

## МОДЕЛИ ШИРИНЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВЫХОДНОГО ВАЛА РЕДУКТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2024

**А. Е. Сундуков** кандидат технических наук, технический директор;  
ООО «ПКФ «ТСК», г. Самара;  
[sunduckov@mail.ru](mailto: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](mailto:shakhm@ssau.ru)

Редукторы авиационных газотурбинных двигателей являются наиболее напряжёнными их узлами. Это предполагает необходимость наличия способов контроля их технического состояния. Практика показывает, что наиболее эффективным методом является вибродиагностика. Однако она требует использования сложных измерительных систем и специалистов высокой квалификации. В настоящей работе показано, что погрешности изготовления и сборки зубчатого зацепления, характеристики режима работы машины конструктивные факторы, частотная модуляция от флуктуации частоты вращения ротора двигателя на стационарном режиме его работы и износ боковых поверхностей зубьев определяют ширину спектральной линии частоты вращения выходного вала редуктора. Используя полученные результаты по разработке модели ширины зубцовой спектральной линии, получены соотношения для ширины спектральной линии сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора и соответствующей спектральной линии его вибрации. Предложены модели для определения ширины спектральной линии частоты вращения выходного вала отремонтированных и вновь изготовленных редукторов и редукторов с износом боковых поверхностей зубьев. Это позволило разработать ряд новых диагностических признаков дефекта. Применительно к редуктору одного из турбовинтовых двигателей приведено несколько примеров их использования. Полученные результаты предоставляют возможность оценивать его техническое состояние в процессе эксплуатации.

*Газотурбинный двигатель; редуктор; износ боковых поверхностей зубьев; выходной вал редуктора; модели ширины спектральных составляющих; ширины спектральной линии*

---

**Цитирование:** Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. Модели ширины спектральной линии частоты вращения выходного вала редуктора газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 157-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-157-166

### Введение

Редукторы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) являются одними из наиболее нагруженных их узлов. Относительно высокие частоты вращения входных валов, действие высоких нагрузок и температур, значительная доля работы на нестационарных режимах, широкий частотный диапазон вибрационных нагрузок в виде изгибно-крутильных колебаний часто приводят к тому, что именно этот узел определяет ресурс двигателя [1; 2].

Контроль технического состояния редукторов авиационных ГТД осуществляется несколькими способами: путём оценки наличия стружки в масле, измерением температуры и давления масла, инструментальным визуальным контролем. Практика показывает, что наиболее эффективным является оценка технического состояния редуктора по его вибрации. Контроль технического состояния двигателей на объекте выполняется измерением довольно большого количества параметров, в том числе и вибрационных. Однако «штатные» виброизмерительные системы имеют относительно узкий частот-

ный диапазон, определяемый частотами вращения роторов двигателя и процессами в камерах сгорания. Контроль и диагностика зубчатых зацеплений роторных машин ведётся, как правило, по параметрам зубцевой гармоники. Её частота для редукторов авиационных ГТД может составлять несколько килогерц. При этом рекомендуется использовать интенсивность нескольких кратных ей гармоник [3]. Следовательно, это требует постановки дополнительных вибропреобразователей на двигатель и использования широкополосных измерительных средств с последующими периодическими измерениями, которые можно выполнять во время регламентных работ.

Наиболее распространённым дефектом авиационных редукторов является износ боковых поверхностей зубьев. Опасность износа заключается в генерации высокочастотной вибрации, вызывающей резонансные колебания элементов конструкции двигателя и усталостные их поломки [4; 5]. Включение в перечень регламентных работ оценки вибрационного состояния редуктора приведёт к их существенному усложнению и удорожанию. Кроме того, существует опасность пропуска критического развития дефекта. Наличие математических моделей существенно упрощают выявление дефектов роторных машин. Анализ литературных источников не позволил выявить модели отдельных составляющих спектра. В настоящей работе предложены математические модели для определения ширины спектральных линий выходного вала редуктора как для сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты его вращения, так и соответствующего вибрационного процесса, которые учитывают факторы, формирующие суммарную девиацию частоты его вращения. Использование разработанных моделей позволяет предложить новые диагностические признаки дефектов зубчатых зацеплений при анализе относительно низкочастотных сигналов «штатных» тахометрических датчиков частоты выходного вала редуктора.

### **Постановка задачи и метод решения**

В работе [6] отмечается, что тахометрические датчики авиационных ГТД частично выступают как измерители крутильных колебаний. Рассматриваемые дефекты (износ боковых поверхностей зубьев и боковой зазор) увеличивают девиацию частоты вращения выходного вала редуктора и ведут к увеличению интенсивности крутильных колебаний [2; 7]. Это приводит к росту кинематической погрешности, определяемой комплексом факторов: технологических (погрешности изготовления и сборки зубчатого зацепления), эксплуатационных (частоты вращения, температуры, передаваемой нагрузки), конструктивных (податливости деталей приводов, модификации рабочей поверхности зуба), износом боковых поверхностей зубьев в процессе эксплуатации [8; 9]. Выполненные ранее исследования позволили предложить соответствующие модели ширины зубцовой спектральной линии для отремонтированных и вновь изготовленных двигателей, а также двигателей с износом боковых поверхностей зубьев редуктора [10]. Указанные выше факторы аналогичным образом оказывают влияние на девиацию частоты вращения выходного вала редуктора и, соответственно, на ширину спектральной линии как сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора, так и соответствующей вибрационной составляющей. На основе полученных соотношений и с учётом влияния девиации частоты привода ротора датчика от ротора турбокомпрессора в настоящей работе предлагаются аналогичные модели для отремонтированных и изготовленных двигателей, а также двигателей с износом боковых поверхностей зубьев редукторов. Далее приведены примеры практического использования моделей для определения диагностических признаков величин износа боковых поверхностей зубьев редуктора в паре «солнечная шестерня – сателлиты». Работа выполнена путем анализа сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения вала заднего винта (ВЗВ – выходного вала редуктора), а также анализа

вибрационного процесса на частоте его вращения (первая винтовая гармоника) одного из турбовинтовых двигателей. Для измерения частоты вращения ВЗВ установлен тахометрический датчик ДТЭ-2. Его назначение – выдача электрических сигналов в виде трёхфазного тока с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора. Датчик представляет собой трёхфазный магнитоэлектрический генератор переменного тока и состоит из ротора – постоянного магнита и статорной обмотки. Максимальная выходная частота датчика 100 Гц. Учитывая, что частота тока и выходное напряжение тахогенератора пропорциональны измеряемой частоте вращения, оценку угловой скорости можно выполнять как путём измерения частоты переменного тока (равной частоте вращения ротора датчика), так и путём измерения величины напряжения. Датчик практически не имеет методической погрешности. Инструментальные погрешности связаны с трением в опорах его ротора, небалансом ротора и др. При измерениях, как правило, регистрируются межфазовые напряжения датчика. Уровень сигнала на фиксированной частоте находится в интервале 10,5...12,5 В. По данным завода-изготовителя величина основной среднеквадратической погрешности измерения частоты вращения при нормальных климатических условиях не превышает 1,5%. Ротор датчика приводится во вращение через редуктор, тогда как основной вклад в погрешность оценки частоты вносит погрешность кинематической цепи привода датчика. Расчёт этой погрешности выполнен в соответствии с ГОСТ 21098-82. Величина суммарной погрешности для датчика ротора ВЗВ не превышает 5,0% [11].

Оценка параметров девиации частоты вращения (ДЧВ) выходного вала редуктора была выполнена на максимальном режиме работы двигателя. Сигнал с тахометрического ДЧВ ВЗВ фильтровался в полосе  $\pm 2$  Гц относительно средней частоты, далее рассчитывался массив текущих значений частоты [12] и соответствующие вероятностные характеристики.

### Результаты и их обсуждение

В работе [10] была получена модель ширины зубцовой спектральной составляющей для отремонтированных двигателей в зависимости от влияния выше отмеченных факторов в виде:

$$\Pi_1 = 2\sqrt{2} (D_{\text{чм}} + D_{\text{п}} + D_{\text{р}} + D_{\text{к}}), \quad (1)$$

где  $D_{\text{чм}}$  – дисперсия девиации частоты вращения шестерни ротора на стационарном режиме работы машины;  $D_{\text{п}}$  – дисперсия девиации частоты вращения шестерни от погрешностей изготовления и сборки зубчатого зацепления;  $D_{\text{р}}$  – дисперсия девиации частоты вращения шестерни от влияния режимных факторов;  $D_{\text{к}}$  – дисперсия девиации частоты вращения шестерни от конструктивных факторов.

Для двигателей с износом боковых поверхностей зубьев соотношение имеет вид:

$$\Pi_2 = 2\sqrt{2} (D_{\text{чм}} + D_{\text{п}} + D_{\text{р}} + D_{\text{к}} + D_{\text{изн}}), \quad (2)$$

где  $D_{\text{изн}}$  – дисперсия девиации частоты шестерни от износа боковых поверхностей зубьев.

Рассмотренные выше факторы аналогичным образом формируют ширину спектральной составляющей сигнала «штатного» тахометрического ДЧВ выходного вала

редуктора. Тогда, по аналогии с (1), (2), можно определить модели ширины соответствующей спектральной составляющей в следующем виде:

- для отремонтированных двигателей

$$\Pi_3 = 2\sqrt{2} (D_{\text{чм1}} + D_{\text{п1}} + D_{\text{р1}} + D_{\text{к1}} + D_{\text{пр}}), \quad (3)$$

где  $D_{\text{чм1}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от работы системы поддержания относительной стабильности частоты вращения ротора двигателя;  $D_{\text{п1}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от погрешностей изготовления и сборки зубчатого зацепления;  $D_{\text{р1}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от влияния режимных факторов;  $D_{\text{к1}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от влияния конструктивных факторов;  $D_{\text{пр}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от влияния привода тахометрического датчика;

- для двигателей с износом боковых поверхностей зубьев:

$$\Pi_4 = 2\sqrt{2} (D_{\text{чм1}} + D_{\text{п1}} + D_{\text{р1}} + D_{\text{к1}} + D_{\text{пр}} + D_{\text{изн1}}), \quad (4)$$

здесь  $D_{\text{изн1}}$  – дисперсия девиации частоты вращения ротора тахометрического датчика, связанная с износом боковых поверхностей зубьев редуктора.

Тогда модель вида (4) позволяет формировать диагностические признаки величины износа боковых поверхностей зубьев авиационных редукторов по анализу параметров сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора.

Аналогичным образом ширину спектральной составляющей роторной вибрации выходного вала вновь изготовленного или отремонтированного редуктора  $\Pi_5$  можно определить в виде:

$$\Pi_5 = 2\sqrt{2} (D_{\text{чм2}} + D_{\text{р2}} + D_{\text{п2}} + D_{\text{к2}}), \quad (5)$$

где  $D_{\text{чм2}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от работы системы регулирования относительного постоянства частоты вращения ротора турбокомпрессора на стационарном режиме работы ГТД;  $D_{\text{р2}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от влияния режимных факторов;  $D_{\text{п2}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от погрешностей изготовления и сборки редуктора;  $D_{\text{к2}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от влияния конструктивных факторов.

При наличии износа ширина роторной спектральной линии вибрации выходного вала редуктора  $\Pi_6$  определится в виде

$$\Pi_6 = 2\sqrt{2} (D_{\text{чм2}} + D_{\text{р2}} + D_{\text{п2}} + D_{\text{к2}} + D_{\text{изн2}}), \quad (6)$$

где  $D_{\text{изн2}}$  – дисперсия девиации частоты вращения выходного вала редуктора от износа боковых поверхностей зубьев зубчатых колёс.

Приведём несколько примеров соответствующих диагностических признаков величины износа боковых поверхностей зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты». Анализировалась статистика с разной степенью износа двигателей, пришедших на завод-изготовитель в ремонт. Соответствующие примеры представлены на рис. 1 – 6. При этом рассматривались четыре варианта износа [4]:

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

Значимость парного коэффициента корреляции  $r$  оценивается на основе  $t$ -критерия Стьюдента [13]. Расчёт параметра  $t$  осуществляется по соотношению:

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

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  $P=0,05$ . Выполненный анализ показывает, что у представленных ниже данных значимыми следует признать результаты с коэффициентом корреляции  $r \geq 0,65$ .

На рис. 1 представлены данные по влиянию величины износа на ширину спектральной линии сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения ВЗВ на уровне  $1/e$  относительно максимального значения.

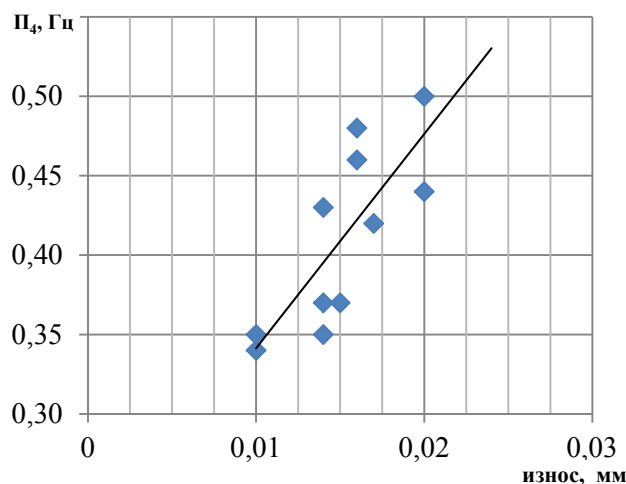


Рис. 1. Зависимость  $\Pi_4$  от величины текущего износа,  $r = 0,78$

Уравнение аппроксимации здесь имеет вид  $y = 13,49x + 0,206$ .

Получение аналогичной характеристики для роторной гармонике вибрации вала заднего винта затруднено из-за её низкой интенсивности и сложности её отделения от соответствующей характеристики вала переднего винта. Для низкочастотных составляющих малой интенсивности при наличии существенных погрешностей оценки ширины соответствующих спектральных линий более удобно получение соответствующих зависимостей характеристик девиации частоты вращения выходного вала редуктора. Их примеры для вала заднего винта представлены на рис. 2 – 5. Данные получены со «штатного» тахометрического датчика частоты вращения вала заднего винта.

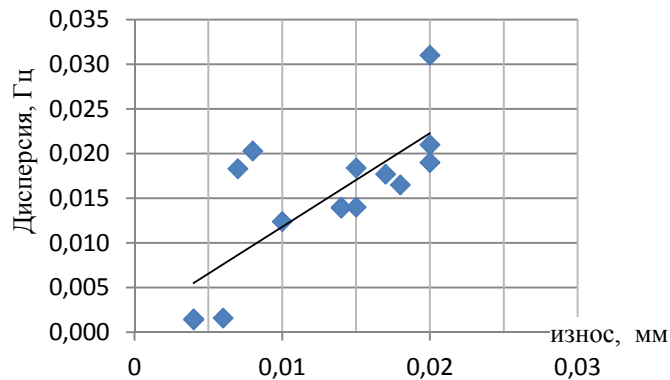


Рис. 2. Зависимость дисперсии девиации частоты ВЗВ от текущего износа,  $r = 0,75$

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

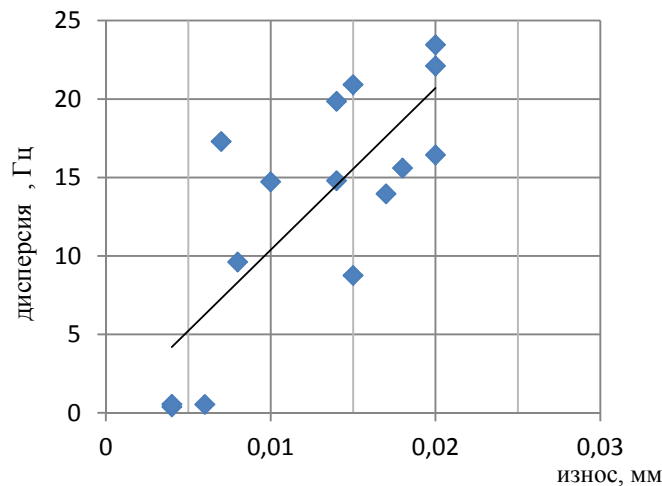


Рис. 3. Зависимость дисперсии производной частоты вращения ВЗВ от величины текущего износа,  $r = 0,78$

Уравнение линейной аппроксимации имеет вид  $y = 1031x + 0,063$ .

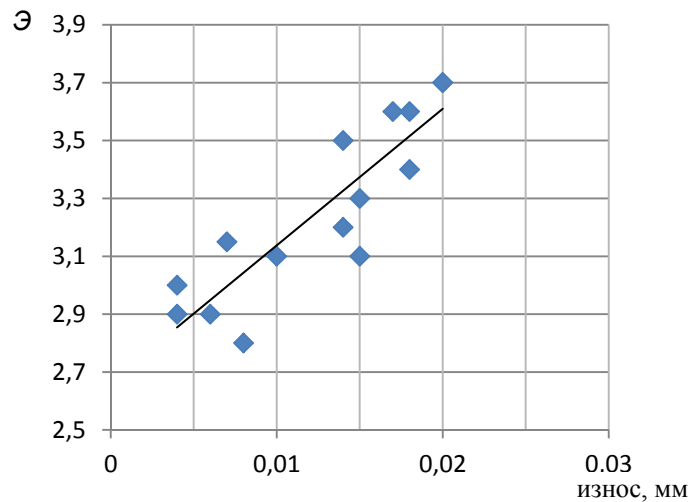


Рис. 4. Зависимость эксцесса (Э) плотности распределения частоты вращения ВЗВ от величины текущего износа,  $r = 0,88$

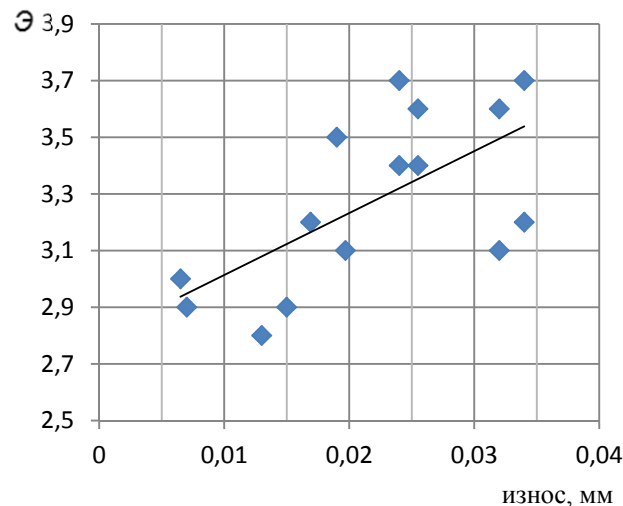


Рис. 5. Зависимость эксцесса (Э) плотности распределения частоты вращения ВЗВ от величины текущего суммарного износа,  $r = 0,65$

Уравнения линейной аппроксимации соответственно имеют вид:

- текущий износ:  $y = 47,24x + 2,664$ ;
- текущий суммарный износ:  $y = 21,86x + 2,795$ .

Аналогичные результаты можно получить из анализа вибрационного процесса на частоте вращения выходного вала редуктора.

Таким образом, выполненный анализ позволил предложить математические модели ширины спектральной составляющей сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора и соответствующей спектральной составляющей его вибрации для отремонтированных и вновь изготовленных редукторов, а также редукторов с износом боковых поверхностей их зубьев. Полученные результаты показывают возможность использования сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора в оценке его технического состояния. В этом случае нет необходимости использовать сложную дорогостоящую

виброизмерительную аппаратуру и загружать регламентные работы постановкой вибропреобразователя на двигатель и регистрацией широкополосного вибрационного процесса. Для выполнения оценки технического состояния редуктора достаточно подключиться к штепсельному разъему (имеется на борту) с сигналом «штатного» тахометрического датчика и в процессе наземных испытаний при регламентных работах зарегистрировать требуемый процесс.

### **Заключение**

Выполненный анализ позволил предложить модели ширины спектральной составляющей сигнала «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора и соответствующей спектральной составляющей его вибрации для отремонтированных и вновь изготовленных редукторов ГТД и редукторов с износом боковых поверхностей зубьев.

Разработанные модели дают основание рекомендовать ряд диагностических признаков износа зубьев редукторов ГТД на основе анализа сигналов «штатного» тахометрического датчика частоты вращения выходного вала редуктора.

Полученные результаты позволяют проводить контроль технического состояния редукторов авиационных ГТД в процессе их эксплуатации при выполнении регламентных работ на основе анализа «штатных» сигналов ГТД.

### **Библиографический список**

1. Кравченко И.Ф., Единолич А.В., Яковлев В.А., Дорофеев В.П. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 8 (55). С. 129-134.
2. Курушин М.И., Балякин В.Б., Осиала В.Б. Исследование крутильных колебаний ротора турбовинтового двигателя с дифференциальным редуктором // *Динамика и виброакустика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 27-42. DOI: 10.18287/2409-4579-2018-4-2-27-42
3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
4. 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
5. 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.
6. Шевяков А.А. *Автоматика авиационных и ракетных силовых установок*. М.: Машиностроение, 1970. 660 с.
7. Абрамов Б.М. Исследование устойчивости периодических колебаний // *Известия вузов*. 1963. № 5. С. 5-12.
8. Шевелёва Г.И. *Теория формообразования и контакта движущихся тел*. М.: Станкин, 1999. 494 с.
9. 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



10. Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. Модель ширины спектральной составляющей зубцовой гармоника редуктора турбовинтового двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 135-144. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-135-144

11. 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

12. 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.

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

## MODELLING WIDTH OF THE SPECTRAL COMPONENT OF A GAS-TURBINE ENGINE GEARBOX OUTPUT SHAFT SPEED

© 2024

**A. E. Sundukov** Candidate of Science (Engineering), Engineering Director;  
PKF TSK, LLC, Samara, Russian Federation;  
[sundukov@mail.ru](mailto:sundukov@mail.ru)

**E. 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](mailto:shakhm@ssau.ru)

Gearbox is the most stressed component in an aircraft gas-turbine engine. This implies the need for finding ways to monitor its technical condition. Practice shows that the most efficient method is vibration-based diagnostics. However, this method requires the use of sophisticated measurement systems and highly skilled personnel. This paper shows that errors of gear coupling manufacture and assembly, characteristics of machine operating mode, design factors, frequency modulation of the carrier of the engine rotor speed in the stationary mode of its operation, and wear of teeth flanks determine the width of the spectral component of the gearbox output shaft speed. Using the results obtained from the developed model of the width of gear tooth spectral component, ratios for width of the spectral component of the signal of the “standard” tachometric speed sensor of the gearbox output shaft speed and the corresponding spectral component of its vibration were obtained. Models for repaired and newly manufactured gearboxes and gearboxes with tooth flank wear were proposed. This allowed the development of a number of new diagnostic indicators of a defect. Several examples of the use of these new diagnostic indicators are given for the gearbox of one of turbo-prop engines. The results obtained provide an opportunity to assess the gearbox technical condition in operation.

*Gas-turbine engine; gearbox; wear of tooth flanks; gearbox output shaft; spectral component width models*

---

*Citation:* Sundukov A.E., Shakhmatov E.V. Modelling width of the spectral component of a gas-turbine engine gearbox output shaft speed. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 157-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-157-166

### References

1. Kravchenko I.F., Edinovich A.V., Yakovlev V.A., Dorofeev V.P. Experimental and theoretical results of the research of aircraft gears. *Aerospace Technic and Technology*. 2008. No. 8 (55). P. 129-134. (In Russ.)

2. Kurushin M.I., Balyakin V.B., Ossiala V. Investigation of the torsional vibrations of a rotor turbine engine with a differential reduction gearbox. *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*. 2018. V. 4, no. 2. P. 27-42. (In Russ.). DOI: 10.18287/2409-4579-2018-4-2-27-42

3. Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 288 p.

4. 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

5. 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.)

6. Shevyakov A.A. *Avtomatika aviatsionnykh i raketnykh silovykh ustanovok* [Automation of aircraft and rocket power plants]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 660 p.

7. Abramov B.M. Research of the stability of periodic vibrations. *Izvestiya Vuzov*. 1963. No. 5. P. 5-12. (In Russ.)

8. Sheveleva G.I. *Teoriya formoobrazovaniya i kontakta dvizhushchikhsya tel* [Theory of shaping and contact of moving bodies]. Moscow: Stankin Publ., 1999. 494 p.

9. 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

10. Sundukov A.E., Shakhmatov E.V. Model of the turboprop engine reduction gear tooth harmonic spectral component. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 135-144. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-135-144

11. 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

12. 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.)

13. 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.