе это частоты 1510, 1895, 1982 и 2654 Гц, то на дефектном – 1490, 1500, 1715, 1730, 1785 и 1800 Гц. Из опыта исследований на других объектах сдвиг по мощности в более низкую частотную область связан в основном с наличием дефекта типа трещин.

На рис. 4 в качестве примера приведен анализ мгновенного спектра при времени 0,3 с после импульсного нагружения кольца 0 ступени компрессора двигателя ПС-90ГП-2.

Анализ результатов обработки сигналов четырех датчиков позволил сделать вывод, что имеются признаки ослабления структуры материала в зоне перехода боковой поверхности кольца (сильно выражены), признаки наличия микротрещин.

Рис. 3. Спектр сигнала на годном (а) и дефектном дефлекторах (б)

Рис. 4. Мгновенный спектр кольца 0 ступени компрессора двигателя ПС-90ГП-2

Результаты виброакустического исследования конструктивных элементов – дефлектора второй ступени турбины высокого давления двигателя ПС-90А; кольца 0 ступени компрессора двигателя ПС-90ГП-2 – позволяют сделать вывод, что виброакустический метод в сравнительной оценке способен различить дефектный элемент в конструкции сложной детали.

Заключение

1. Показана возможность использования волнового поля объекта для построения технической диагностики сложных пространственных деталей на примере деталей дефлекторов второй ступени ТВД двигателя ПС-90А и кольца 0 ступени компрессора двигателя ПС-90ГП-2.

2. Метод виброакустической диагностики с элементами модального анализа дает возможность построить алгоритм технической диагностики для анализа технического состояния деталей газотурбинных двигателей.

3. Алгоритм оценки технического состояния элементной базы позволяет оценить техническое состояние внутренних узлов и деталей конструкции двигателя при установке датчиков вибрации на доступных поверхностях деталей двигателя.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справ.: в 7 т / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова [и др.]; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – Т. 7, кн. 2. – 839 с.
2. Диагностика авиационных деталей / В.И. Лодзинский, Г.В. Бондал, А.О. Каксис, А.Е. Колтунов. – М.: Машиностроение, 1988. – 218 с.
3. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
4. Вопросы акустической диагностики / М.Д. Генкин, Ф.Я. Балицкий, Е.И. Бобровницкий [и др.] // Методы виброизоляции. – М.: Наука, 1975. – С. 67–91.
5. Карасев В.А., Максимов И.П., Сидоренко Е.К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей // Акустическая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 310 с.
6. Сиротин И.Е., Коровкин Ю.М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
7. Палов Б.Е. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971. – 152 с.
8. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
9. Баданин Е.Ю., Дрозденко В.А. Диагностика и анализ вибрационного состояния ГЦН энергоблока БН-600 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 2. – С. 30–34.
10. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Волновой метод технической диагностики трубопроводов из композиционных материалов в процессе их эксплуатации // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 1. – С. 379–384.
11. Сальников А.Ф. Методика диагностики и оценки остаточного ресурса трубопроводов из неметаллических материалов // Инженерная практика. – 2016. – № 9. – С. 48.
12. Пшеничный В.В., Сальников А.Ф. Исследование вибродинамических характеристик стенда для испытаний главных редукторов вертолетов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 19–23.
13. Пшеничный В.В., Сальников А.Ф. Динамический анализ стенда для испытаний главных редукторов вертолетов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 5. – С. 20–23.
14. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Об использовании комплекса обработки изменения волновых характеристик виброакустической волны для оценки фактического состояния неметаллических трубопроводов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – № 1. – С. 174–176.
15. Permyakov K.V., Salnikov A.F. Exhaust-line performance in a gas-pumping system // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, no. 9. – P. 557–559.
16. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Исследование режимов работы насоса на возбуждение колебаний стрелы РПК // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2014. – Т. 1. – С. 251–253.

17. Сальников А.Ф., Кашина И.А. Сравнительный анализ методов определения собственных частот конструктивных элементов системы РДТТ // Полет. – 2013. – № 6. – С. 26–30.

References

1. Balitskiy F.Ya., Barkov A.V, Barkova N.A. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik [Non-destructive testing and diagnostics: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005, 839 p.
2. Lodzinskiy V.I., Bondal G.V., Kaksis A.O., Koltunov A.E. Diagnostika aviatsionnykh detaley [Diagnosis of aircraft parts]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 218 p.
3. Balitskiy F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikhsya defektov [Vibroacoustic diagnostics of emerging defects]. Moscow: Nauka, 1984, 120 p.
4. Genkin M.D., Balitskiy F.Ya., Bobrovnikskiy E.I. Voprosy akusticheskoy diagnostiki [Questions acoustic diagnostics]. Moscow: Nauka, 1975, pp. 67-91.
5. Karasev Ya.A., Maksimov Ya.P., Sidorenko E.K. Vibratsionnaya diagnostika gazoturbinnnykh dvigateley [Vibration diagnostics of gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1978, 310 p.
6. Sirotin I.E., Korovkin Yu.M. Tekhnicheskaya diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Technical diagnostics of aviation gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 272 p.
7. Palov B.E. Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov [Acoustic diagnostics of mechanisms]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971, 152 p.
8. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Fundamentals of technical diagnostics]. Moscow: Energiya, 1981, 320 p.
9. Badanin E.Yu., Drozdenko V.A. Diagnostika i analiz vibratsionnogo sostoyaniya GTSN energobloka BN-600 [Diagnostics and analysis of vibration condition of the reactor coolant pump of the BN-600]. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*, 2009, No. 2, pp. 30-34.
10. Shcheludyakov A.M., Salnikov A.F. Volnovoy metod tekhnicheskoy diagnostiki truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov v protsesse ikh ekspluatatsii [The method of technical diagnostics of pipelines from composite materials in the process of their operation]. Proceedings of the international scientific-practical conference «Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse». Published by Perm national research polytechnic university, Perm, 2013, Vol. 1, pp. 379-384.
11. Salnikov A.F. Metodika diagnostiki i otsenki ostatochnogo resursa truboprovodov iz nemetallicheskiykh materialov [Methods of diagnosis and assessment of residual life of pipelines from non-metallic materials]. *Inzhenernaya praktika*, 2016, no. 9, p. 48.
12. Pshenichnyy V.V., Salnikov A.F. Issledovaniye vibrodinamicheskikh kharakteristik stenda dlya ispytaniy glavnykh reduktorov vertoletov [The study of vibrodynamic characteristics of the test bench of the main reducers of helicopters]. *Vestnik Mashinostroyeniya*, 2017, No. 2, pp. 19-23.
13. Pshenichnyy V.V., Salnikov A.F. Dinamicheskii analiz stenda dlya ispytaniy glavnykh reduktorov vertoletov [Dynamic analysis of the test stand main gearboxes of helicopters]. *Vestnik Mashinostroyeniya*, 2017, No. 5, pp. 20-23.
14. Shcheludyakov A.M., Salnikov A.F. Ob ispolzovanii kompleksa obrabotki izmeneniya volnovykh kharakteristik vibroakusticheskoy volny dlya otsenki fakticheskogo sostoyaniya nemetallicheskiykh truboprovodov [On the use of complex processing to changes in the wave characteristics of the acoustic wave to assess the actual status of the non-metallic pipelines]. Proceedings of the international scientific-practical conference «Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse», 2015, No. 1, pp. 174-176.
15. Permyakov K.V., Salnikov A.F. Exhaust-line performance in a gas-pumping system. *Russian Engineering Research*, 2014, Vol. 34, No. 9, pp. 557-559.
16. Shcheludyakov A.M., Salnikov A.F. Issledovaniye rezhimov raboty nasosa na vozbuzhdeniye kolebaniy strely RPK [Study of the modes of operation of the pump to the excitation of vibrations of the boom RPK]. Proceedings of the international scientific-practical conference «Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse», 2014, Vol.1, pp. 251-253.
17. Salnikov A.F., Kashina I.A. Sravnitelnyy analiz metodov opredeleniya sobstvennykh chastot konstruktivnykh elementov sistemy RDTT [Comparative analysis of methods of determination of natural frequencies of structural elements of the system the solid-propellant Landing]. *Polyot*, 2013, no. 6, pp. 26-30.

Об авторе

Сальников Алексей Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: Afsalnikov_1@mail.ru).

About the author

Aleksey F. Salnikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology and Power Plants, Perm National Research Polytechnic University (29, Kom-somolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: Afsalnikov_1@mail.ru).

Получено 27.11.2018