

НОВЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

© 2023

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

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

Планетарные редукторы авиационных газотурбинных двигателей являются наиболее напряжёнными их узлами. Контроль их технического состояния в условиях эксплуатации посредством измерения температуры масла и наличия в нём стружки, визуальным эндоскопическим методом не обеспечивают требуемой полноты контроля. Высокая виброактивность редукторов, особенно при развитии широко распространённого дефекта в виде износа боковых поверхностей зубьев, требует привлечения дополнительных методов оценки их технического состояния. Практика эксплуатации таких сложных и напряжённых объектов показывает, что наиболее эффективной является виброакустическая диагностика. Однако для авиационных газотурбинных двигателей её использование связано с определёнными трудностями. Это, прежде всего, изменение интенсивности вибрации при перестановке двигателя со стенда на объект. На стенде завода-изготовителя двигателя, как правило, осуществляется сбор экспериментального материала для разработки методик вибродиагностики дефектов. Для преодоления отмеченной проблемы в работе предложены новые методы выявления диагностических признаков износа боковых поверхностей зубьев. Используются как вибрационные процессы, так и сигналы «штатных» тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора. Предложен комплекс диагностических признаков на базе частотных параметров. Использование некоторых из них позволяет выполнять оценку технического состояния редуктора двигателя в процессе эксплуатации, например в процессе выполнения регламентных работ.

Турбовинтовой двигатель; редуктор; износ; новые диагностические признаки

Цитирование: Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. Новые методы выявления диагностических признаков технического состояния редукторов авиационных ГТД // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 2. С. 105-115. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-105-115

Введение

Планетарные редукторы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) предназначены для увеличения крутящего момента и обеспечения оптимальной частоты вращения воздушных винтов и вентиляторов. Сложность конструкции, большие передаваемые нагрузки, работа как на стационарных, так и переходных режимах делают редукторы наиболее напряжёнными узлами авиационных ГТД. Контроль их технического состояния в процессе эксплуатации осуществляется с использованием нескольких способов: измерение температуры масла и наличия стружки, визуальный эндоскопический осмотр. Опыт эксплуатации авиационных ГТД с редукторами показывает, что перечисленные методы не обеспечивают необходимую полноту объективного контроля их технического состояния. В работах [1; 2] показано, что генерирование колебаний зубчатыми зацеплениями редукторов авиационных ГТД при развитии износа боковых поверхностей зубьев приводит к возбуждению резонансных колебаний элементов конструкции двигателей вплоть до их усталостных поломок. Общеизвестно, что среди разрушающих методов контроля технического состояния роторных машин виброаку-

стическая диагностика является наиболее эффективной [3; 4]. Используемые здесь подходы позволяют на ранней стадии появления дефекта обеспечить контроль его развития. Следует отметить, что «штатные» системы контроля вибрации ГТД предназначены для оценки интенсивности первых роторных гармоник и процессов в камерах сгорания. Контроль высокочастотной вибрации, генерируемой редуктором, требует применения широкополосных измерительных систем с постановкой соответствующих вибропреобразователей. Очевидно, что успех решения задачи диагностики технического состояния редуктора авиационного ГТД во многом будет определяться набором методов выявления диагностических признаков дефектов при анализе исследуемых процессов. Несмотря на достаточно большое количество диагностических признаков дефектов роторных машин (см., например, [5 – 13]), оценка технического состояния авиационных газотурбинных двигателей и их редукторов представляет определённые трудности. Помимо сложности конструкции, многорежимности, влияния большого количества факторов на их вибрационное состояние есть ещё одно обстоятельство, затрудняющее решение задачи их вибродиагностики. Это связано с тем, что подавляющее число диагностических признаков в той или иной мере используют характеристики интенсивности вибрации. При этом основной экспериментальный материал для построения методик вибродиагностики получают в условиях испытательного стенда завода-изготовителя двигателя. Перестановка двигателя со стенда на объект приводит, как правило, к существенному росту интенсивности вибрации [14]. Использование коэффициентов пересчёта в широком диапазоне частот, который используется в вибродиагностике зубчатых зацеплений, потребует значительных временных и материальных затрат для их определения. Кроме того, неизбежен существенный разброс данных от влияющих факторов. Поэтому весьма актуальным является расширение перечня располагаемых методов анализа и вида анализируемых сигналов с целью преодоления указанных проблем.

Постановка задачи и метод исследований

При эксплуатации авиационных ГТД с редуктором регистрируется довольно большое количество так называемых «штатных» параметров, в том числе частоты вращения входного и выходного валов редуктора. Наши исследования показывают, что анализ сигналов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения этих валов может быть использован для оценки технического состояния редуктора.

В настоящей работе предложены новые методы диагностики технического состояния редукторов как с использованием вибрационных процессов, так и на основе анализа сигналов со «штатных» тахометрических датчиков частот вращения ротора турбокомпрессора (ТК – входной вал редуктора) и вала заднего винта (ВЗВ – выходной вал редуктора). Эффективность предложенных методов показана на примере износа боковых поверхностей зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты». Исследовались двигатели, пришедшие в ремонт на завод-изготовитель и имеющие разную степень износа. Параметры сигналов со «штатных» тахометрических датчиков оценивались на максимальном режиме работы (другие режимы оговорены специально) ГТД следующим образом. По автоспектру определялась средняя частота процесса f_p . В полосе $f_p \pm 2$ Гц фильтровался исследуемый сигнал, далее оценивались текущие значения частоты на каждом полупериоде [15]. По массиву значений текущей частоты выполнялся расчёт требуемых характеристик. При оценке вибрационных параметров использовался сигнал с вибропреобразователя, установленного на стыке картеров ТК и редуктора. Ось вибропреобразователя сориентирована в вертикальном направлении (ось Y). При исследовании рассматривались четыре варианта износа [1]:

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

Результаты и их обсуждение

Оценка технического состояния редуктора может быть выполнена по нескольким характеристикам. Некоторые из них приведены на рис. 1 – 8. Здесь и далее представлены результаты для значимых коэффициентов корреляции r . Значимость парного коэффициента корреляции проверяется на основе t -критерия Стьюдента [16]. Расчёт параметра t выполняется по формуле

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

где n – объём 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 $P = 0,05$.

На рис. 1 представлены данные по дисперсии девиации частоты вращения выходного вала редуктора ($D_{ВЗВ}$).

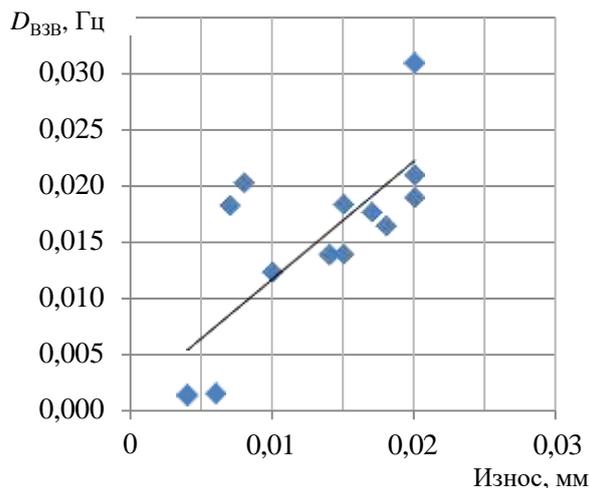


Рис. 1. Зависимость $D_{ВЗВ}$ от величины износа 1, $r=0,75$

Уравнение линейной аппроксимации имеет вид: $y = 1,048x + 0,001$.

Более высокий коэффициент корреляции получен для дисперсии производной ($D'_{ВЗВ}$) от частоты вращения вала заднего винта (рис. 2). Уравнение линейной аппроксимации: $y = 1031x + 0,063$.

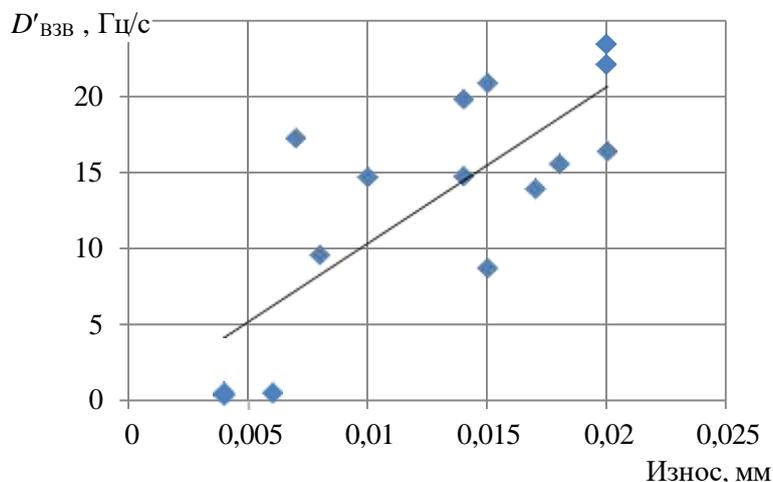


Рис. 2. Зависимость $D'_{ВЗВ}$ от величины износа I , $r = 0,78$

На рис. 3 представлены данные по влиянию износа на величину эксцесса закона распределения текущей частоты тахометрического датчика частоты вращения вала заднего винта.

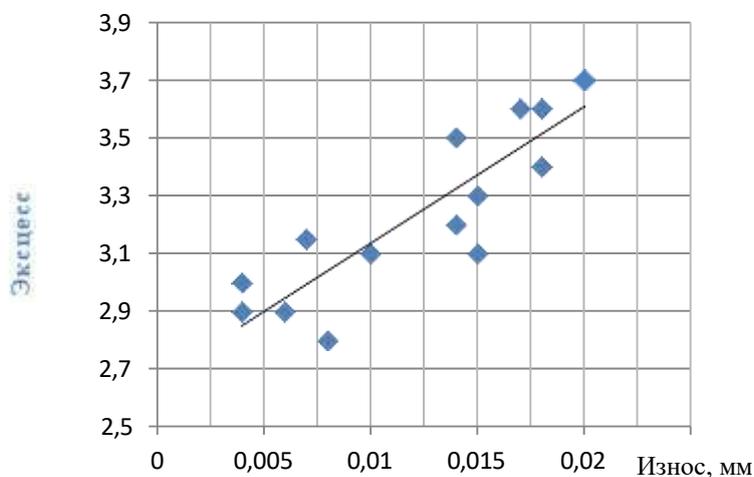


Рис. 3. Зависимость эксцесса плотности распределения текущей частоты вращения ротора выходного вала редуктора от величины износа I , $r = 0,88$

Уравнения линейной аппроксимации имеют вид: $y = 47,24x + 2,664$.

Использование разности дисперсий девиации частот вращения валов ВЗВ и ТК (ΔD) позволяет учесть влияние девиации частоты входного вала редуктора на дисперсию выходного. Соответствующие данные представлены на рис. 4. Это обеспечивает повышение точности и чувствительности метода [17].

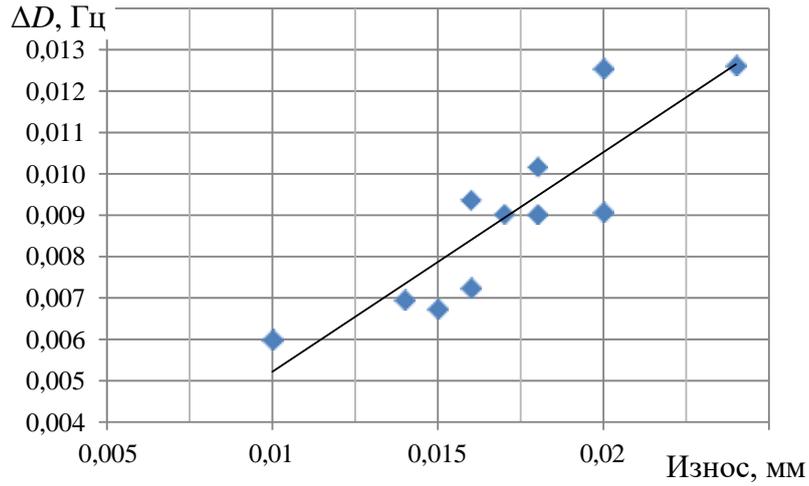


Рис. 4. Зависимость параметра ΔD от величины износа 2, режим работы двигателя 0,85 номинала, $r = 0,88$

Уравнение аппроксимации имеет вид: $y = 0,530x - 0,00008$.

На рис. 5, 6 представлены данные по параметрам девиации частоты вращения ротора ТК.

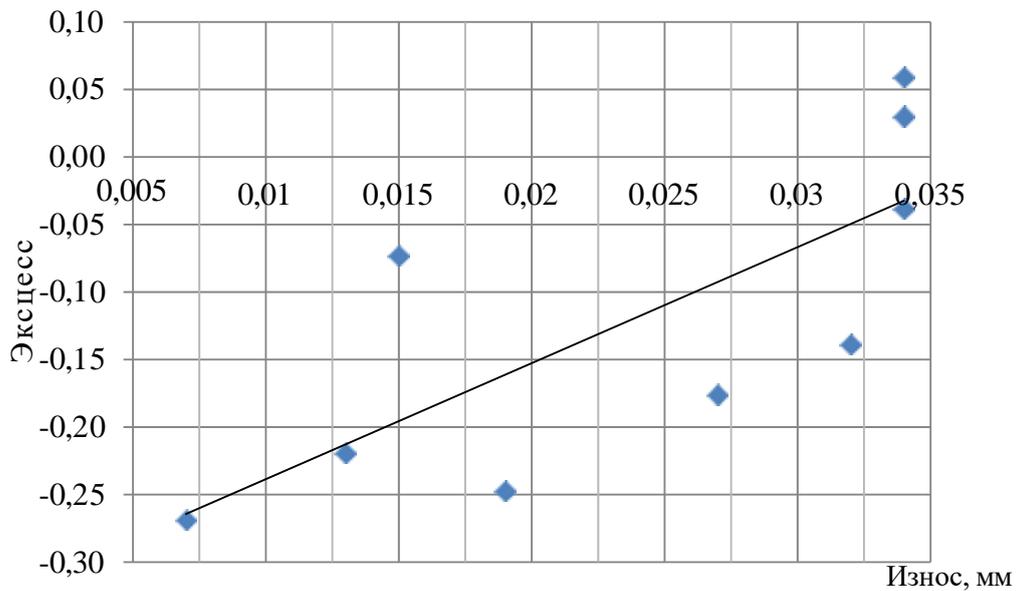


Рис. 5. Зависимость эксцесса плотности распределения текущей частоты вращения ротора ТК от величины износа 2, $r = 0,78$

Уравнение линейной аппроксимации имеет вид: $y = 8,587x - 0,324$.

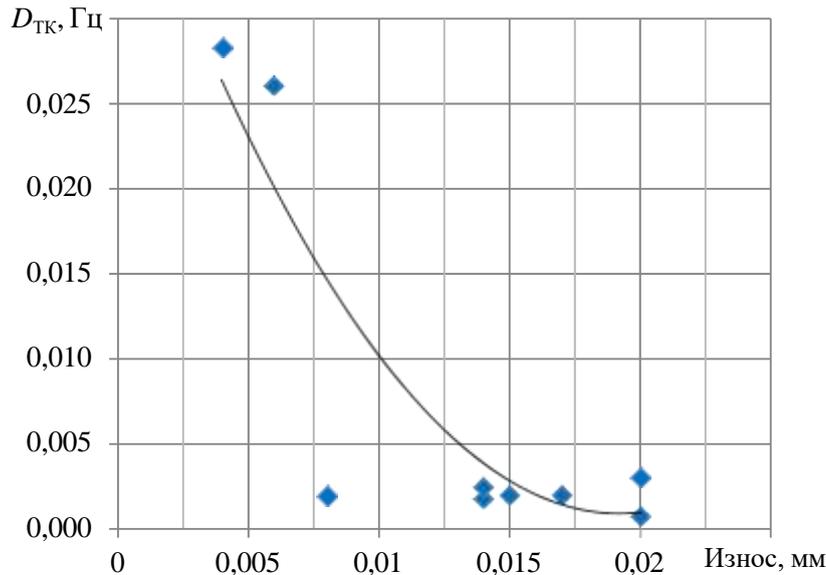


Рис. 6. Зависимость D_{TK} от величины износа 1, $r = -0,75$

Здесь D_{TK} – дисперсия девиации частоты вращения ротора ТК. Уравнение аппроксимации имеет вид: $y = 110,8x^2 - 4,245x + 0,041$.

Анализ ширины спектральной составляющей зубцовой гармоник пары «солнечная шестерня – сателлиты» с разной степенью износа перед их ремонтом позволил предложить способ, учитывающий изменение как ширины спектральной составляющей, так и её формы [18]. Ширина спектральной составляющей определялась в нижней её части (Δ_1) в месте пересечения её огибающей справа и слева с общим вибрационным фоном и на уровне 0,5 (Δ_2) от максимального значения в режиме спектральной плотности мощности. Разрешение по частоте выбиралось минимальным при обеспечении относительно гладкой кривой спектральной составляющей. Соответствующий графический вид представлен на рис. 7.

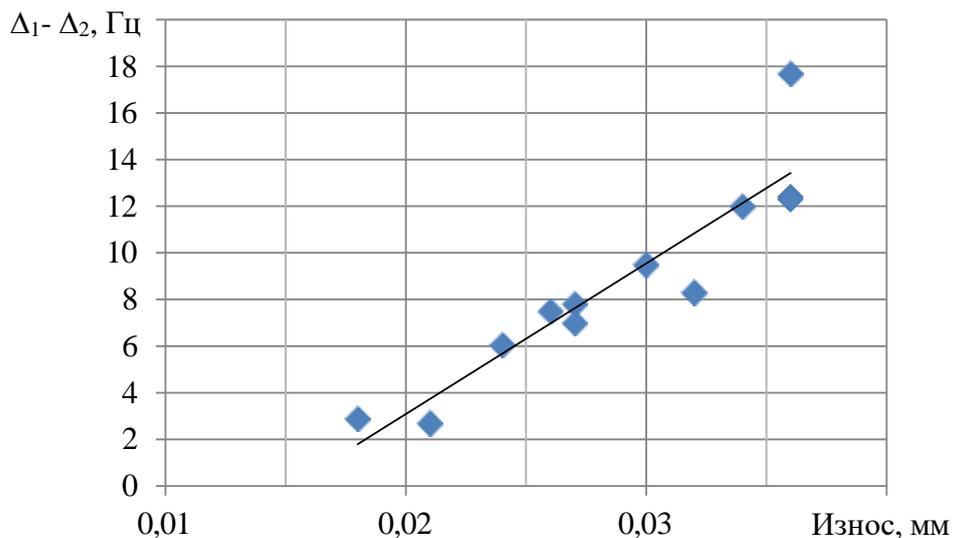


Рис. 7. Зависимость $\Delta_1 - \Delta_2$ от величины износа 4, $r = 0,92$

Уравнение аппроксимации: $-y = 649,5x - 9,92$.

С ростом величины износа происходит изменение не только ширины зубцовой спектральной составляющей и её формы, но и интенсивности. Тогда учёт изменения этих факторов обеспечивает интегральный параметр – площадь (S) под кривой соответствующей спектральной составляющей. Графическая иллюстрация интегрального признака представлена на рис. 8.

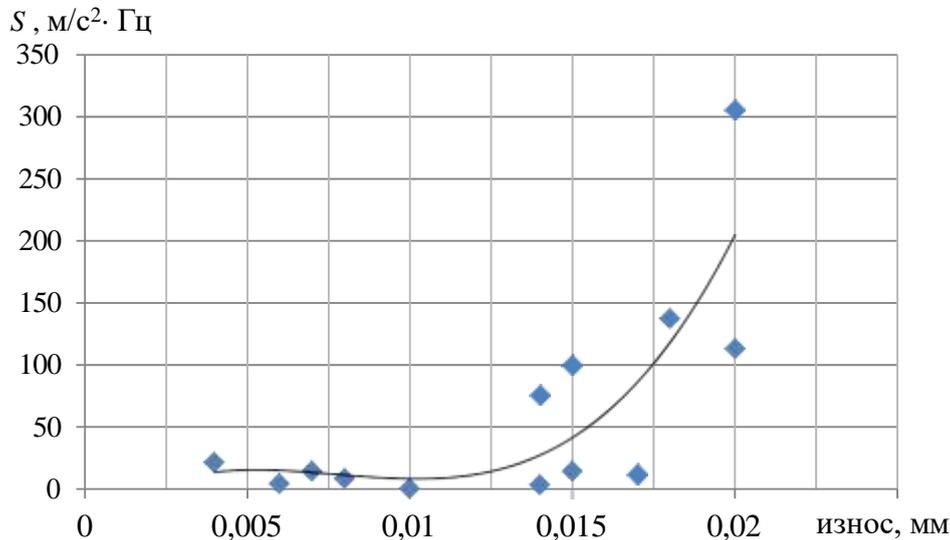


Рис. 8. Зависимость S от величины износа 2, $r = 0,67$

Уравнение аппроксимации имеет вид: $y = e + 08x^3 - 2e + 06x^2 + 19406x - 26,62$, где $e = 2,72$.

Как отмечено в [19], на величину кинематической погрешности зубчатого зацепления оказывают влияние такие факторы как технологические (погрешности изготовления и сборки зубчатого зацепления), эксплуатационные (частота вращения, передаваемая нагрузка, температура), конструктивные (податливость деталей привода и модификация рабочей поверхностей зуба). Это вызывает соответствующий рост кинематической погрешности и увеличение девиации частоты вращения выходного вала редуктора как на вновь изготовленном редукторе, так и отремонтированном. Тогда повысить точность и чувствительность рассмотренных выше способов можно путём определения (перед началом эксплуатации двигателя) значения исследуемого параметра и вычитания полученного результата из следующих результатов диагностических измерений [20].

Как видно из представленных данных, рост величины износа в паре «солнечная шестерня – сателлиты» приводит к увеличению девиации частоты вращения выходного вала дифференциального редуктора авиационного ГТД и её уменьшению для входного. Изменяется ширина зубцовой спектральной составляющей и площадь под её кривой. Изменяются как числовые характеристики текущих значений частот, так и вид плотностей их распределения. Использование сигналов «штатных» тахометрических датчиков позволяет контролировать техническое состояние редукторов авиационных двигателей в процессе их эксплуатации, например в процессе выполнения регламентных работ. При этом исключается использование сложного виброизмерительного оборудования и привлечение высококвалифицированных специалистов.

Заключение

Показана эффективность новых методов выявления диагностических признаков технического состояния редукторов авиационных ГТД, в том числе с использованием сигналов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора. Использование сигналов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения роторов двигателей позволяет оценивать техническое состояние их редукторов в процессе эксплуатации при проведении регламентных работ. Рассмотренные способы позволяют существенно расширить возможности в оценке технического состояния редукторов авиационных ГТД.

Библиографический список

1. 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
2. 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.
3. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика / под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2005. 828 с.
4. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
5. 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.
6. 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>
7. Kirsis T.T., Martin H.R. Gear pump defect detection under light loading conditions // Fluidics Quarterly. 1978. V. 10, Iss. 4. P. 73-89.
8. 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
9. 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
10. 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
11. 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.)
12. Randall R.B. Cepstrum analysis. Machine health monitoring using vibration analysis // Canadian Acoustical Association (October, 17-21, 1983, Vancouver, Canada). P. 3-15.
13. Harting D.R. Demodulated resonance analysis – A powerful incipient failure detection technique // ISA Transactions. 1978. V. 17, Iss. 1. P. 35-40.

14. 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.

15. 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.

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

17. Сундуков А.Е. Способ диагностики дефектов зубьев зубчатых колёс редуктора газотурбинного двигателя: патент РФ № 2737993; опубл. 07.12.2020; бюл. № 34.

18. Сундуков А.Е. Способ измерения энергетической ширины спектральной составляющей вибрации машин: патент РФ № 2750846; опубл. 05.07.2021; бюл. № 19.

19. Кожаринов Е.В., Калинин Д.В., Голованов В.В. Снижение вибронапряжённости авиационных зубчатых передач // Авиационные двигатели. 2020. № 1 (6). С. 57-64. DOI: 10.54349/26586061_2020_1_57

20. Сундуков А.Е. Способ диагностики дефектов зубьев зубчатых колёс редуктора газотурбинного двигателя: патент РФ № 2783467; опубл. 14.11.2022; бюл. № 32.

NEW METHODS FOR IDENTIFYING DIAGNOSTIC INDICATORS OF THE TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINE REDUCTION GEARBOXES

© 2023

A. Ye. Sundukov Candidate of Science (Engineering), Director;
PKF TSK, LLC, Samara, Russian Federation;
sunduckov@mail.ru

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

Planetary gearboxes of aviation gas turbine engines are their most stressed units. Control of their technical condition under operating conditions by measuring the oil temperature and the presence of chips in it by a visual endoscopic method does not provide the required completeness of control. High vibration activity of gearboxes, especially in case of development of a widespread defect in the form of wear of tooth flanks, requires additional methods of assessment of their technical condition. The practice of operating such complex and stressed objects shows that vibroacoustic diagnostics is the most effective one. However, for aviation gas-turbine engines its use is connected with certain difficulties. First of all, it is the change of vibration intensity when the engine is relocated from the test bench to the object. At the engine manufacturer's stand, as a rule, the collection of experimental material for the development of methods of vibration-based diagnostics of defects is carried out. To overcome the above-mentioned problem, we suggest new methods for detecting diagnostic signs of tooth flank wear. Both vibration processes and signals of "standard" tachometric sensors of input and output gearbox shaft rotation frequency are used. A set of diagnostic features on the basis of frequency parameters is proposed. The use of some of them makes it possible to assess the technical condition of the engine gearbox during operation, for example in the performance of routine maintenance work.

Turboprop engine; reduction gearbox; wear; new diagnostic indicators

Citation: Sundukov A.Ye., Shakhmatov Ye.V. New methods for identifying diagnostic indicators of the technical condition of aircraft gas turbine engine reduction gearboxes. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 2. P. 105-115. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-105-115

References

1. 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
2. Kurushin M.I., Balyakin V.B., Kurushin A.M. Experimental investigation of the courses of vibration excitation of elements of gas turbine engines with a differential reduction gearbox. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2014. V. 16, no. 4. P. 132-136. (In Russ.)
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. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
5. 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.)
6. 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>
7. Kirsis T.T., Martin H.R. Gear pump defect detection under light loading conditions. *Fluidics Quarterly*. 1978. V. 10, Iss. 4. P. 73-89.
8. 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
9. 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
10. 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
11. 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.)
12. Randall R.B. Cepstrum analysis. Machine health monitoring using vibration analysis. *Canadian Acoustical Association (October, 17-21, 1983, Vancouver, Canada)*. P. 3-15.
13. Harting D.R. Demodulated resonance analysis – A powerful incipient failure detection technique. *ISA Transactions*. 1978. V. 17, Iss. 1. P. 35-40.
14. 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' dvigateley i sistem letatel'nykh apparatov»*. Iss. 7. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1980. P. 62-68. (In Russ.)
15. 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.)
16. 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.

17. Sundukov A.E. *Sposob diagnostiki defektov zub'ev zubchatykh koles reduktora gazoturbinnogo dvigatelya* [Diagnostic method for defects of teeth of geared wheels of reduction gear of gas turbin eengine]. Patent RF, no. 2737993, 2020. (Publ. 07.12.2020, bull. no. 34)

18. Sundukov A.E. *Sposob izmereniya energeticheskoy shiriny spektral'noy sostavlyayushchey vibratsii mashin* [Method for measuring energy width of spectral component of machine vibration]. Patent RF, no. 2750846, 2021. (Publ. 05.07.2021, bull. no. 19)

19. Kozharinov E.V., Kalinin D.V., Golovanov V.V. Reduction of aviation gear's vibration. *Aviation Engines*. 2020. No. 1 (6). P. 57-64. (In Russ.) DOI: 10.54349/26586061_2020_1_57

20. Sundukov A.E. *Sposob diagnostiki defektov zub'ev zubchatykh koles reduktora gazoturbinnogo dvigatelya* [Method for diagnostics of defects of gears of gear wheels of gearbox of gasturbine engine]. Patent RF, no. 2783467, 2022. (Publ. 14.11.2022, bull. no. 32)