

Сундуков А. Е.<sup>1</sup>,  
Сундуков Е. В.<sup>2</sup>,  
Шахматов Е. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Турбина СК»,  
ул. Финская, 96, офис 1, Самара,  
443011, Россия

<sup>2</sup> ПАО «ОДК - Кузнецов»,  
Заводское шоссе, 29,  
Самара 443009, Россия

<sup>3</sup> Самарский национальный  
исследовательский  
университет имени  
академика С. П. Королёва,  
Московское шоссе, 34, Самара,  
443086, Россия

sunduckov@mail.ru

## ВИБРАЦИОННЫЙ ШУМ В ДИАГНОСТИКЕ ИЗНОСА ЗУБЬЕВ РЕДУКТОРОВ ГТД

*Показано, что для планетарных редукторов газотурбинных двигателей вибродиагностика износа его зубьев по интенсивности  $n$ -мерного вектора не эффективна из-за низкой интенсивности кратных зубцовых гармоник. Установлено, что интенсивность дисперсии процесса в районе третьей и шестой зубцовых гармоник, при развитии износа, может служить диагностическим признаком данного дефекта.*

**Ключевые слова:** редуктор; износ зубьев; диагностика; вибрационный шум; частотные области кратных зубцовых гармоник

### 1 Введение

Зубчатые зацепления наряду с подшипниками являются наиболее распространёнными узлами роторных машин. При этом зубчатые зацепления часто определяют их вибрационное состояние [1]. Редуктора авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) являются узлом, который часто определяет их ресурс. [2]. Одним из основных дефектов редукторов ГТД является износ боковых поверхностей их зубьев. Основная опасность данного дефекта связана с тем, что генерируемая при этом вибрация вызывает усталостные поломки элементов конструкции двигателя [3, 4]. Поэтому для обеспечения работоспособности ГТД необходимо располагать соответствующими методами оценки их технического состояния. Общеизвестно, что наиболее эффективной является виброакустическая диагностика [5, 6]. Широко распространённым диагностическим признаком данного дефекта является интенсивность  $n$ -мерного вектора от ряда кратных зубцовых гармоник вибрационного процесса [5]. Однако, наши

исследования, выполненные на дифференциальном редукторе одного из турбовинтовых двигателей показали, что кратные гармоники от зубцовой имеют низкую интенсивность, часто близкую к уровню вибрационного шума.

### 2 Постановка задачи и метод исследований

В работе [7] показано, что погрешности профиля зубьев оказывают существенное влияние на шум зубчатого зацепления. Поэтому была поставлена задача оценки влияния уровня износа боковой поверхности зубьев на интенсивность вибрационного шума. Уровень вибрационного шума оценивался в некоторых частотных областях, включающих частоты, соответствующие кратным зубцовым гармоникам. Исследовался вибрационный процесс с вибропреобразователя, установленного на стыке картеров турбокомпрессора и вала заднего винта. Ось чувствительности вибропреобразователя ориентирована в вертикальном направлении (ось  $Y$ ). Исследовалось вибрационное состояние дифференциального редуктора

одного из турбовинтовых двигателей с разной степенью износа боковой поверхности зубьев пары «солнечная шестерня-сателлиты» двигателей, пришедших в ремонт на завод-изготовитель.

При анализе рассматривались четыре варианта износа:

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

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

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

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

При этом, выбирались данные со значимыми величинами коэффициента корреляции ( $r$ ). Значимость парного коэффициента корреляции проверяется на основе  $t$ -критерия Стьюдента [8]. Расчёт параметра  $t$  выполняется по соотношению:

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

где  $n$  – объем статистики.

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

Представленные далее результаты получены на режимах работы двигателей 0,4 номинального и максимальный. На этих режимах работы двигателя частота вращения ротора практически одинакова, отличается только передаваемая редуктором мощность.

### 3 Результаты и их обсуждение

Предварительный анализ показал, что значимое изменение интенсивности вибрационного шума (дисперсии) выявлено только для двух частотных зон: 12965-14770 Гц ( $D_1$ ) и 25000-27800 Гц ( $D_2$ ). В первой находится частота третьей зубцовой гармоники во второй – шестой. На рисунке 1 представлены экспериментальные данные по оценке влиянию износа на величину  $D_1$ , на рисунках 2-6 на  $D_2$ .

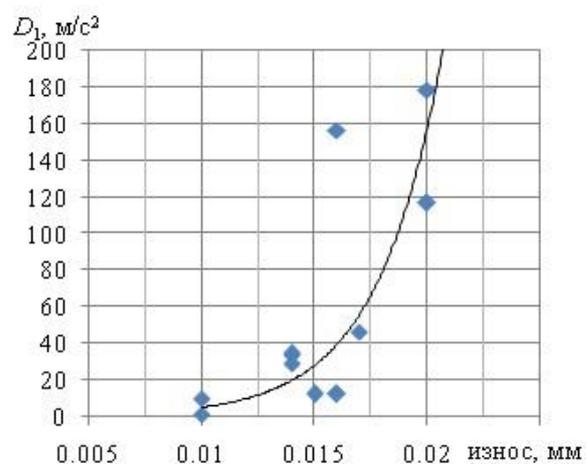


Рисунок 1. Зависимость дисперсии шума на режиме 0,4 номинального от текущего полного износа,  $r=0,74$

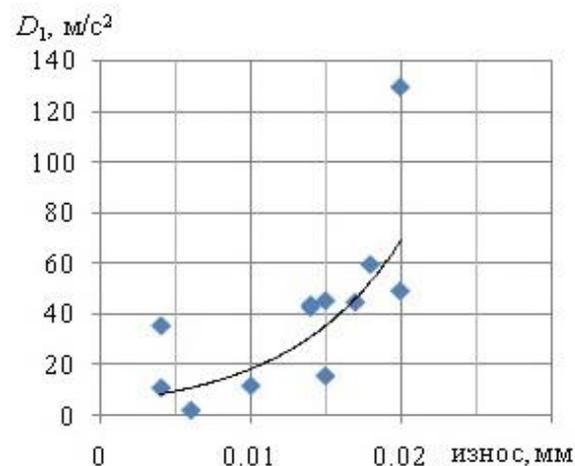


Рисунок 2. Зависимость дисперсии шума на режиме максимальный от текущего износа,  $r=0,75$

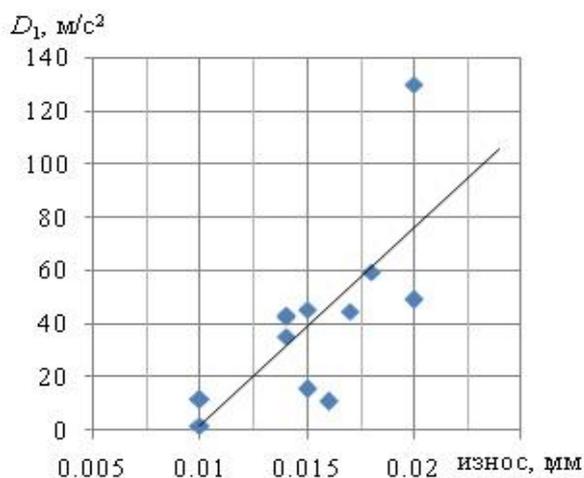


Рисунок 3. Зависимость дисперсии шума на режиме максимальный от текущего полного износа,  $r=0,76$

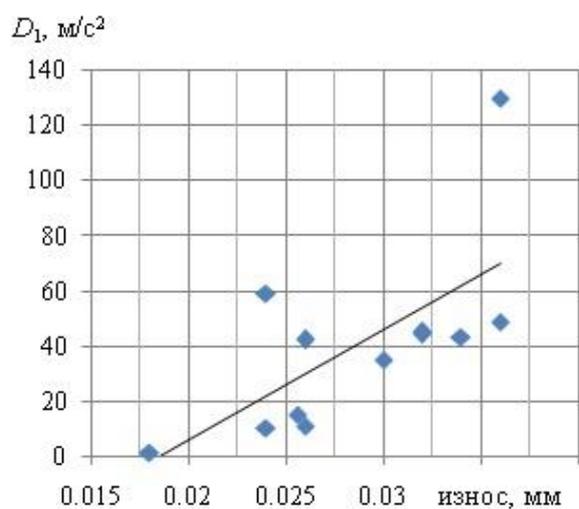


Рисунок 4. Зависимость дисперсии шума на режиме максимальный от суммарного полного износа,  $r=0,71$

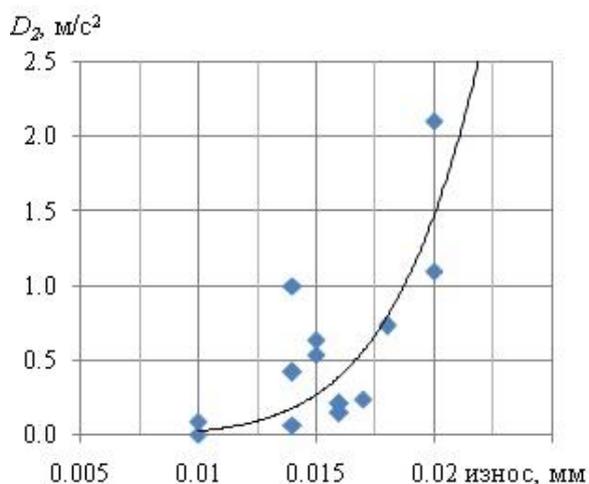


Рисунок 5. Зависимость дисперсии шума на режиме максимальный от текущего полного износа,  $r=0,68$

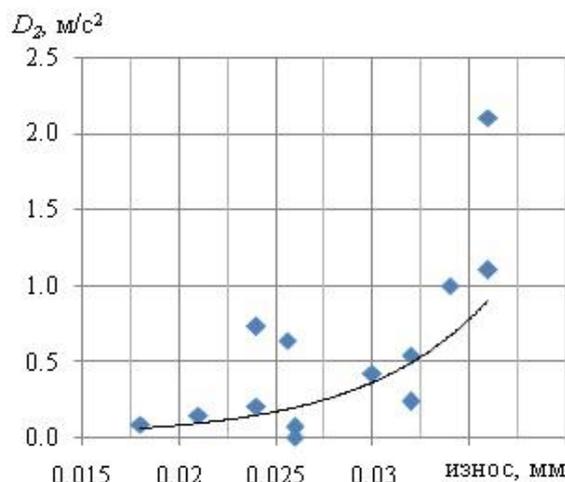


Рисунок 6. Зависимость дисперсии шума на режиме максимальный от суммарного полного износа,  $r=0,69$

Соответствующие уравнения аппроксимации имеют вид:

- $y = 0.158e^{344.7x}$ ;
- $y = 4.614e^{135.2x}$ ;
- $y = 7421x - 72.52$ ;
- $y = 4013x - 74.26$ ;
- $y = 2E+10x^{5.918}$ ;
- $y = 0.003e^{153.1x}$ .

Полученные зависимости имеют как линейный, так и нелинейный характер. Для параметра  $D_1$  получены несколько большие значения коэффициента корреляции. Учитывая, что износ приводит к росту бокового зазора, по 18 отремонтированным двигателям было оценено его влияние на величину исследуемых дисперсий. Наличие этого влияния не выявлено. Значения параметра  $D_1$  для режима работы двигателя 0,4 номинала существенно выше чем для режима максимальный. Данный результат хорошо согласуется с результатами работы [7]. Полученные данные свидетельствуют о том, что изменение состояния боковых поверхностей зубьев изменяет параметры вибрационного сигнала в районе третьей и шестой зубцовой гармоник.

#### 4 Заключение

1. Износ боковых поверхностей зубьев в зубчатой паре изменяет структуру её вибрационного состояния в области кратных зубцовых гармоник.

2. Диагностику износа боковой поверхности зубьев зубчатого зацепления можно выполнять по изменению вибрационного состояния в частотной области третьей зубцовой гармоники и кратных ей.

### Список использованных источников

- [1] Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration // Journal of Mechanical Desing. 2008. Vol. 130. No. 12, pp. 121402/1-121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803.
- [2] Кравченко И. Ф., Единолич А. Б., Яковлев В. А., Дорофеев В. Л. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений //Авиационно – космическая техника и технология, 2008, №8(55). С. 129 -134.
- [3] Авраменко А. А., Крючков А. Н., Е., Плотников С. М., Сундуков А.Е., Сундуков Е.В. 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.
- [4] Курушин М.И., Балякин В.Б., Курушин А.М. Экспериментальные исследования причин возбуждения колебаний элементов турбовинтового двигателя с дифференциальным редуктором // Известия Самарского центра РАН. 2014 Т. 16. №4. С. 132-136.
- [5] Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7 в 2-х кн. Кн. 2. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
- [6] Sheinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. – CSL, Knaxville, TN37923, USA.
- [7] Юрузуме, Мизутани, Тсубуку. Погрешности зубчатых передач и шум цилиндрических прямозубых колёс, имеющих погрешности профиля зуба // Конструирование и технология машиностроения. 1979. Т101, №2. С 53-60.
- [8] Соколов Г. А., Сагитов Р. В. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике. 2010. М.:ИНФРА, 208 с.

**GTE GEAR TOOTH WEAR DIAGNOSIS BASED ON VIBRATION NOISE**

**Sundukov A.E.<sup>1</sup>,  
Sundukov E.V.<sup>2</sup>,  
Shakhmatov E.V.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Turbina SK, LLC,  
Finskaya st. 96, of.1,  
Samara, 443011, Russia

<sup>2</sup> JSC “KUZNETSOV”,  
Zavodskoe shosse, 29,  
Samara, 443009,

<sup>3</sup> Samara National Research University  
(Samara University),  
34, Moskovskoye shosse, Samara,  
443086, Russia

sunduckov@mail.ru

*This paper shows that vibration-based tooth wear diagnostics through the intensity of the n-dimensional vector proved to be ineffective for planetary gearboxes of gas turbine engines as it is characterized by low intensity of multiple tooth harmonics. It was found that the intensity of the process dispersion around the third and the sixth tooth harmonic - as wear develops - could serve as a diagnostic indicator of this particular defect.*

**Keywords:** gearbox; tooth wear; diagnostics; vibration noise; frequency regions of multiple tooth harmonics

## References

- [1] Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration // Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. No. 12, pp. 121402/1-121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803.
- [2] I. F. Kravchenko, A. B. Edinovich, V. A. Yakovlev, V. L. Dorofeev. Studying aviation gears of fifth and sixth generation engines - experimental and theoretical results // Aerospace Engineering and Technology, 2008, # 8(55). P. 129 -134.
- [3] A. A. Avramenko, A. N. Kryuchkov, E., S. M. Plotnikov. A.E. Sundukov, E.V. Sundukov. Improving turboprop engine differential reducer gear tooth wear diagnosis based on vibration noise // Samara University Bulletin. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. 2018. V.17, # 3. P.16-26. DOI: 10. 18287/2541-7533-2018-17-3-16-26.
- [4] M.I. Kurushin, V.B. Balyakin, A.M. Kurushin. Causes of the excitation of oscillations in components of turboprop engines with differential reducer - experimental studies // Proceedings of the RAS Samara Center. 2014 V. 16. #4. P. 132-136.
- [5] Non-destructive testing: Handbook in 7 vols. Under the general editorship of V.V. Klyuev. V. 7, 2 books. Book 2. Vibration-based diagnostics. – Moscow, Mechanical Engineering, 2005. – 829 p.
- [6] Sheinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. – CSL, Knaxville, TN37923, USA.
- [7] Yuruzume, Mizutani, Tsubuku. Transmission errors and noise of spur gears having uneven tooth profile errors // Journal of Mechanical Design. 1979. V101, #2. p. 53-60.
- [8] G.A. Sokolov, R. V. Sagitov. Introduction to regression analysis and planning of regression experiments in economics. 2010. Moscow, INFRA, 208 p.