

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ БИПОЛЯРНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ РОТОРНЫХ МАШИН

© 2022

А. Е. Сундуков кандидат технических наук, директор;
ООО «Турбина СК», г. Самара;
sunduckov@mail.ru

Е. В. Шахматов член-корреспондент Российской академии наук,
заведующий кафедрой автоматических систем энергетических установок;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
shakhm@ssau.ru

Виброакустическая диагностика дефектов роторных машин является наиболее эффективным методом неразрушающего контроля их технического состояния. Практика показывает, что достижение успеха её применения во многом определяется набором располагаемых методов анализа вибрационных процессов. Наиболее широко распространёнными и нагруженными их узлами являются зубчатые зацепления, которые во многом определяют общее вибрационное состояние машины. Набор методов вибродиагностики дефектов зубчатых зацеплений достаточно разнообразен. Среди них интересен способ биполярного анализа, заключающийся в раздельном исследовании положительной и отрицательной частей вибрационного сигнала с последующим построением диагностического признака в виде разности, отношений и др. Способ направлен на оценку качества сборки редукторов по положению пятна контакта. Недостатком способа является ограниченная область использования и невысокая чувствительность. В работе показано, что использование максимумов широкополосной вибрации при применении биполярного анализа в вибродиагностике дефектов роторных машин существенно повышает его эффективность. На примере износа боковых поверхностей зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты» и величины бокового зазора в дифференциальном редукторе турбовинтового двигателя установлено, что это обеспечивается за счёт роста чувствительности метода и расширения его функциональных возможностей. При анализе использовалась статистика редукторов с разной степенью износа боковых поверхностей зубьев и отремонтированных редукторов с разной величиной бокового зазора. При этом можно использовать широкий набор известных диагностических признаков: интенсивность n -мерных векторов информативных рядов, параметры отдельных гармоник, глубину амплитудной модуляции, вероятностные характеристики в выбранных частотных полосах, безразмерные дискриминанты, кепстр и др. В работе приведены некоторые примеры из этих методов.

Турбовинтовой двигатель; дифференциальный редуктор; износ боковых поверхностей зубьев; величина бокового зазора; биполярный анализ

Цитирование: Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. Повышение чувствительности и расширение функциональной возможности биполярного анализа вибрации роторных машин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 1. С. 91-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-91-98

Введение

Одними из наиболее распространённых узлов роторных машин являются зубчатые зацепления, которые часто определяют общее техническое состояние машины. Общеизвестно, что среди неразрушающих методов контроля их технического состояния наиболее эффективным является виброакустическая диагностика [1]. Практика её применения показывает, что положительный результат во многом определяется количеством используемых методов анализа вибрационных процессов. К настоящему времени накоплен достаточно обширный перечень подходов в выявлении диагностических признаков дефектов: статистические [2; 3], анализ параметров модуляции [4; 5], метод

ударных импульсов [6], расчёт безразмерных дискриминант [7; 8], оценка кепстра [9], резонансный метод [10] и другие способы. Одним из таких подходов является биполярный анализ [11], который заключается в раздельном анализе положительной и отрицательной частей вибрационного процесса с определением параметров диагностического признака дефекта и их сравнения. Он был разработан для контроля качества сборки редукторов по положению пятна контакта зубьев зубчатого зацепления. Суть метода заключается в том, что на исследуемой машине практически всегда можно найти место установки вибропреобразователя, сигнал которого, при наличии дефекта, будет несимметричен относительно нулевого или среднего значения. Тогда раздельный анализ положительной и отрицательной частей сигнала позволит выявить соответствующий диагностический признак дефекта. Признаками может служить большой комплекс исследуемых параметров: интенсивности отдельных спектральных составляющих, интенсивность n -мерных векторов от гармоник ряда, глубина амплитудной и частотной модуляции, вероятностные характеристики в выбранных частотных полосах и др. В предлагаемой работе показана возможность повышения чувствительности метода и расширение области его использования.

Постановка задачи и метод решения

Выполненные ранее исследования показывают, что использование максимумов широкополосной вибрации может существенно повысить эффективность вибродиагностики дефектов роторных машин [12; 13]. Применительно к рассматриваемому подходу их использование повышает чувствительность биполярного анализа и расширяет область его эффективного применения [14]. В качестве примера рассмотрена задача вибродиагностики износа боковых поверхностей зубьев планетарного редуктора и оценка величины бокового зазора в паре «солнечная шестерня – сателлиты» дифференциального редуктора одного из турбовинтовых двигателей. Данные дефекты в определённом смысле связаны между собой. Повышенный боковой зазор приводит к ударному входу зубьев в зацепление, что ускоряет процесс их износа, износ рабочих поверхностей зубьев приводит к увеличению бокового зазора. Исследовались двигатели с разной степенью износа рассматриваемой пары, поступившие в ремонт на завод-изготовитель. При этом рассматривались четыре варианта износа [13]:

– текущий – максимальный износ зубьев солнечной шестерни относительно эвольвенты после последнего ремонта (износ 1);

– текущий полный – максимальный износ зубьев солнечной шестерни относительно исходной эвольвенты (2);

– текущий суммарный – сумма максимальных износов зубьев солнечной шестерни и сателлитов относительно эвольвент после последнего ремонта (3);

– суммарный полный – сумма максимальных износов зубьев солнечной шестерни и сателлитов относительно исходных эвольвент (4).

Для дальнейшего рассмотрения выбирались данные с наибольшими значениями коэффициента корреляции между исследуемыми характеристиками.

Влияние величины бокового зазора оценивалось по 18 отремонтированным двигателям с осреднением по пяти его значениям. Анализировались вибрационные сигналы с вибропреобразователя, установленного на стыке картеров компрессора и вала заднего винта. Ось чувствительности вибропреобразователя сориентирована в вертикальном направлении (ось ординат). Режимы работы двигателя – максимальный и приёмистость.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 – 6 представлены данные по сравнительной оценке результатов биполярного анализа с использованием текущих значений вибрационного процесса и его максимумов для некоторых составляющих исследуемой вибрации. На всех рисунках по оси ординат приведены модули отношения исследуемого параметра (A_2/A_1) для положительной A_1 и отрицательной A_2 частей вибрационного процесса. На всех рисунках приняты следующие обозначения: \blacklozenge – для текущих значений процесса; \blacksquare – для его максимумов. Коэффициенты корреляции r для параметров текущих значений процесса обозначены как r_1 , для максимумов r_2 . На рис. 1 представлены данные для износа боковых поверхностей зубьев, где f_p – частота вращения ротора турбокомпрессора. Значимость парного коэффициента корреляции проверяется на основе t -критерия Стьюдента [16]. Расчёт параметра t выполняется по соотношению

$$t = \left[\frac{r^2}{1-r^2} (n-2) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где n – объём статистики.

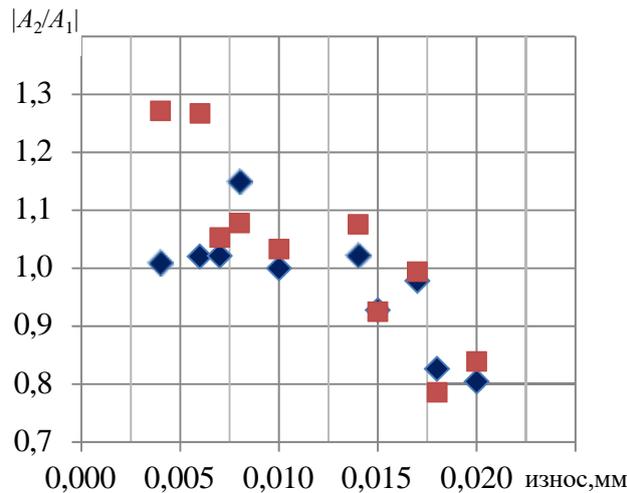


Рис. 1. Зависимость отношения интенсивностей составляющей $0,333f_p$ от величины износа I на максимальном режиме $r_1 = -0,69; r_2 = -0,88$

Как известно, если $t > t_{кр}$ ($t_{кр}$ – критическое значение, определяемое по соответствующей таблице при заданном значении уровня значимости P и объёма статистики n), коэффициент корреляции признаётся значимым и даётся заключение о тесной статистической взаимосвязи между исследуемыми параметрами. В технических приложениях принято использовать $P = 0,05$.

На рис. 2 – 6 приведены результаты для величины бокового зазора.

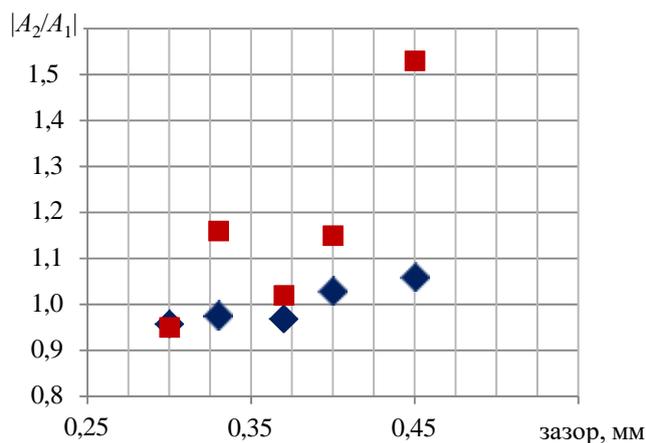


Рис. 2. Зависимость отношения интенсивностей зубцовой гармоники пересопряжения зубьев эпицикла и сателлитов от величины бокового зазора на максимальном режиме, $r_1 = 0,93; r_2 = 0,84$

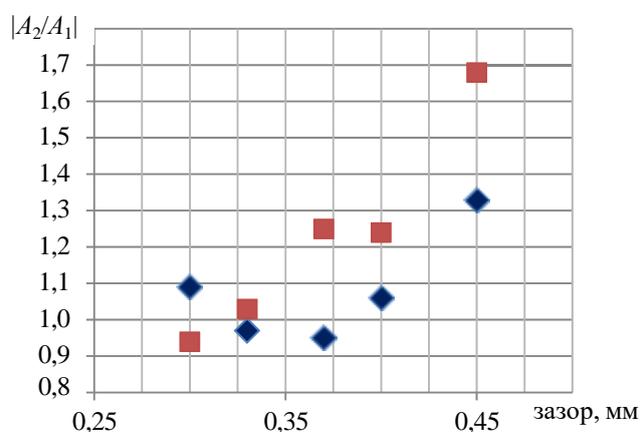


Рис. 3. Зависимость отношения интенсивностей зубцовой гармоники пересопряжения зубьев эпицикла и сателлитов от величины бокового зазора на режиме приёмности, $r_1 = 0,65; r_2 = 0,96$

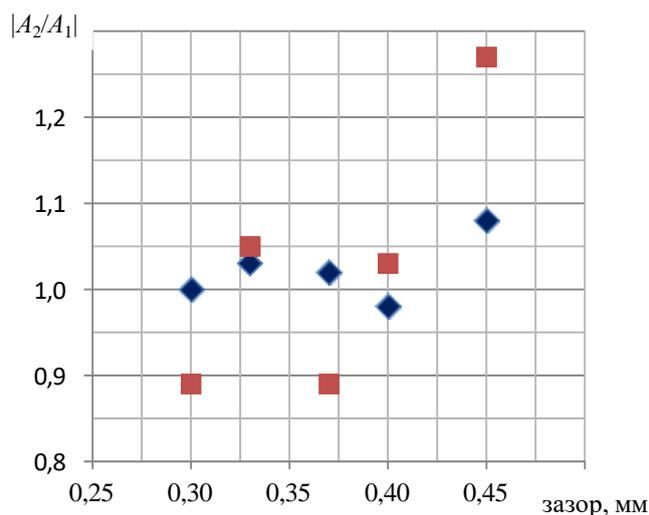


Рис. 4. Зависимость отношения интенсивностей пятой зубцовой гармоники пересопряжения зубьев эпицикла и сателлитов от величины бокового зазора на режиме приёмности, $r_1 = 0,52; r_2 = 0,77$

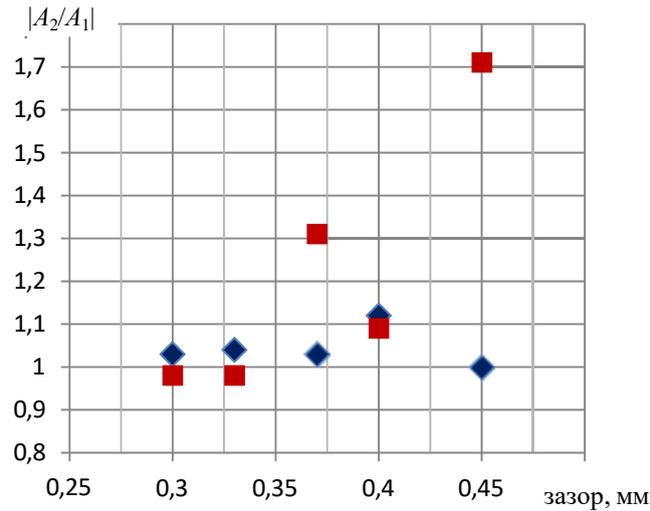


Рис. 5. Зависимость отношения интенсивностей шестой зубцовой гармоники пересопряжения зубьев эпицикла и сателлитов от величины бокового зазора на режиме приёмистости, $r_1 = 0,01; r_2 = 0,85$

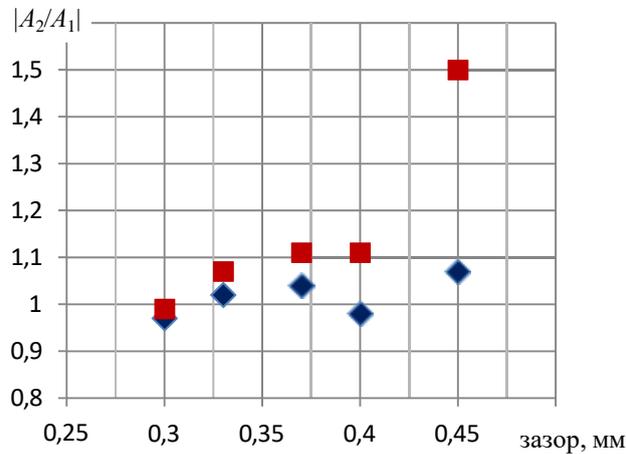


Рис. 6. Зависимость отношения интенсивностей составляющей $7f_p^*$ от величины бокового зазора на режиме приёмистости, $r_1 = 0,63; r_2 = 0,88$

Здесь f_p^* – частота вращения солнечной шестерни в приведенном движении.

Как видно из рис. 1, для износа рассматриваемой зубчатой пары определяющим является износ зубьев солнечной шестерни, измеренный относительно эвольвентограмм после последнего ремонта. Снижение исследуемого отношения с ростом износа объясняется разной скоростью изменения интенсивности составляющей в положительной и отрицательной частях вибрационного процесса. Для бокового зазора максимальное отношение интенсивностей в положительной и отрицательной области рассмотренных гармоник составило 1,7 раза для шестой зубцовой гармоники.

Полученные данные показывают, что использование максимумов широкополосной вибрации позволяет получить большую чувствительность метода к росту величин износа и бокового зазора в зубчатом зацеплении. За исключением данных рис. 2 коэффициенты корреляции для максимумов вибрационного процесса существенно выше соответствующих величин для текущих значений и только они являются значимыми. Предложенный способ может быть использован при диагностике других узлов роторных машин и их дефектов.

Заключение

Использование максимумов широкополосной вибрации при биполярном анализе вибрационных процессов расширяет его функциональные возможности и повышает чувствительность способа.

Применение данного подхода можно рекомендовать для выявления других видов дефектов роторных машин.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: в 2-х кн. Кн. 1: Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Вибродиагностика. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
2. Маслов Г.А., Митенков В.Б. Оценка вибрационных характеристик летательного аппарата с помощью высокомоментной статистики при ограниченном объёме экспериментов // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21, № 2. С. 13-17.
3. Decker H.J. Crack detection for aerospace quality spur gears // International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society (June, 11-13, 2002, Montreal, Quebec, Canada). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020061785>
4. Kirsis T.T., Martin H.R. Gear pump defect detection under light loading conditions // Fluidics Quarterly. 1978. V. 10, Iss. 4. P. 73-89.
5. Aatola S., Leskinen R. Cepstrum analysis predicts gearbox failure // Noise Control Engineering Journal. 1990. V. 34, Iss. 2. P. 53-59. DOI: 10.3397/1.2827757
6. Board D.B. Incipient failure detection for helicopter drive trains // 13th Propulsion Conference (July, 11-13, 1977, Orlando, FL, U.S.A.). DOI:10.2514/6.1977-898
7. Dyer D., Stewart R.M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. 1978. V. 100, Iss. 2. P. 229-235. DOI: 10.1115/1.3453905
8. Sokolova A.G. New noise – immune incipient failure detection methods for machinery monitoring and protection systems // 5-th International Conference on Vibration Problems (October, 8-10, 2001, Moscow, Russia). Abstracts. Moscow: IMASH Publ., 2001. P. 48-53. (In Russ.)
9. Randall R.B. Cepstrum analysis. Machine health monitoring using vibration analysis. Canadian Acoustical Association, Vancouver, Canada, October 1983. P. 3-15.
10. Harting D.R. Demodulated resonance analysis – A powerful incipient failure detection technique // ISA Transactions. 1978. V. 17, Iss. 1. P. 35-40.
11. Балицкий Ф.Я., Соколова А.Г., Левин В.И., Хомяков Е.И., Баринов Ю.Г., Смородин С.А. Биполярный анализ сигнатур вибрации в диагностике качества сборки зубчатых передач // В сб.: «Точность и надёжность механических систем. Задачи и методы технической диагностики». Рига: Рижский политехнический институт, 1984. С. 59-64.
12. Сундуков А.Е., Сундуков Е.В. Исследование вибрационного состояния подшипников качения в процессе их износа. Анализ экспериментальных данных на базе спектра максимумов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2006. № 2 (10), ч. 1. С. 90-93. DOI: 10.18287/2541-7533-2006-0-2-1(10)-90-93
13. Авраменко А.А., Крючков А.Н., Плотников С.М., Сундуков Е.В., Сундуков А.Е. Совершенствование методов вибродиагностики износа зубьев шестерён

дифференциального редуктора турбовинтового двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технология и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 16-26. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-16-26

14. Сундуков А.Е. Способ диагностики технического состояния зубчатого зацепления: патент РФ № 2717139; опубл. 18.03.2020; бюл. № 8.

15. Соколов Г.А., Сагитов Р.В. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2010. 202 с.

INCREASING THE SENSITIVITY AND EXPANDING THE FUNCTIONALITY OF BIPOLAR ANALYSIS OF ROTARY MACHINE VIBRATIONS

© 2022

A. E. Sundukov Candidate of Science (Engineering), Director;
Turbina SK, LLC, Samara, Russian Federation;
sundukov@mail.ru

Ye. V. Shakhmatov Corresponding Member of the Russian Academy of Science,
Head of the Department of Power Plant Automatic Systems,
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
shakhm@ssau.ru

Vibration-acoustic diagnostics of rotary machine defects is the most effective method for non-destructive testing of their technical condition. Practice shows that its successful use largely depends on a set of available methods for analyzing vibration processes. Gears are the most common and heavy-duty components that largely determine the overall vibratory condition of a machine. There is quite a variety of methods for vibration-based diagnostics of gear defects. They include an interesting method of bipolar analysis which consists in separate analysis of the positive and negative parts of a vibration signal with subsequent formation of the diagnostic indicator in the form of differences, ratios, etc. The method is aimed at assessing the quality of gearbox assembly by the position of the tooth contact pattern. Limited area of use and low sensitivity is a disadvantage of this method. The paper shows that the use of broadband vibration maxima in the application of bipolar analysis in vibration-based diagnostics of rotary machine defects significantly increases its efficiency. Using the example of wear of tooth flanks in the “sun gear – satellite gears” pair and the value of the backlash in the differential gearbox of a turboprop engine, it was found to be ensured by increasing the sensitivity of the method and expanding its functionality. In our analysis, we used statistics of gearboxes with different degrees of wear of the tooth flanks and repaired gearboxes with different backlashes. In this case, a wide set of well-known diagnostic indicators can be used: intensity of n -dimensional vectors of informative series, parameters of individual harmonics, amplitude modulation depth, probabilistic characteristics in selected frequency bands, dimensionless discriminants, cepstra, etc. The paper presents some examples of these methods.

Turbo-propeller engine; differential gearbox; tooth flank wear; backlash value; bipolar analysis

Citation: Sundukov A.E., Shakhmatov Ye.V. Increasing the sensitivity and expanding the functionality of bipolar analysis of rotary machine vibrations. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 1. P. 91-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-91-98

References

1. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik v 7 t. / pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 7: v 2-kh kn. Kn. 1: Metod akusticheskoy emissii. Kn. 2: Vibrodiagnostika* [Non-destructive testing: Handbook in 7 volumes. Under the general editorship of V.V. Klyuyev. Vol. 7; in 2 books. Book 1. Method of acoustic emission. Book 2. Vibration-based diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 829 p.

2. Maslov G.A., Mitenkov V.B. Evaluation of the aircraft vibration characteristics using high-torque statistic in the case of limited experiments. *Aerospace MAI Journal*. 2014. V. 21, no. 2. P. 13-17. (In Russ.)
3. Decker H.J. Crack detection for aerospace quality spur gears // International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society (June, 11-13, 2002, Montreal, Quebec, Canada). Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020061785>
4. Kirsis T.T., Martin H.R. Gear pump defect detection under light loading conditions. *Fluidics Quarterly*. 1978. V. 10, Iss. 4. P. 73-89.
5. Aatola S., Leskinen R. Cepstrum analysis predicts gearbox failure. *Noise Control Engineering Journal*. 1990. V. 34, Iss. 2. P. 53-59. DOI: 10.3397/1.2827757
6. Board D.B. Incipient failure detection for helicopter drive trains. *13th Propulsion Conference (July, 11-13, 1977, Orlando, FL, U.S.A.)*. DOI:10.2514/6.1977-898
7. Dyer D., Stewart R.M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. 1978. V. 100, Iss. 2. P. 229-235. DOI: 10.1115/1.3453905
8. Sokolova A.G. New noise – immune incipient failure detection methods for machinery monitoring and protection systems. *5-th International Conference on Vibration Problems (October, 8-10, 2001, Moscow, Russia)*. Abstracts. Moscow: IMASH Publ., 2001. P. 48-53. (In Russ.)
9. Randall R.B. Cepstrum analysis. Machine health monitoring using vibration analysis. Canadian Acoustical Association, Vancouver, Canada, October 1983. P. 3-15.
10. Harting D.R. Demodulated resonance analysis – A powerful incipient failure detection technique. *ISA Transactions*. 1978. V. 17, Iss. 1. P. 35-40.
11. Balitskiy F.Ya., Sokolova A.G., Levin V.I., Khomyakov E.I., Barinov Yu.G., Smorodin S.A. Bipolyarnyy analiz signatur vibratsii v diagnostike kachestva sborki zubchatykh peredach. *V sb.: «Tochnost' i Nadezhnost' Mekhanicheskikh Sistem. Zadachi i Metody Tekhnicheskoy Diagnostiki»*. Riga: Riga Polytechnic University Publ., 1984. P. 59-64. (In Russ.)
12. Sundukov A.E., Sundukov E.V. Investigation of vibrational state of rolling contact bearings during their runout. Experimental data analysis based upon the spectrum of peaks. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2006. No. 2 (10), part 1. P. 90-93. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2006-0-2-1(10)-90-93
13. Avramenko A.A., Kryuchkov A.N., Plotnikov S.M., Sundukov E.V., Sundukov A.E. Refining methods of vibration diagnostics of wear of turbo-prop engine differential speed reduction unit gear teeth. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 16-26. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-16-26
14. Sundukov A.E. *Sposob diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya zubchatogo zatsepleniya* [Diagnostic method of technical condition of gearing]. Patent RF, no. 2717139, 2020. (Publ. 18.03.2020, bull. no. 8)
15. Sokolov G.A., Sagitov R.V. *Vvedenie v regressionnyy analiz i planirovanie regressionnykh eksperimentov v ekonomike: ucheb. posobie* [Introduction to regression analysis and designing regression experiments in economics]. Moscow: INFRA-M Publ., 2010. 202 p.