

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2026

А. Е. Сундуков доктор технических наук, технический директор;
ООО «ПКФ «ТСК»; г. Самара;
sunduckov@mail.ru

Е. В. Шахматов академик Российской академии наук, заведующий кафедрой
автоматических систем энергетических установок имени
академика РАН Владимира Павловича Шорина;
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва;
shakhm@ssau.ru

Показано, что для обеспечения оценки технического состояния редукторов авиационных газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации на объекте наиболее целесообразно анализировать сигналы штатных тахометрических датчиков частот вращения их входных и выходных валов. Использование этих сигналов по сравнению с вибрационными существенно сокращают временные и материальные затраты на разработку соответствующих методик. При этом исследуются сигналы в частотном диапазоне не выше 100 Гц, что существенно сокращает требования к используемым техническим средствам. В качестве примера рассматриваемая проблема решалась применительно к дифференциальному редуктору одного из газотурбинных двигателей с двумя соосными воздушными винтами. Рассмотрено несколько вариантов диагностических признаков, построенных на параметрах частоты узкополосных процессов исследуемых сигналов. Обоснован выбор наиболее информативного диагностического признака, сформулированы предложения по назначению его базового уровня (нормы). Представлен пример одного из возможных вариантов оценки величины износа зубьев редуктора в условиях эксплуатации. Выполнение работ не требует высокой квалификации исполнителей, и может быть обеспечено (при наличии соответствующей методики) персоналом аэродромных служб.

Газотурбинный двигатель; редуктор; износ боковых зубьев; диагностика; штатные тахометрические датчики

Цитирование: Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. К вопросу оценки технического состояния планетарных редукторов газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2026. Т. 25, № 1. С. 128-134. DOI: 10.18287/2541-7533-2026-25-1-128-134

Введение

В авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) оптимальная частота вращения турбин обеспечивается использованием планетарных редукторов. Высокие передаваемые нагрузки и частоты вращения входных валов в ряде случаев приводят к износу зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты» [1; 2]. Этот дефект вызывает генерацию вибрации, приводящей к усталостным поломкам элементов конструкции двигателя. Основным методом выявления опасных колебаний в роторных машинах является виброакустическая диагностика [3]. Для их выявления необходимо создание соответствующих методик. Как правило, их разработка осуществляется на основе экспериментального материала, полученного в условиях испытательного стенда завода-изготовителя. В большинстве случаев в качестве диагностических признаков дефектов используются параметры интенсивности вибрации. Однако, в работах сотрудников ПАО «Туполев» было показано, что перестановка двигателя со стенда на объект приводит к существенному изменению интенсивности вибрации [4]. Чаще всего

выявление дефектов ГТД требуется проводить в условиях эксплуатации на объекте. Тогда необходимо иметь соответствующие коэффициенты пересчёта диагностических признаков, построенных по интенсивности вибрации. Получение таких коэффициентов требует проведения комплекса работ в условиях эксплуатации ГТД, что не всегда выполнимо и существенно увеличивает временные и материальные затраты на разработку методик диагностики.

Постановка задачи и метод решения

Целью работы является разработка рекомендаций по обеспечению оценки технического состояния редуктора одного из газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации на объекте. Преодоление отмеченных проблем предлагается осуществить путём анализа сигналов штатных тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора [5], соответственно вала турбокомпрессора (ТК) и вала заднего винта (ВЗВ). При этом используются имеющиеся на борту объекта соответствующие штепсельные разъёмы, позволяющие зарегистрировать исследуемые процессы. Диагностика дефектов планетарных редукторов строится на анализе параметров частот этих процессов. Применение параметров частоты до режима работы двигателя 0,85 от номинального нечувствительно к типу применяемых воздушных винтов [6]. Анализировались данные четырёх вариантов износа:

- 1) текущий – максимальный износ зубьев солнечной шестерни относительно эвольвенты после последнего ремонта (номер износа 1);
- 2) текущий полный – максимальный износ зубьев солнечной шестерни относительно исходной эвольвенты (номер износа 2);
- 3) текущий суммарный – сумма максимальных износов зубьев солнечной шестерни и сателлитов относительно эвольвентограмм после последнего ремонта (номер износа 3);
- 4) суммарный полный – сумма максимальных износов солнечной шестерни и сателлитов относительно исходных эвольвентограмм (номер износа 4).

Для достижения поставленной цели работы исследовались следующие параметры девиации частоты вращения на режиме работы двигателя 0,85 номинального:

- ширина спектральной частоты вращения ВЗВ на уровне 0,5 от максимального значения ($\Delta_{\text{ВЗВ}}$);
- дисперсия девиации частоты вращения ВЗВ ($D_{\text{ВЗВ}}$);
- эксцесс плотности распределения текущих значений частоты вращения ротора ТК ($\mathcal{E}_{\text{ТК}}$);
- эксцесс плотности распределения текущих значений частоты вращения ротора ВЗВ ($\mathcal{E}_{\text{ВЗВ}}$).

Оценка текущего значения частоты проводилось в полосе ± 2 Гц относительно средних значений частот вращения роторов ТК и ВЗВ, массивы текущих значений частот формировались с использованием алгоритма, изложенного в [7].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 – 4 представлены графические зависимости значений исследуемых параметров от величины износа.

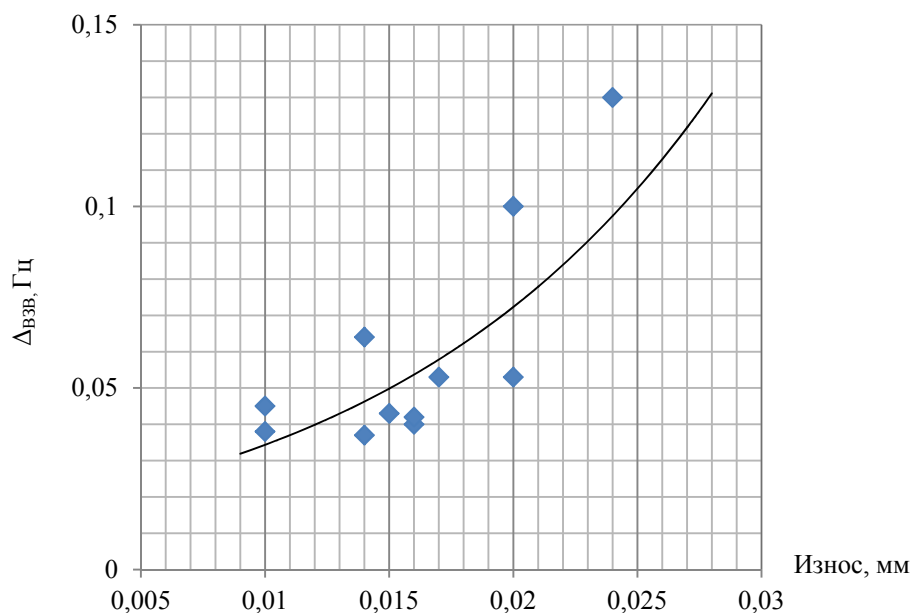


Рис. 1. Зависимость параметра $\Delta_{\text{взв}}$ от величины износа по варианту 2

С использованием программного продукта Excel получено уравнение аппроксимации, которое имеет вид: $y = 0,0163e^{74,416x}$, коэффициент корреляции $r = 0,77$.

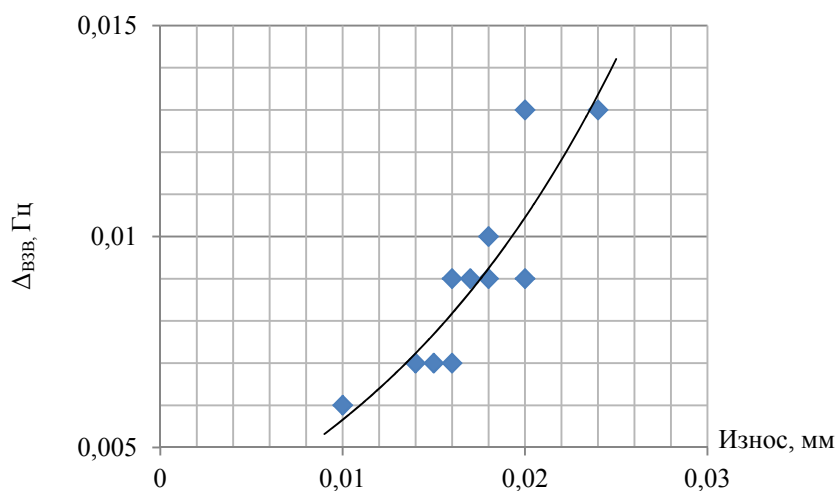


Рис. 2. Зависимость параметра $\Delta_{\text{взв}}$ от износа по варианту 2

С использованием программного продукта Excel получено уравнение аппроксимации, которое имеет вид: $y = 15,667x^2 + 0,0233x + 0,0038$, коэффициент корреляции $r = 0,87$.

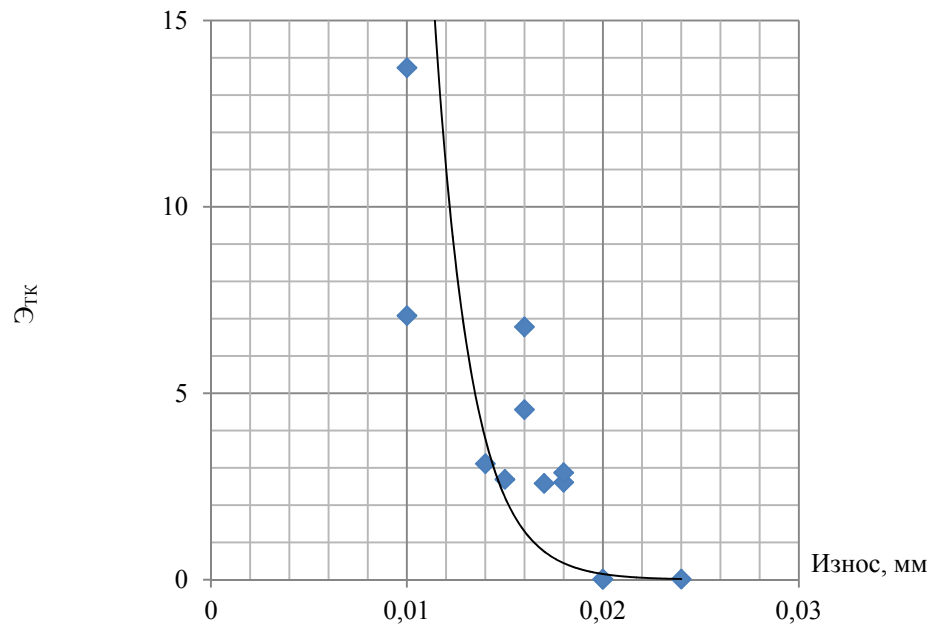


Рис. 3. Зависимость эксцесса плотности распределения текущей частоты вращения ротора турбокомпрессора от износа по варианту 2

С использованием программного продукта Excel получено уравнение аппроксимации, которое имеет вид: $y = 6813e^{-535,5x}$, коэффициент корреляции $r = 0,82$.

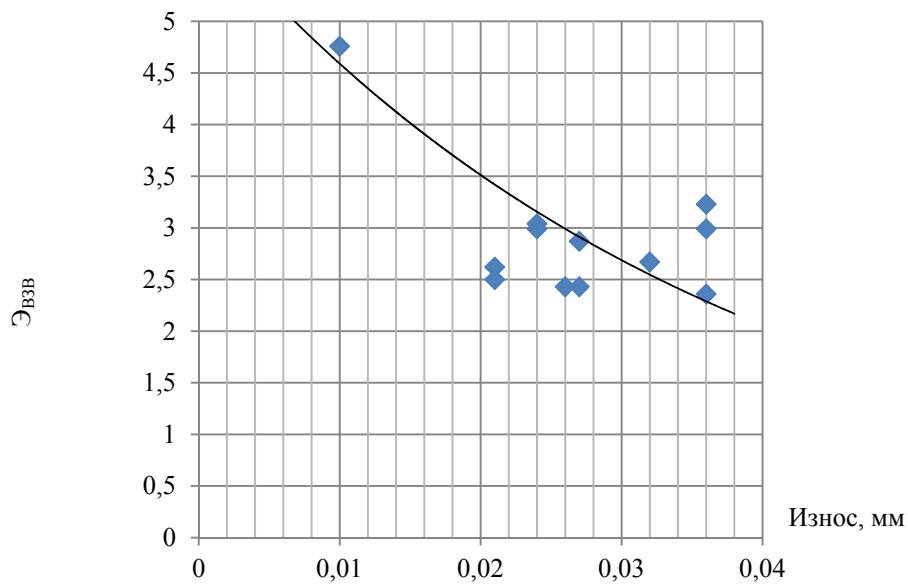


Рис. 4. Зависимость $\mathcal{E}_{ВЗВ}$ от износа по варианту 2

С использованием программного продукта Excel получено уравнение аппроксимации, которое имеет вид: $y = 6e^{-26,78x}$, коэффициент корреляции $r = 0,55$.

Очевидно, что наиболее информативным диагностическим признаком следует признать тот, у которого его модель окажется ближе к модели развития износа. В [8] показано, что без учёта этапа приработки наиболее приемлемы зависимости комбинации линейной и экспоненциальной частей. При этом, как показано в [8], упрощается процедура определения базового значения диагностического признака. Это точка перехода линейной части в экспоненциальную, тогда, в качестве диагностического признака износа по данным анализа сигналов штатных тахометрических датчиков следует принять параметр $\Delta_{ВЗВ}$. На основе этого параметра следует разрабатывать соответствующую методику оценки технического состояния редуктора в условиях эксплуатации на объекте. В качестве нормы на величину $\Delta_{ВЗВ}$ следует принять его значение, равное 0,055 Гц, рассчитанное в соответствии с действующей нормативной документацией [9].

Заключение

В результате выполненных исследований установлено:

- диагностику технического состояния редукторов газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации целесообразно проводить по анализу сигналов штатных тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов;
- для рассматриваемого газотурбинного двигателя в качестве диагностического признака величины износа зубьев его редуктора следует принять ширину спектральной составляющей частоты вращения выходного вала редуктора на уровне 0,5 относительно максимального значения;
- при разработке соответствующей методики оценки технического состояния редуктора по рассматриваемому дефекту в качестве базового значения (нормы) следует принять величину $\Delta_{ВЗВ}$, равное 0,055 Гц.

Библиографический список

1. Курушин М.И., Балякин В.Б., Курушин А.М. Экспериментальные исследования причин возбуждения колебаний элементов турбовинтового двигателя с дифференциальным редуктором // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 4. С. 132-136.
2. 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
3. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. 828 с.
4. Вуль В.М., Попков В.И., Агафонов В.К., Бакланов В.С. Исследование динамических характеристик двигателя, стенда и объекта в местах опорных связей // Сб. трудов «Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов». Вып. 7. Куйбышев: КуАИ, 1980. С. 62-68.
5. Авраменко А.А., Крючков А.Н., Плотников С.М., Сундуков А.Е., Сундуков Е.В. Использование сигналов с датчиков частоты вращения валов газотурбинного двигателя в диагностике технического состояния его редуктора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 1. С. 7-17. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-7-17
6. Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. Оценка влияния места постановки двигателя и типа воздушного винта на диагностические признаки износа зубьев его редуктора //

Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29, № 4. С. 208-218. DOI: 10.3475/vst-2022-4-208-218

7. Сундуков А.Е., Сундуков Е.В., Бит-Зая А.В., Росляков А.В. Оценка ширины дискретных составляющих спектра вибрации энергетических машин // Известия Самарского научного центра РАН. Спец. выпуск «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». 2006. С. 194-197.

8. Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. К вопросу нормирования диагностических признаков износа зубьев редукторов авиационных газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 28-37. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-28-37

9. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерения вибрации. М.: Стандартинформ, 2010. 33 с.

HEALTH ASSESSMENT OF PLANETARY GEARBOXES FOR GAS-TURBINE ENGINES UNDER OPERATING CONDITIONS

© 2026

A. Ye. Sundukov Doctor of Science (Engineering), Chief Technology Officer;
PKF TSK, LLC, Samara, Russian Federation;
sundukov@mail.ru

Ye. V. Shakhmatov Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department
of Power Plant Automatic Systems named after Academician V.P. Shorin;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
shakhm@ssau.ru

The study demonstrates that for assessing the condition of aircraft gas-turbine engine gearboxes during on-site operation, the most effective method is analyzing speed signals from standard onboard tachometers on their input and output shafts. The use of these signals, compared to vibration signals, significantly reduces the time and material costs of developing the corresponding methods. In this case, signals are analyzed in a frequency range of no more than 100 Hz, which significantly reduces the requirements for the facilities used. As an example, the problem under consideration was solved relative to the differential gearbox of one of the turboprop engines with two coaxial propellers. Several potential diagnostic indicators based on the frequency parameters of narrow-band processes of the analyzed signals are considered. The selection of the most helpful diagnostic indicator is substantiated, and recommendations for the establishment of its basic level (reference value) are formulated. An example of one of the potential options for assessing the amount of wear on gearbox teeth under operating conditions is presented. The work does not require highly qualified personnel and can be provided, if the appropriate methodology is available, by the airfield service personnel.

Gas turbine engine; gearbox; tooth flank wear; diagnostics; standard tachometer sensors

Citation: Sundukov A.Ye., Shakhmatov Ye.V. Health assessment of planetary gearboxes for gas-turbine engines under operating conditions. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2026. V. 25, no. 1. P. 128-134. DOI: 10.18287/2541-7533-2026-25-1-128-134

References

1. Kurushin M.I., Balyakin V.B., Experimental studies of causes of the oscillations excitation in components of a turboprop engine with differential gearbox // *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2014. V. 16, no. 4. P. 132-136. (In Russ.)

2. 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

3. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik v 7 t. T. 7, kn. 2. Vibrodiagnostika / pod red. V.V. Klyueva* [Nondestructive testing: Handbook. In 7 volumes. V. 7. Book 2. Vibration-based diagnostics / ed. by V.V. Klyuev]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 828 p.

4. Vul' V.M., Popkov V.I., Agafonov V.K., Baklanov V.S. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik dvigatelya, stenda i ob"ekta v mestakh opornykh svyazey. *Sb. Trudov «Vibratsionnaya prochnost' i Nadezhnost' Dvigatelay i Sistem Letatel'nykh Apparatov»*. Iss. 7. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1980. P. 62-68. (In Russ.)

5. Avramenko A.A., Kryuchkov A.N., Plotnikov S.M., Sundukov E.V., Sundukov A.E. Using signals from the gas-turbine engine shaft speed sensor in the diagnosis of the technical condition of its reduction gearbox. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 1. P. 7-17. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-7-17

6. Sundukov A.E., Shakhmatov E.V. Evaluation of both engine placement and propeller type effect on the diagnostic signs of its gearbox teeth wear. *Aerospace MAI Journal*. 2022. V. 29, no. 4. P. 208-218. DOI: 10.34759/vst-2022-4-208-218

7. Sundukov A.E., Sundukov E.V., Bit-Zaya A.V., Roslyakov A.V. Evaluation of the width of the discrete components of the spectrum of vibration energy machines. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN. Spets. vypusk «Problemy Zheleznodorozhnogo Transporta na Sovremennom Etape Razvitiya»*. 2006. P. 194-197. (In Russ.)

8. Sundukov A.Ye., Shakhmatov Ye.V. Standardization of diagnostic indicators of gearbox teeth wear in aircraft gas-turbine engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 28-37. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-28-37

9. GOST R ISO 13373-2-2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 2. Processing, analysis and presentation of vibration data. Moscow: Standartinform Publ., 2010. 33 p. (In Russ.)