

КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ИЗНОСА ЗУБЬЕВ РЕДУКТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2022

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

Основным и наиболее опасным дефектом редукторов авиационных газотурбинных двигателей является износ боковых поверхностей зубьев. Дефект генерирует вибрации, приводящие к усталостным поломкам элементов конструкции двигателя. Наиболее эффективным способом неразрушающего контроля технического состояния роторных машин является вибродиагностика. Представленный в статье обзор известных диагностических признаков рассматриваемого дефекта показывает необходимость его существенного расширения. Выполненные ранее исследования позволили предложить комплекс диагностических признаков износа зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты» дифференциального редуктора газотурбинного двигателя. Показано, что математические модели зависимостей уровней диагностических признаков от величины износа имеют как линейный, так и степенной вид. Наиболее близки к модели развития износа диагностические признаки, описываемые степенными зависимостями. При выборе диагностических признаков для условий эксплуатации оптимальными следует признать те, что построены на параметрах текущей частоты.

Газотурбинный двигатель; дифференциальный редуктор; износ зубьев; вибродиагностика; диагностические признаки

Цитирование: Сундуков А.Е., Шахматов Е.В. Комплекс диагностических признаков износа зубьев редукторов авиационных газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 4. С. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-109-117

Введение

Редукторы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) предназначены для обеспечения оптимальных частот вращения воздушных винтов турбовинтовых двигателей и вентиляторов турбореактивных двухконтурных двигателей. Как правило, используются редукторы планетарного типа. Сложность конструкции, большие передаваемые нагрузки, широкий диапазон рабочих режимов делают их одними из самых напряжённых узлов ГТД. Обеспечение надёжной эксплуатации таких устройств требует наличия методов и средств объективной оценки их технического состояния. Общеизвестно, что наиболее эффективным методом неразрушающего контроля технического состояния роторных машин является вибродиагностика [1; 2]. Одним из наиболее распространённых дефектов редукторов ГТД является износ боковой поверхности их зубьев. Опасность такого износа заключается в генерации колебаний, вызывающих усталостные поломки элементов конструкции двигателя [3; 4]. Перечень диагностических признаков данного дефекта не так обширен. Наиболее распространённой является интенсивность n -мерного вектора от кратных зубцовых гармоник [1]. Для редукторов авиационных ГТД интенсивность гармоник часто соизмерима с вибрационным шумом, относительно высокие частоты первых зубцовых гармоник ведут к необходимости вы-

полнения измерений в диапазоне частот до 20...30 кГц. Существуют методы использования неравномерности вращения ведомого вала зубчатой передачи [5]. Для реализации метода требуется установка датчика углового положения. В работе [6] предложен диагностический признак по оценке девиации первой производной угловой скорости пересопряжения зубьев на времени одного периода роторной частоты. Авторы работы [7] предлагают оценивать изменение кинематической погрешности при использовании высокоточных датчиков углового положения ведомого и ведущего зубчатых колёс. Реализация такого подхода ограничивает область его использования на исследовательских установках. В работе [8] предложено диагностировать износ с использованием нескольких сложных признаков спектральных и статистических характеристик огибающей узкополосного процесса. Рекомендуется узкополосный процесс выбирать на резонансной частоте узла, которая должна совпадать с зубцовой гармоникой или быть кратной ей. Указанные условия часто трудновыполнимы. Метод сложен в обработке и требует использования специально созданной программы обработки и анализа.

Результаты и обсуждение

С использованием известных и вновь разработанных методов была выполнена серия работ [9 – 12], позволивших предложить комплекс диагностических признаков износа боковых поверхностей зубьев, которые представлены в табл. 1 – 4. При исследовании рассматривались четыре варианта износа:

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

Анализ показывает, что при уровне значимости 0,05 и используемом объёме статистики значимыми следует считать зависимости исследуемых диагностических признаков от величины износа при коэффициенте корреляции $r \geq 0,65$. Далее везде представлены данные, удовлетворяющие этому условию. В подавляющем числе случаев анализировались процессы, полученные вибропреобразователем, установленным в вертикальном направлении (ось Y) на стыке картеров турбокомпрессора (ТК – входной вал редуктора) и редуктора, а также сигналов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения ТК и ВЗВ (вал заднего винта – выходной вал редуктора). Режим работы двигателя максимальный.

Таблица 1. Диагностические признаки по данным автоспектра и спектра максимумов широкополосной вибрации

№ п/п	Диагностический признак	Номер износа	Уравнение аппроксимации	r
1	Интенсивность в автоспектре n -мерного вектора по 12-ти составляющим от гармоники $3f_p^*$	2	$y = 3260x - 22,64$	0,67
2	Интенсивность в спектре максимумов n -мерного вектора по 12-ти составляющим от гармоники $3f_p^*$	2	$y = 2117x - 19,28$	0,78
3	Интенсивность в спектре максимумов n -мерного вектора на режиме $0,7Ne$ от $3f_p^*$ по 12-ти составляющим	2	$y = 894,4x - 7,45$	0,80
4	Интенсивность в автоспектре n -мерного вектора на режиме $0,7Ne$ от $\sum(3f_p + 3f_p^*)$ по 12-ти составляющим	2	$y = 5377x - 41,93$	0,81
5	Интенсивность n -мерного вектора на режиме $0,7Ne$ в спектре максимумов от $\sum(3f_p + 3f_p^*)$ по 12-ти составляющим	2	$y = 2324x - 16,05$	0,75
6	Интенсивность составляющей $f_{изн}$ в автоспектре на режиме $0,85Ne$	2	$y = 660,6x - 4,45$	0,68
7	Интенсивность составляющей $f_{изн}$ в спектре максимумов на режиме $0,85Ne$	2	$y = 312,2x - 1,96$	0,71
8	Интенсивность n -мерного вектора от $f_{изн}$ в автоспектре на режиме $0,85Ne$ по 5-ти составляющим	2	$y = 565,7x - 2,85$	0,72
9	Интенсивность n -мерного вектора от $f_{изн}$ в спектре максимумов на режиме $0,85Ne$ по 5-ти составляющим	2	$y = 282,8x - 1,23$	0,78
10	Интенсивность n -мерного вектора от f_{z1} в автоспектре по трём составляющим	2	$y = 1098x - 11,1$	0,73
11	Интенсивность составляющей f_p в спектре, от спектра максимальное значение по всем регистрируемым режимам, начиная с $0,4Ne$	2	$y = 17,33x - 0,158$	0,75
12	Интенсивность в автоспектре n -мерного вектора от составляющей $16,41 f_p/3$ по 6-ти составляющим	2	$y = 1615x - 14,85$	0,83
13	Интенсивность в спектре максимумов n -мерного вектора от составляющей $16,41 f_p/3$ по 6-ти составляющим	2	$y = 642,9x - 5,04$	0,84
14	Интенсивность n -мерного вектора по пяти составляющим от гармоники $32,82 f_p/3$	3	$y = 368,3x - 3,10$	0,71
15	Интенсивность в автоспектре n -мерный вектор по 6-ти составляющим от гармоники $21,88 f_p$	2	$y = 837,3x - 7,45$	0,67
16	Интенсивность в спектре максимумов n -мерный вектор по 6-ти составляющим от гармоники $21,88 f_p$	2	$y = 368,3x - 3,10$	0,71

Здесь f_p^* – частота вращения ротора в приведённом движении; f_p – частота вращения ротора в абсолютном движении; $f_{изн}$ – частота составляющей, вызывающая усталостные поломки элементов конструкции двигателя; f_{z1} – зубцовая составляющая пары «солнечная шестерня – сателлиты»; Ne – номинальный режим работы двигателя.

Таблица 2. Диагностические признаки на основе глубины амплитудных модуляций

№ п/п	Диагностический признак	Номер износа	Уравнение аппроксимации	r
1	Глубина амплитудной модуляции на частоте 15,8 Гц в полосе $3f_p^* \pm 100$ Гц	2	$y = 2,516x + 0,065$	0,73
2	Глубина амплитудной модуляции на частоте $f_{ВГ}$ в полосе $f_{z1}/6 \pm 15\%$	2	$y = 834,5x^2 + 19,60x + 0,21$	0,71
3	Глубина амплитудной модуляции на частоте $3f_{ВГ}$ в полосе $f_{z1}/6 \pm 15\%$	2	$y = 1482x^2 - 32,30x + 0,25$	0,70
4	Интенсивность n -мерного вектора по 5-ти составляющим от $f_{ВГ}$ в полосе $f_{z1} \pm 100$ Гц	4	$y = 816,2x - 15,76$	0,74
5	Интенсивность n -мерного вектора по 7-ми составляющим от $f_{ВГ}$ в полосе $f_{z1} \pm 15\%$	1	$y = 636,2x - 1,086$	0,72
6	Интенсивность n -мерного вектора по 7-ми составляющим от $f_{ВГ}$ в полосе $f_{z1} \pm 15\%$	2	$y = 1132x - 10,81$	0,69
7	Интенсивность n -мерного вектора по 7-ми составляющим от $f_{ВГ}$ в полосе $f_{z1} \pm 15\%$	4	$y = 677,7x - 11,98$	0,72

Здесь АМ – амплитудная модуляция; 15,8 Гц – половинная составляющая от частоты совпадения зубьев (ЧСЗ) зубцовой составляющей; $f_{ВГ}$ – винтовая гармоника.

Таблица 3. Диагностические признаки на основе параметров девиации частоты узкополосного процесса

№ п/п	Диагностический признак	Номер износа	Уравнение аппроксимации	r
1	Индекс ЧМ на частоте f_p в полосе $f_{z1} \pm 15\%$	4	$y = 2056x^2 - 78,23x + 0,966$	0,73
2	Индекс ЧМ на частоте $3f_p$ в полосе $3f_{изн} \pm 15\%$	3	$y = 2,445x + 0,067$	0,68
3	Ширина P_1 составляющей f_{z1}	4	$y = 42139x^2 - 1614x + 28,84$	0,70
4	Разность $P_2 - P_1$	1	$y = 3898x^2 - 36,62x + 1,488$	0,71
5	Разность $P_3 - P_1$	4	$y = 21604x^2 - 826,7x + 14,36$	0,84
6	Разность $P_3 - P_2$	4	$y = 26748x^2 - 1034x + 14,53$	0,81
7	Дисперсия текущей частоты узкополосного процесса в полосе $f_{z1} \pm 10$ Гц	4	$y = 17117x^2 - 644,5x + 14,44$	0,77
8	Ширина P_3 составляющей f_{z1}	1	$y = 624,2x + 5,784$	0,80
9	Ширина P_3 составляющей f_{z1}	3	$y = 400,9x + 4,453$	0,86

Здесь P_1 – ширина зубцовой спектральной составляющей на уровне 0,5 от максимального значения; P_2 – ширина зубцовой спектральной составляющей на уровне $1/e$ от максимального значения; P_3 – максимальная ширина зубцовой спектральной составляющей в её нижней части, определяемая справа и слева по точкам пересечения её огибающей с вибрационным фоном; ЧМ – частотная модуляция.

Таблица 4. Диагностические признаки на основе параметров текущей частоты процессов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора

№ п/п	Диагностический признак	Номер износа	Уравнение аппроксимации	r
1	Дисперсия текущего значения частоты вращения вала заднего винта	1	$y = 1,048x + 0,001$	0,75
2	Дисперсия текущего значения частоты вращения вала заднего винта	2	$y = 1,599x - 0,011$	0,73
3	Дисперсия текущего значения частоты вращения вала заднего винта	3	$y = 0,601x + 0,001$	0,71
4	Дисперсия от производной текущего значения частоты вращения ВЗВ	1	$y = 1031x + 0,063$	0,78
5	Экссесс плотности распределения текущего значения частоты вращения ВЗВ	1	$y = 47,24x + 2,664$	0,88
6	Экссесс плотности распределения текущего значения частоты вращения ВЗВ	3	$y = 21,86x + 2,795$	0,65
7	Разница дисперсий текущих частот вращения ВЗВ и ТК	2	$y = 1,596x - 0,012$	0,73

Диагностические признаки на основе интенсивностей вибрации (табл. 1):

- все полученные диагностические признаки имеют линейную зависимость от величины износа;
- за исключением одного случая, 15 диагностических признаков имеют значимые величины коэффициента корреляции для износа 2 и один для износа 3;
- как правило, диагностические признаки, полученные с использованием спектра максимумов, имеют более высокий коэффициент корреляции по сравнению с обычным автоспектром;
- коэффициенты корреляции для интенсивности отдельных гармоник обычно ниже, чем для интенсивности n -мерных векторов.

Диагностические признаки на основе параметров амплитудных модуляций (табл. 2):

- из семи диагностических признаков два описываются квадратичными зависимостями от величины износа, остальные линейными;
- наибольшие значения коэффициента корреляции выявлены: 1 – для износа 1; 4 – для износа 2; 2 – для износа 4;
- в качестве модулирующих составляющих выступают: гармоника 0,5 от ЧСЗ, первая и третья винтовые гармоники;
- из семи диагностических признаков в качестве модулируемой составляющей в четырёх случаях выступает зубцовая гармоника, в остальных случаях – её субгармоники.

Диагностические признаки на основе параметров девиации частоты узкополосного процесса (табл. 3):

- из девяти диагностических признаков три описываются линейными зависимостями, остальные квадратичными;
- из девяти диагностических признаков два определяются параметрами частотной модуляции (ЧМ), где в качестве модулирующей составляющей выступает первая и третья роторные гармоники, в одном случае модулированной является зубцовая гармоника, в другом – $3 f_{\text{изн}}$, шесть – ширина зубцовой спектральной составляющей на разных уровнях относительно максимального значения и их комбинации, один – дисперсия девиации частоты зубцовой гармоники;

– наибольшие значения коэффициента корреляции выявлены: 1 – для износа 1, 2 – для износа 3 и 4 – для износа 4.

Диагностические признаки на основе сигналов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора (табл. 4):

– все семь диагностических признаков описываются линейными зависимостями;
– дисперсия девиации частоты выходного вала редуктора имеет значимые коэффициенты корреляции для первых трёх видов износа (износы 1, 2, 3), дисперсия от производной процесса – 1, эксцесс плотности распределения текущей частоты (износ 1 и 3), разница дисперсий девиации частот вращения входного и выходного валов редуктора – износ 2.

Таким образом, из 39 диагностических признаков 21 имеют максимальный коэффициент корреляции для износа 2.

Полученные результаты исследований износа зубьев редукторов авиационных газотурбинных двигателей дают основание сделать ряд утверждений:

– диагностические признаки на базе интенсивностей вибрации наиболее чувствительны к износу зубьев солнечной шестерни относительно исходной эвольвентограммы, как и большая половина представленных диагностических признаков, полученных на базе параметров амплитудных модуляций;

– больше половины диагностических признаков, построенных на параметрах девиации частоты зубцовой гармоник, наиболее чувствительны к сумме наибольших износов солнечной шестерни и сателлитов относительно их исходных эвольвентограмм;

– диагностические признаки, полученные по девиации частоты сигналов «штатных» тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора, практически в равной степени чувствительны к первым трём видам износа.

Следует отметить, что без учёта области приработки характер изменения износа с наработкой имеет две зоны [13]: зона 1-я – практически линейного роста величины износа и 2-я – экспоненциального. Эффективные диагностические признаки должны иметь близкую математическую модель. Тогда предпочтение следует отдать диагностическим признакам, имеющим квадратичную зависимость от величины износа. Обычно при разработке методик диагностики дефектов ГТД набор экспериментального материала производится в условиях испытательного стенда завода-изготовителя. Перестановка двигателя со стенда на объект приводит к росту интенсивностей вибрационных составляющих [14]. В этом случае для исключения необходимости оценки коэффициентов пересчёта интенсивности соответствующих диагностических признаков целесообразно использовать признаки, построенные на характеристиках частоты (табл. 3, 4).

Заключение

Выполненные исследования позволили предложить комплекс диагностических признаков на базе анализа интенсивностей вибрации, параметров амплитудной и частотной модуляций, характеристик текущего значения частоты, выявленные, в том числе, по сигналам «штатных» тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного валов редуктора. Наиболее информативными являются диагностические признаки, математическая модель которых описывается степенными зависимостями. При оценке технического состояния редуктора в условиях эксплуатации на объекте целесообразно использовать диагностические признаки, построенные на параметрах текущего значения частоты.

Работа выполнена в соответствии с планом реализации Программы развития Самарского университета на 2021-2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика / под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2005. 828 с.
2. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
3. 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.
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. Андриенко Л.А., Вязников В.А. Диагностика изнашивания червячных передач // Сб. тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники» (27-28 апреля 2010 г., Санкт-Петербург). СПб: Балтийский государственный технический университет, 2010. С. 228-231.
6. Журавлев В.Н., Папченков А.Б., Единович А.В., Корнейчук А.В. Виброкинематометрия зубчатых передач // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Проблемы механического привода. 2015. № 35 (1144). С. 56-60.
7. Антипенко Г.Л., Судакова В.А., Шамбалова М.В. Выбор кинематической погрешности в качестве диагностического параметра для оценки состояния зубчатых передач в эксплуатации // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. № 2 (55). С. 16-24. DOI: 10.53078/20778481_2017_2_16
8. Жулай В.А. Виброакустические методы прогнозирования работоспособности механических передач строительных и дорожных машин. Дис. ... д-ра. техн. наук. Воронеж, 2005. 406 с.
9. Крючков А.Н., Плотников С.М., Сундуков Е.В., Сундуков А.Е. Имитационная модель колебаний пары «солнечная шестерня – сателлиты» планетарного редуктора турбовинтового двигателя при наличии дефектов боковых поверхностей зубьев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 87-95. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-87-95
10. 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, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 16-26. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-16-26
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. Исследование характеристик составляющей вибрации редуктора газотурбинного двигателя, вызывающей усталостные поломки элементов его конструкции при износе боковых поверхностей зубьев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 4. С. 70-79. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-70-79

13. ГОСТ 30479-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. 12 с.

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.

SERIES OF DIAGNOSTIC INDICATORS OF GEARBOX TEETH WEAR IN AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES

© 2022

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

Aircraft gas turbine engine gearboxes are intended for providing optimum rotational speeds for propellers and fans. Wear of the tooth flanks is their key and most dangerous defect. The defect generates vibrations leading to fatigue failure of engine components. Vibration-based diagnostics is the most effective tool of non-destructive testing of the technical condition of rotating machines. This review of the known diagnostic indicators of the defect in question shows the need for its significant expansion. Previously performed researches made it possible to suggest a series of diagnostic indicators of tooth wear for the “sun gear – satellites” couple in the differential reducer of a gas turbine engine. It is shown that the mathematical models of the dependence of the levels of diagnostic indicators on the wear value have both linear and power form. It was found that diagnostic indicators described by power dependences are the closest ones to the model of wear development. It is noted that when selecting diagnostic indicators for operating conditions, the optimal ones should be recognized as those based on the parameters of the current frequency.

Gas turbine engine; differential gearbox; tooth wear; vibration-based diagnostics; diagnostic indicators

Citation: Sundukov A.Ye., Shakhmatov Ye.V. Series of diagnostic indicators of gearbox teeth wear in aircraft gas turbine engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 4. P. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-109-117

References

1. *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.
2. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knoxville, TN 37923, USA.

3. 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.)
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. Andrienko L.A., Vyaznikov V.A. Diagnostika iznashivaniya chervyachnykh peredach. *Sb. tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye Zadachi Mashinovedeniya, Detaley Mashin i Tribotekhniki» (April, 27-28. 2010, Saint Petersburg)*. SPb: Baltic State Technical University Publ., 2010. P. 228-231. (In Russ.)
6. Zhuravlev V.N., Papchenkov A.B., Edinovich A.V., Korneichuk A.V. Vibration motion measurement of gears. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series of Mechanical Drive Problems*. 2015. No. 35 (1144). P. 56-60. (In Russ.)
7. Antipenko G.L., Sudakova V.A., Shambalova M.V. Kinematic error as a diagnostic parameter for assessing gearing condition in use. *The Belarusian-Russian University Herald*. 2017. No. 2 (55). P. 16-24. (In Russ.). DOI: 10.53078/20778481_2017_2_16
8. Zhulay V.A. *Vibroakusticheskie metody prognozirovaniya rabotosposobnosti mekhanicheskikh peredach stroitel'nykh i dorozhnykh mashin. Diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Vibroacoustic methods of predicting serviceability of mechanical gearboxes in construction and road machines. Thesis for a Doctor's degree in Engineering]. Voronezh, 2005. 406 p.
9. Kryuchkov A.N., Plotnikov S.M., Sundukov E.V., Sundukov A.E. Simulation model of oscillations of the «sun gear – satellites» pair of turboprop engine planetary reduction gearbox in the presence of defects of tooth flanks. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 87-95. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-87-95
10. 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
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. Investigation of the characteristics of the component of vibration of gas turbine engine gearbox that causes fatigue failures of its structural elements in case of tooth flank wear. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 4. P. 70-79. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-70-79
13. GOST 30479-97 Products wear resistance assurance. Methods of assessment of limiting wear. Principles of provision. General requirements. Moscow: IPK Izdatel'stvo Standartov Publ., 1998. 12 p. (In Russ.)
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.)