



Комбинационные диагностические признаки технического состояния планетарных редукторов ГТД

А. Е. Сундуков

кандидат технических наук, технический директор
ООО «ПКФ «ТСК»; г. Самара;
email: sunduckov@mail.ru

А. А. Иголкин

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры АСЭУ;
Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С. П. Королёва, г. Самара;
email: igolkin97@gmail.com

Показано, что по аналогии с комбинационными диагностическими признаками в диагностике технического состояния ГТД с успехом можно использовать структурные диагностические признаки в виде суммы или разности однотипных параметров, их применение при анализе сигналов штатных тахометрических датчиков частот вращения валов существенно упрощает процедуру оценки технического состояния исследуемого объекта по сравнению с анализом вибрационных процессов. Как и в случае комбинационных диагностических признаков могут использоваться различные характеристики диагностических признаков: ширина спектральных составляющих на разных уровнях, параметры девиации частоты узкополосных процессов и другие.

Ключевые слова: турбовинтовой двигатель; редуктор; износ зубьев; диагностика; штатные тахометрические датчики

Цитирование: Сундуков, А. Е. Комбинационные диагностические признаки технического состояния планетарных редукторов ГТД / А. Е. Сундуков, А. А. Иголкин // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №2. – С. 38-45. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-38-45

Введение

Согласование относительных частот вращения воздушных винтов и вентиляторов с частотами вращения турбокомпрессора обеспечивается за счёт использования в конструкции газотурбинных двигателей (ГТД) редукторов. Практика показывает, что часто именно работоспособность узла определяет ресурс двигателя. Наиболее распространённым дефектом редукторов ГТД является износ боковых поверхностей их зубьев. Главная опасность этого дефекта заключается в генерации вибрации при развитии дефекта, вызывающей резонансные колебания элементов конструкции двигателя [1, 2].

Наиболее эффективным методом контроля вибрации машин является виброакустическая диагностика [3,4]. Практика вибродиагностики роторных машин показывает, что в подавляющем числе случаев в качестве диагностических признаков используется характеристика интенсивности на информативной частоте. Влияние большого количества факторов на данные диагностические признаки подвигло ряд авторов на разработку безразмерных дискриминант[5,6]. Предлагаемые характеристики достаточно сложны в использовании. В рабо-

те [7] авторы рекомендуют применять простые структурные признаки в виде отношения двух амплитуд, частоты к амплитуде, частоты к декременту и т. д. Их достоинство заключается в удобстве измерений и использования, практической независимости от многих погрешностей, так как оцениваются относительные величины.

Постановка задачи и метод решения

Целью работы является разработка комплекса диагностических признаков износа зубьев редуктора в виде комбинационных составляющих, определяемых разностью или суммой однотипных характеристик. Работа выполнена на экспериментальном материале турбовинтового двигателя с двумя соосными воздушными винтами. При этом рассматривалось четыре варианта износа:

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

Результаты и их обсуждение

Рассматривались следующие варианты комбинационных диагностических признаков:

- разность ширины спектральной составляющей $\Delta_{\max} - \Delta_{0,366}$;
- разность ширины спектральной составляющей $\Delta_{\max} - \Delta_{0,5}$;
- сумма ширины спектральной составляющей $\Delta_{\max} + \Delta_{0,366}$;
- сумма ширины спектральной составляющей $\Delta_{\max} + \Delta_{0,5}$.

А также структурные варианты комбинационных признаков в виде:

$$\frac{\Delta_{\max} + \Delta_{0,366}}{\Delta_{\max} - \Delta_{0,366}} \text{ и } \frac{\Delta_{\max} + \Delta_{0,5}}{\Delta_{\max} - \Delta_{0,5}} \quad [2].$$

Здесь под спектральной составляющей подразумевается гармоника на частоте вращения выходного вала редуктора. Используются три значения ширины:

- максимальная, определяемая на тонком пересечении левой и правой ветви спектральной составляющей с уровнем шума (Δ_{\max});
- на уровнях 0,366 ($\Delta_{0,366}$) и 0,5 ($\Delta_{0,5}$) от максимального значения.

Спектральная составляющая оценивалась в сигнале штатного тахометрического датчика «частоты вращения» выходного вала редуктора заднего винта. Использование данного вида сигнала существенно упрощает процедуру оценки технического состояния редуктора в условиях эксплуатации.

На рисунках 1–8 представлены графические зависимости рассматриваемых диагностических признаков износа.

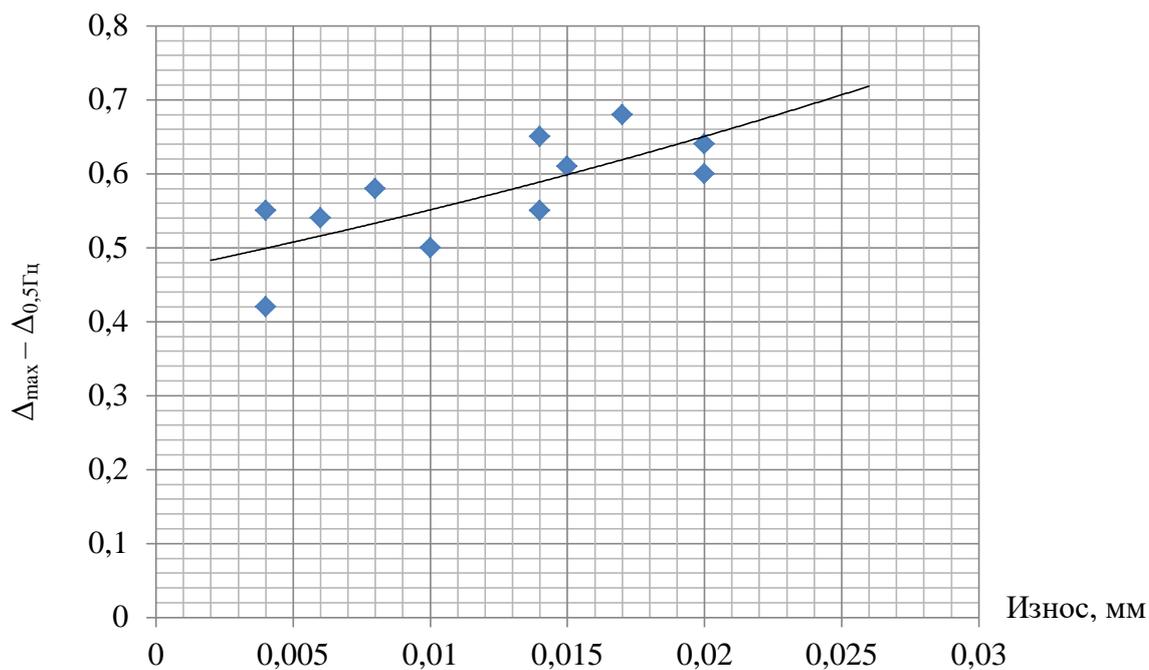


Рисунок 1 – Зависимость параметров $\Delta_{\max} - \Delta_{0,5}$ от износа 1

Уравнение аппроксимации имеет вид $y=0,4672e^{16,553x}$, коэффициент корреляции $r=0,73$.

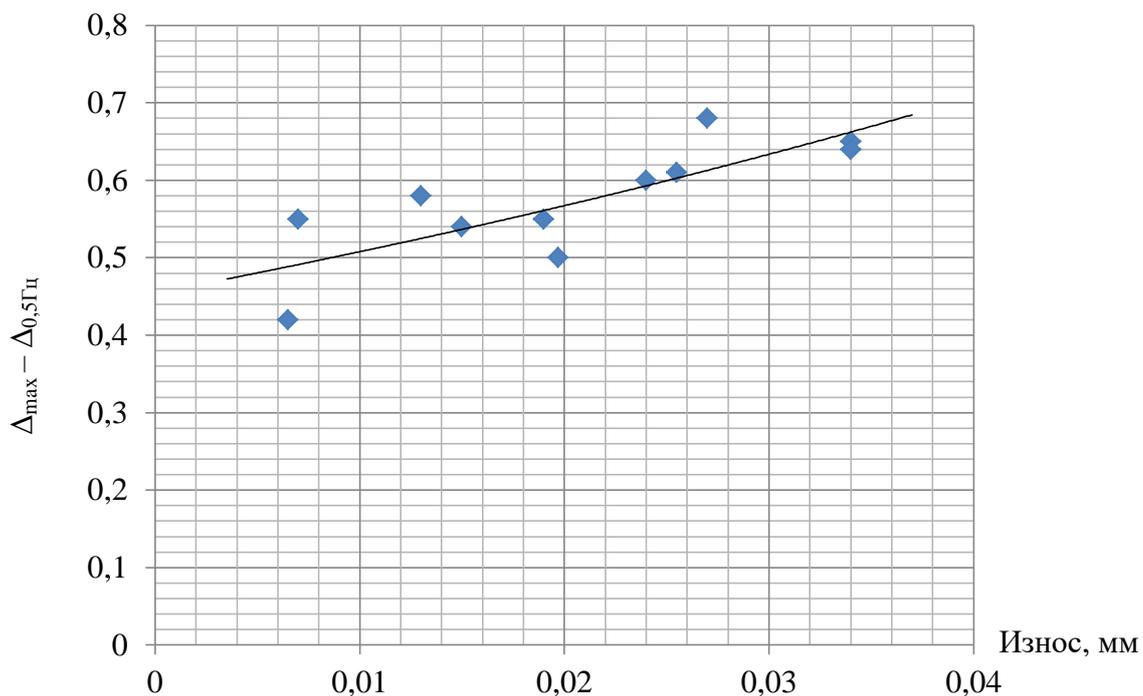


Рисунок 2 – Зависимость параметров $\Delta_{\max} - \Delta_{0,5}$ от износа 3

Уравнение аппроксимации имеет вид $y=0,4546e^{11,063x}$, коэффициент корреляции $r=0,79$.

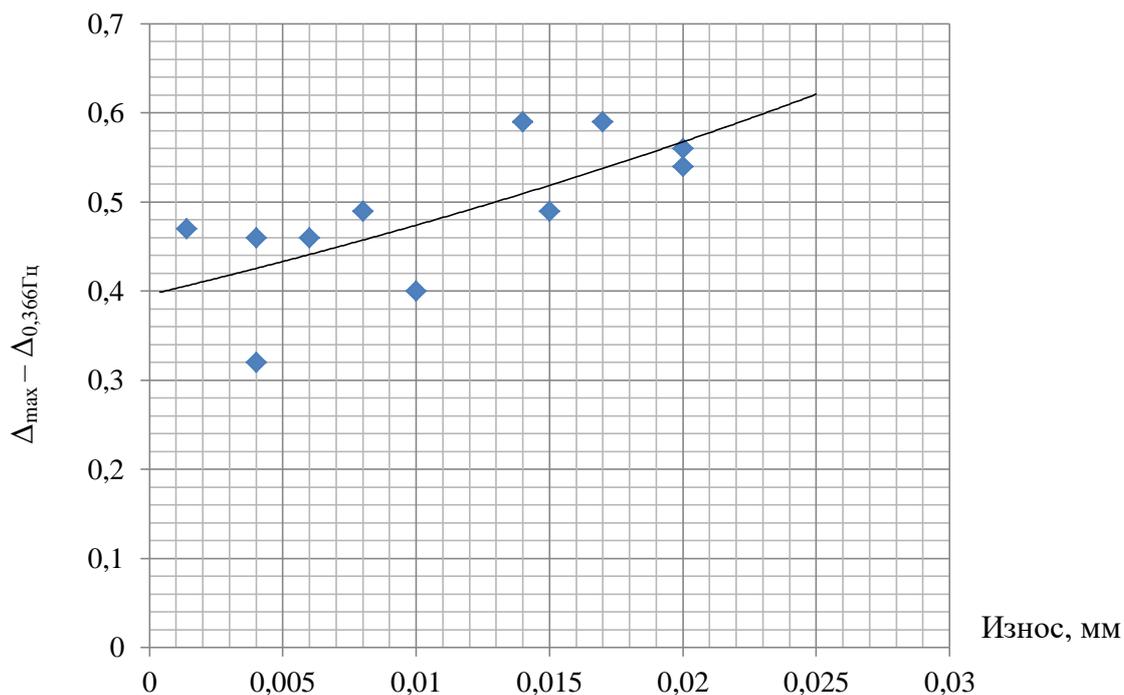


Рисунок 3 – Зависимость параметров $\Delta_{\max} - \Delta_{0,366}$ от износа 1

Уравнение аппроксимации имеет вид $y=0,396e^{18,001x}$, коэффициент корреляции $r=0,70$.

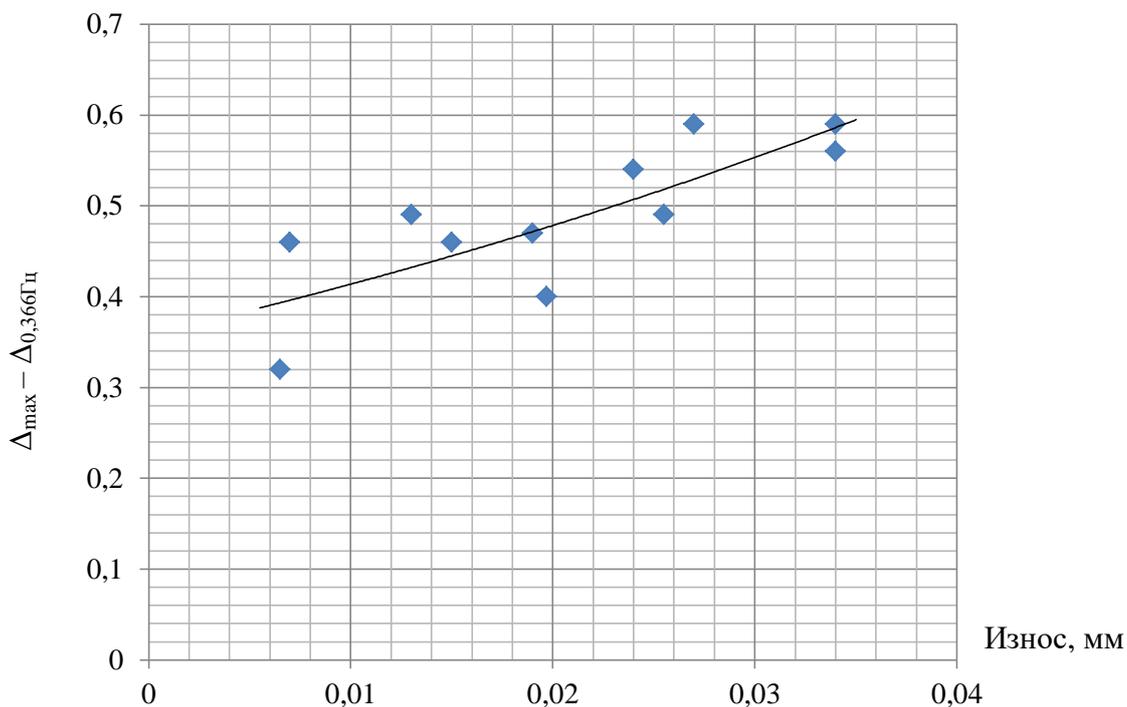


Рисунок 4 – Зависимость параметров $\Delta_{\max} - \Delta_{0,366}$ от износа 3

Уравнение аппроксимации имеет вид $y=0,3579e^{14,517x}$, коэффициент корреляции $r=0,79$.

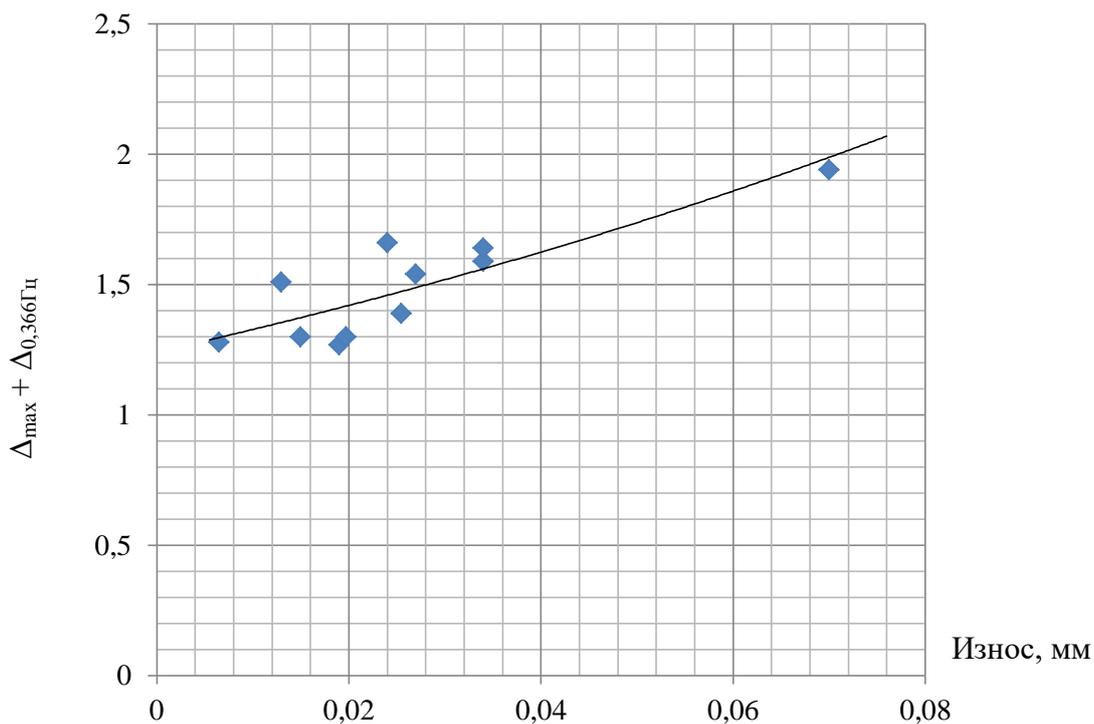


Рисунок 5 – Зависимость параметров $\Delta_{\max} + \Delta_{0,366}$ от износа 3

Уравнение аппроксимации имеет вид $y=1,2411e^{6,7292x}$, коэффициент корреляции $r=0,86$.

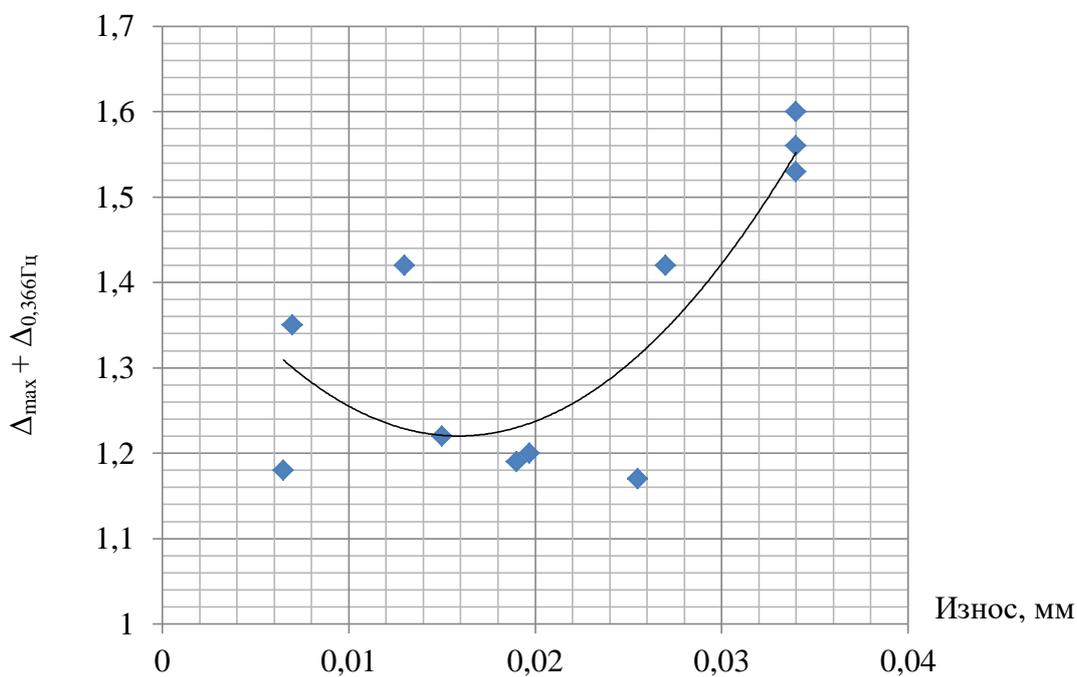


Рисунок 6 – Зависимость параметров $\Delta_{\max} + \Delta_{0,366}$ от износа 3

Уравнение аппроксимации имеет вид $y = 1011,2x^2 - 32,111x + 1,4751$, коэффициент корреляции $r=0,7$.

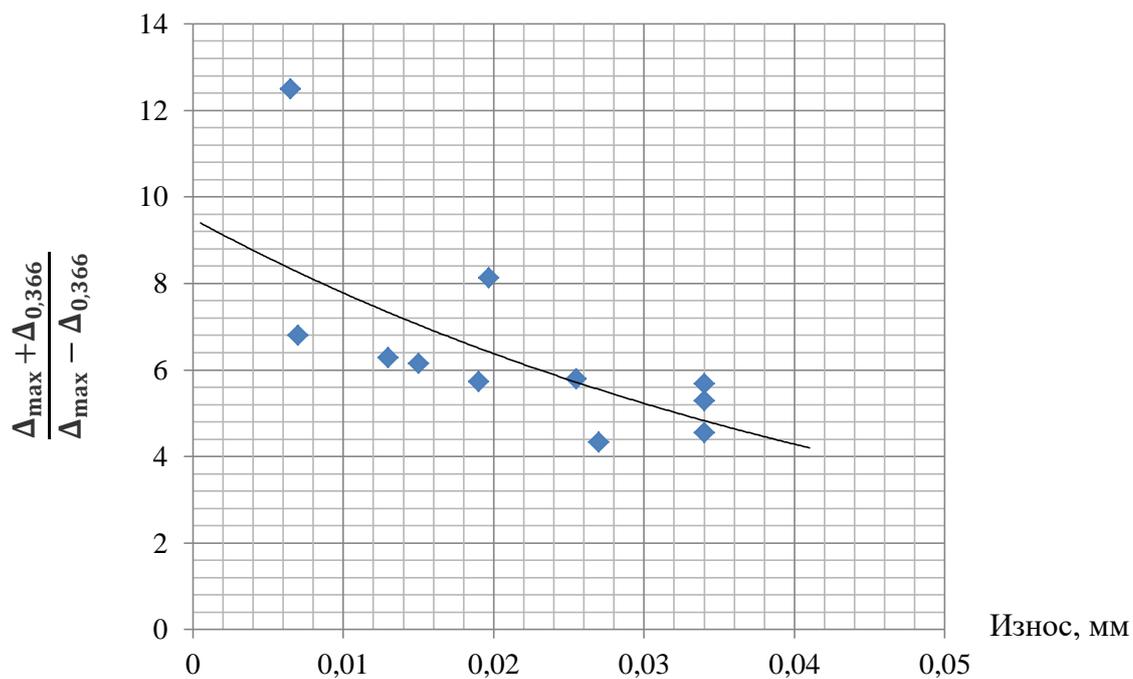


Рисунок 7 – Зависимость параметров $\frac{\Delta_{\max} + \Delta_{0,366}}{\Delta_{\max} - \Delta_{0,366}}$ от износа z

Уравнение аппроксимации имеет вид $y = 9,4907e^{-19,88x}$, коэффициент корреляции $r = 0,67$.

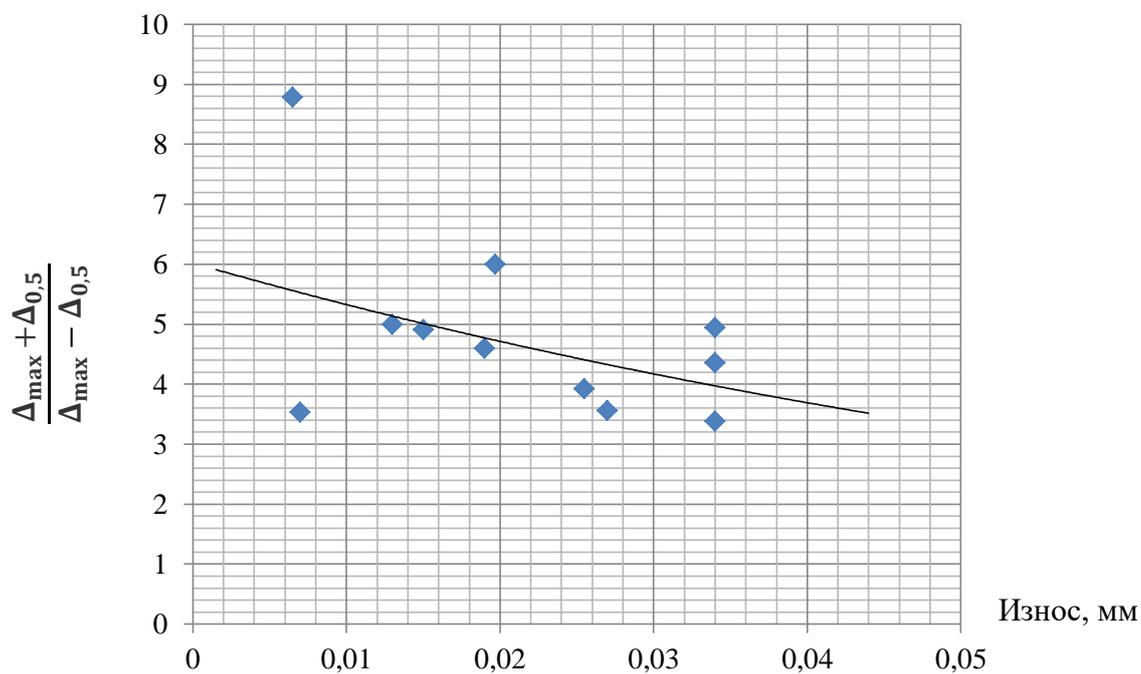


Рисунок 8 – Зависимость параметров $\frac{\Delta_{\max} + \Delta_{0,5}}{\Delta_{\max} - \Delta_{0,5}}$ от износа z

Уравнение аппроксимации имеет вид $y = 6,0201e^{-12,23x}$, коэффициент корреляции $r = 0,63$.

В данном случае предложены комбинационные диагностические признаки на основе анализа сигнала штатного тахометрического датчика частоты вращения выходного вала ре-

дуктора. Однако аналогичные признаки можно получить для вибрационного процесса при использовании, например, ширины зубцовой спектральной составляющей. При этом возможно использование других характеристик динамических процессов: оценка девиации частоты узкополосных процессов, анализ изменения энергетических характеристик (амплитуды, среднеквадратических значений, дисперсии и т. д.). Новизна некоторых вариантов комбинационных диагностических признаков защищена соответствующими патентами на изобретения [8, 9]. В первом случае, оценивая ширину спектральной составляющих на двух уровнях и взяв их разность, определяется изменение её формы. Во втором случае на основе разности дисперсий девиации частот вращения входного и выходного валов определяется уровень износа зубьев редуктора ГТД.

Заключение

1. Выполненные исследования позволили предложить примеры комбинационных диагностических признаков, расширяющие возможности оценки технического состояния роторных машин.

2. Использование в рассмотренном случае сигнала штатного тахометрического датчика существенно упрощает процедуру контроля технического состояния ГТД по сравнению с анализом вибрационных процессов.

Список использованных источников

1. Курушин, М. Н. Экспериментальные исследования причин возбуждения колебаний элементов турбокомпрессора двигателя с дифференциальным редуктором / М. Н. Курушин, В. Б. Балякин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16, №4. – С. 132-136.

2. Авраменко, А. А. Совершенствование методов вибродиагностики износа зубьев шестерён дифференциального редуктора турбовинтового двигателя / А. А. Авраменко, А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // 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. Под ред. В. В. Клюева. Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика. – Москва : Машиностроение, 2005. – 828 с.

4. Sokolova, A. G. New noise – immune incipient failure detection methods for machinery monitoring and protection systems / A. G. Sokolova // 5-th International Conference on Vibration Problems (October, 8-10, 2001, Moscow, Russia). Abstracts. – Moscow: IMASH Publ., 2001. – P. 48-53. (in Russ.).

5. Cempel, C. Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn / C. Cempel. –Wydawnictwo Nankowo-Techniczne, Warszawa, 1982. – 342 s.

6. Dyer, D. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis / D. Dyer, R. M. Stewart // Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME. – 1978. – V. 100, Iss. 2. – P. 229-235. DOI: 10.1115/1.345905.

7. Карасёв, В. А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В. А. Карасёв, В. П. Максимов, М. К. Сидоренко. – Москва : Машиностроение, 1978. – 132с.

8. Патент 2750846 С1 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 (2021.02). Способ измерения энергетической ширины спектральной составляющей вибрации машин : №2020129409 : заявлено 07.09.2020; опубликовано 05. 07.2021 / Сундуков А. Е.

9. Патент 2783467 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/02 (2006.01). Способ диагностики дефектов зубчатых колёс редуктора газотурбинного двигателя : №2021134259 : заявлено 24.11.2021 : опубликовано 14.11.2022 / Сундуков А. Е.

Combination diagnostic features of technical condition of planetary gearboxes for gas-turbine engines

A. E. Sundukov

Candidate of Science (Engineering),
CTO of PKF TSK JSC; Samara, Russian Federation;
email: sundukov@mail.ru

A. A. Igolkin

Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor
of the Department of Power Plant Automatic Systems;
Samara National Research University, Samara, Russian
Federation;
email: igolkin97@gmail.com

It is shown that, by analogy with combination diagnostic features, in diagnostics of technical condition of gas turbine engines it is possible to successfully use structural diagnostic features as sum or difference of uniform parameters; their use, when analyzing the signals from "standard" tachometric shaft speed sensors, considerably simplifies the procedure for accessing the technical condition of an object under study in comparison with the analysis of vibration processes. As is the case with combination diagnostic features, various characteristics of diagnostic features can be used: the width of spectral components at different levels, the frequency deviation parameters in narrowband processes, and others.

Keywords: turboprop engine; gearbox; tooth wear; diagnostics; standard tachometric sensors

Citation: Sundukov, A. E. and Igolkin, A. A. (2025), "Combination diagnostic features of technical condition of planetary gearboxes for gas-turbine engines", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 2, pp. 38-45. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-2-38-45. (In Russian; abstract in English)

References

1. Kurushin, M. I., Balyakin, V. B. and Kurushin, A. M. (2014), "Experimental investigation of the courses of vibration excitation of elements of gas turbine engines with a differential reduction gearbox", *Izvestia of Samara Scientific Center of the RAS*, V. 16, no. 4, pp. 132-136. (In Russian)
2. Avramenko, A. A., Kryuchkov, A. N., Plotnikov, S. M. Sundukov, A. E. and Sundukov, E. V. (2018), "Improving the Methods of Vibration Diagnostics of Wear of Gear Teeth in the Differential Gearbox of a Turboprop Engine", *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 16–26. (In Russian)
3. *Nerazrushayushchiy kontrol' [Non-Destructive Testing] : A Reference Book in 7 Volumes.* (2005), Ed. by V. V. Klyuyev, Vol. 7 in 2 Books. Book. 2. *Vibrodiagnostika [Vibration Diagnostics]*, Mashinostroyeniye Publishing House, Moscow, 829 p. (In Russian)
4. Sokolova, A. G. (2001), "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, IMASH Publ., Moscow, pp. 48-53. (In Russian)
5. Cempel, C. (1982), *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki miazyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 342 p., (In Polish)
6. Dyer, D. and Stewart, R. M. (1978), "Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis", *Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME*, vol. 100, Iss. 2, pp. 229-235. DOI: 10.1115/1.345905.
7. Karasyov, V. A., Maksimov, V. P. and Sidorenko, M. K. (1978), *Vibratsionnaya diagnostika gazoturbinnikh dvigateley [Vibration diagnostics of gas turbine engines]*, Mashinostroyeniye [Mechanical Engineering], Moscow, 132p. (In Russian)
8. Sundukov, A. E. (2021), *Sposob izmereniya energeticheskoy shiriny spektral'noy sostavlyayushchey vibratsii mashin [Method for measuring energetic width of the spectral component of machines vibration]*, Patent RU 2750846 C1, 05.07.2021. (In Russian)
9. Sundukov, A. E. (2022), *Sposob diagnostiki defektov zubchatykh koles reduktora gazoturbinnogo dvigatelya [Method for diagnosing defects of toothed wheels of the gas turbine engine gearbox]*, Patent RU 2783467 C1, 14.11.2022. (In Russian)