

Анализ возможностей методов вибродиагностики для контроля технического состояния основных деталей трансмиссий вертолетов

Калинин Д.В., Земсков А.А., Куц М.С.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: dvkalinin@ciam.ru

Статья посвящена системам вибродиагностики трансмиссий вертолетов как важнейшему элементу обеспечения безопасности полетов и повышения надежности винтокрылых аппаратов. Повышать эффективность таких систем можно как развивая методы анализа и обработки сигналов, повышая точность измерительной аппаратуры, так и развивая динамические модели, позволяющие установить физическую взаимосвязь между дефектом в детали трансмиссии и изменением динамического отклика системы. В статье представлен обзор перспективных методов анализа вибраций в частотной и временной области, возникающих в процессе работы трансмиссий. Также описаны подходы на основе нейронных сетей, которые позволяют прогнозировать состояние по совокупности диагностических признаков, полученных путем обработки вибросигналов. Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования, посвященного формированию диагностического признака усталостного разрушения зубьев колес.

Ключевые слова: вертолет, трансмиссия, редуктор, зубчатое колесо, вибрации, диагностика, анализ вибраций, динамическая модель, прогнозирование, искусственная нейронная сеть

Analysis of vibration-based diagnostic methods for health monitoring of key components in helicopter transmissions

Kalinin D.V., Zemskov A.A., Kuts M.S.

CIAM, Moscow

The paper is dedicated to vibration diagnostics systems of helicopter transmissions which are an essential element of flight safety and increased reliability of rotorcraft. It is possible to improve the efficiency of such systems by developing methods for signal analysis and processing, improving measuring equipment's accuracy, and by developing dynamic models that allow to establish a physical relationship between a transmission part's defect and a change of the system's dynamic response. The paper presents an overview of advanced methods for analyzing vibrations in frequency and time domains that occur during transmission operation. Approaches based on artificial neural networks are also described, which allow to predict the condition based on a set of diagnostic signs obtained by processing vibration signals. Results of a computational and experimental study dedicated to formation of a diagnostic sign of fatigue failure in gears teeth are presented.

Keywords: helicopter, transmission, gearbox, gear, vibrations, diagnostics, vibration analysis, dynamic model, forecasting, artificial neural network

Введение

Системы и методы диагностики технического состояния трансмиссий и турбовальных двигателей в составе вертолетов призваны решить два типа задач в обеспечении безопасности полетов и эксплуатации авиационной техники. Задачи первого типа напрямую связаны с диаг-

нозированием предотказного состояния деталей трансмиссии для своевременного прекращения полета и эксплуатации вертолета с целью предотвращения катастрофической ситуации. К катастрофе может привести разрушение или отказ определенных деталей, которые относятся к классу основных: зубчатых колес, валов и некоторых корпусных деталей. То есть средства диагностики

предотказного состояния трансмиссий необходимо выбирать с привязкой к отслеживанию технического состояния конкретных деталей. Однако более корректным является выделение конкретных видов отказа деталей с анализом возможностей их диагностирования существующими аппаратными средствами. Например, для зубчатых передач при проектировании вводят требования к предельным значениям коэффициентов запаса по изгибной и контактной выносливости как наиболее вероятным причинам их разрушения. При этом контактное выкрашивание развивается в течение длительного времени эксплуатации и эффективно обнаруживается с помощью сигнализаторов стружки и датчика температуры масла. В то же время усталостное разрушение зуба в случае его недостаточной изгибной прочности развивается в течение десятков минут и может быть теоретически обнаружено только методами вибродиагностики по косвенным признакам, однако в настоящий момент такие диагностические признаки либо не найдены, либо не получили должного подтверждения.

Задачи второго типа связаны с эксплуатацией вертолетной техники по техническому состоянию, когда для объектов, эксплуатируемых при различных полетных циклах и режимах нагружения, устанавливают разный ресурс вместо общего для всего парка вертолетов. В соответствии с требованиями нормативной документации переход к эксплуатации по техническому состоянию возможен при внедренной системе диагностики основных, наиболее критичных отказов деталей трансмиссий. Кроме того, в рекомендательный циркуляр АМС 29.1465 к европейским нормам летной годности CS-29 [1] включены методики подтверждения соответствия требованиям CS-29 по вибромониторингу (VHM, vibration health monitoring), согласно которым должна быть подтверждена эффективность заявленных индикаторов состояния агрегатов и их деталей.

Оценить эффективность систем диагностики, основанных на виброметрировании корпусных деталей редукторов, сложно ввиду почти полного отсутствия экспериментально подтвержденных диагностических признаков с привязкой к конкретным видам дефектов деталей трансмиссий. Современная концепция развития средств диагностики вертолетных трансмиссий основана на накоплении информации о результатах виброметрирования конкретных образцов трансмиссий с последующей обработкой и отслеживанием трендов изменений. Альтернативным подходом к повышению эффективности средств вибродиагностики является развитие сложных математических моделей для оценки динамического отклика системы с введением артефактов, имитирующих дефекты деталей.

Методики обработки сигналов вибраций

В процессе работы вертолетных трансмиссий возникают механические колебания, обусловленные неравномерностью вращения валов. Причинами этой неравномерности являются дискретный характер зацепления в зубчатых передачах, муфтах и шлицевых соединениях, перекачивание тел качения подшипников и несбалансированные нагрузки, действующие на валы. Погрешности изготовления и сборки, а также дефекты, возникающие в процессе работы трансмиссий, способствуют увеличению возникающих вибраций. Те же явления наблюдаются и в авиационных двигателях, в связи с чем существуют требования к контролю их уровней вибраций [2]. Однако ввиду сложной кинематики, обусловленной большим количеством валов и зубчатых пар, единых норм уровней вибраций для вертолетных редукторов не существует. Поэтому нормирование вибрационных уровней для каждой конкретной конструкции осуществляется в индивидуальном порядке, для конкретных узлов или деталей, и в общем случае невозможно по причине невероятной трудоемкости.

Существующие методы анализа колебаний можно разделить на две категории: анализ в частотной области и анализ во временной области [3]. Данные методы позволяют выделить из вибросигнала наиболее информативные параметры, позволяющие охарактеризовать состояние трансмиссии в сжатом виде и в то же время идентифицировать источник колебаний.

Идентификация аварийных и предаварийных режимов, по сути, представляет собой задачу классификации в рамках предварительно кластеризованных статистических данных о возможных режимах работы. В решении задач классификации и кластеризации широкое применение нашли искусственные нейронные сети. Однако зачастую приходится работать с сигналами, полученными в штатных режимах, или с крайне ограниченным количеством аварийных записей. Последние исследования [4] показали, что такого рода задачи также могут быть успешно решены путем использования искусственных нейронных сетей.

Анализ в частотной области основан на переводе сигнала $f(t)$ из временной в частотную область при помощи преобразования Фурье, в результате чего получается его спектральное отображение $\hat{f}(\omega)$, или спектр сигнала. Спектральное представление позволяет разделить гармоники вынужденных колебаний, источником которых являются разные детали, на основании опорной частоты, определяемой их частотой вращения [5]. Частота вращения каждой детали (ω_i) пропорциональна частоте вращения входного вала ($\omega_{вх}$), который приводится в движение двигателем:

$$\omega_i = k_i \omega_{вх},$$

где k_i – передаточное число рассматриваемой детали относительно входного вала, определяемое из кинематической схемы.

Для определения фактической частоты вращения в процессе полета необходимо осуществлять регистрацию частоты вращения одного из валов редуктора. Однако, поскольку характер вынужденного воздействия отличается от чистого гармонического возбуждения, а также ввиду взаимного воздействия различных элементов трансмиссии, в сигнале наблюдаются кратные гармоники и комбинации нескольких гармоник.

Совокупность амплитуд колебаний на опорных частотах деталей и их комбинаций формирует набор параметров, на основании которого ведется оценка текущего состояния трансмиссии. На данный момент оценку состояния осуществляют лишь по отдельным параметрам, путем нормирования их предельных значений. Построение более достоверных диагностических признаков требует учета совокупности параметров, что делает перспективным сочетание данных методов с искусственными нейронными сетями.

Анализ во временной области. Основной проблемой при использовании спектрального анализа является нестационарность сигнала, которая возникает в результате изменений частоты вращения двигателя. Для корректной работы методов анализа в частотной области предварительно из всего вибросигнала выбирают наиболее стационарный участок, на котором изменения частоты вращения не превышали бы допустимой нормы. Остальная же часть сигнала остается непригодной. Это существенный недостаток, поскольку некоторые дефекты проявляются только на предпредельных режимах, которым свойственны большие флуктуации частоты вращения двигателя. Альтернативным подходом является использование методов анализа во временной области, оперирующих непосредственно временной реализацией вибросигналов. Зачастую данные методы гораздо более требовательны к вычислительным ресурсам, поэтому существенное развитие большинство из них получили лишь в относительно недавнее время с развитием компьютеров и вычислительных методов.

Одним из методов, применяемых для обработки нестационарных сигналов, является *разложение по эмпирическим модам* (EMD, empirical mode decomposition), основанное на преобразовании Гильберта – Хуана [6]. Данный метод применяют для обнаружения неисправностей зубчатых передач и подшипников, а также диагностики газотурбинных установок.

Метод заключается в разложении сигнала на эмпирические моды, представляемые модовыми функциями.

Модовые функции должны обладать следующими свойствами:

- количество нулей функции и ее производной должно отличаться не более чем на единицу;

- среднее значение верхней и нижнейгибающих должно равняться нулю на всей области определения.

После того как сигнал разложен на составляющие моды, к ним применяют преобразование Гильберта, из которого получают мгновенные амплитуду и частоту каждой из мод.

Недостатком данного метода является сложность идентификации источников полученных мод, ввиду эмпирического характера разложения. Также данный метод довольно чувствителен к шумам и требует предварительной обработки сигналов для очистки от зашумленности.

Другим методом, позволяющим разложить исходный сигнал на компоненты, является *метод «гусеница»* (SSA, singular spectrum analysis) [7–10], основанный на сингулярном разложении ганкелевой матрицы сигнала, в результате чего исходный сигнал раскладывается на адаптивные моды с некротными частотами. Это позволяет оценивать частоты колебаний с большим разрешением, чем при фурье-анализе.

Истоки данного метода лежат в методе главных компонент и теореме Карунена – Лоэва. Для реализации метода SSA исходный сигнал необходимо свернуть в матрицу Ганкеля, представляющую собой матрицу временного запаздывания. Далее применить к этой матрице сингулярное разложение, в результате которого сформировать оптимальный базис автокорреляционных векторов. После этого осуществить группировку и процедуру обратную свертке – диагональное осреднение. В результате исходный сигнал разбивается на сингулярные моды, отсортированные в порядке убывания ковариации с исходным сигналом. Детали реализации и особенности метода подробно изложены в работах Н.Э. Голяндиной [7; 10].

В отличие от разложения по эмпирическим модам, метод «гусеница» более устойчив, а также менее ресурсоемок, поскольку основан на сингулярном разложении, для которого известны довольно эффективные методы нахождения. В то же время он довольно сложно поддается автоматизации, что существенно ограничивает область его применения экспертными системами.

Развитием метода «гусеница» можно считать *разложение по динамическим модам* (DMD, dynamic mode decomposition), хотя исторически они не связаны. Первоначально данный метод был предложен П. Шмидом в работах [11; 12] для решения задач газогидродинамики – для идентификации пространственно-временных структур в задачах большой размерности. Метод DMD основан на собственном ортогональном разложении

[13], основанном, в свою очередь, на сингулярном разложении. По этой причине метод хорошо масштабируется на системы большой размерности и обладает невысокой вычислительной сложностью. Он легко поддается распараллеливанию и потоковой обработке. Подробную информацию о данном методе можно найти в работах [13; 14].

В области машиностроения метод DMD применяют для мониторинга состояния элементов трансмиссий, анализа работы турбин и в робототехнике.

Основным достоинством данного метода является то, что с его помощью можно не только проанализировать полученный сигнал, но и построить экстраполяционную модель, позволяющую осуществлять прогнозирование.

Серьезным недостатком метода DMD является чувствительность к шуму. В связи с этим интерес представляет метод *стохастической идентификации подпространств* (SSI, stochastic subspace identification) [15], широко используемый в теории управления для идентификации параметров динамических систем. Этот метод нашел широкое применение в операционном модальном анализе [16], где с его помощью определяют собственные частоты и модальное демпфирование системы. Подробности реализации метода SSI представлены в работах [15; 17].

Использование искусственных нейронных сетей в задачах диагностики. Нейронные сети по своей сути являются универсальными аппроксиматорами, в которых аппроксимируемая функция представляется в виде суперпозиции множества функций активации одной переменной, вычисляемой как линейная комбинация входных параметров. Функция однослойной нейронной сети с M входных параметров может быть формально записана в виде

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^N \varphi_i \left(\alpha_{i0} + \sum_{j=1}^M \alpha_{ij} x_j \right),$$

где x_j – входные параметры; α_{ij} – весовые коэффициенты; φ_i – функции активации. При этом неотъемлемой частью применения нейронных сетей является задача обучения, в результате которого определяются весовые коэффициенты в модели. Для обучения используются выборки помеченных данных, для которых заранее известен результат вычисления значения функции; таким образом, обучение является не чем иным, как задачей оптимизации, в которой минимизируется невязка между исходной функцией и ее аппроксимацией.

Помимо аппроксимации, нейронные сети часто применяют для решения задач кластеризации, классификации и прогнозирования. Так, в области контроля и диагностики авиационной техники нейронные сети нашли применение в задачах определения характерных

состояний агрегатов и последующей идентификации текущего состояния агрегата в пространстве известных характерных состояний [18], информирования о появлении новых состояний и выявления связей между наблюдаемыми параметрами и характеристикой отдельных деталей [3].

Кроме того, искусственные нейронные сети используют для моделирования динамических систем и предсказания их поведения, для чего в архитектуру нейронной сети вводят обратную связь, позволяющую ей запоминать историю системы. Сети такой архитектуры носят название рекуррентных нейронных сетей [19]. Важным результатом в этой области является качественное подтверждение возможности предсказания переходов в состояние отличное от представленных в обучающей выборке [4].

Также применение нейронных сетей в существенной мере дополняет методы анализа во временной области, основанные на разложении по динамическим модам. Как нелинейный оператор нейронная сеть позволяет отыскать погружение нелинейных систем во внутренние линейные координаты, выступая в качестве собственных функций Купмана. Таким образом становится возможным применение известных методов идентификации линейной динамики к существенно нелинейным системам [13].

Типы диагностируемых дефектов деталей авиационных трансмиссий

Диагностика технического состояния трансмиссий выполняется с использованием четырех основных инструментов: измерение вибросостояния редукторов (В); сигнализаторы стружки в масле (М); измерение температуры масла и подшипников (Т); визуальный осмотр без разбора трансмиссии (О). В таблице приведены результаты анализа статистических данных о средствах обнаружения основных типов опасных разрушений деталей авиационных редукторов в соответствии с наиболее распространенными видами отказов [20]. Знаком «+» обозначена возможность выявления конкретного вида дефекта средствами диагностики, подтвержденная на практике; знаком «-» обозначено отсутствие возможности диагностирования, а знаком «?» – теоретическая возможность выявления дефекта, не подтвержденная ранее на практике.

Представленные данные свидетельствуют о том, что диагностика технического состояния трансмиссии вертолета средствами виброизмерения имеет наибольший потенциал в обнаружении почти всех видов опасных отказов основных ее деталей. Гипотеза о возможности выявить начало процесса развития указанных дефектов путем анализа информации об изменении

Таблица. Типы разрушений основных деталей авиационных трансмиссий

Характер разрушения	Причина	Способствующий фактор	Диагностика			
			В	М	Т	О
Разрушение вала						
Усталостное разрушение	Дисбаланс		+	–	–	–
	Несоосность	Разрушение муфты	+	–	–	–
		Разрушение подшипника	+	+	+	–
	Превышение ресурса		?	–	–	–
Статическое разрушение	Внутренняя перегрузка	Некачественная сборка	?	–	–	–
		Разрушение подшипника	+	+	+	–
	Внешняя перегрузка		?	–	–	+
Разрушение зубчатого колеса						
Усталостное разрушение	Превышение ресурса		?	–	–	?
	Технологический фактор	Фреттинг	+	–	–	–
Разрушение из-за резонансных колебаний	Конструкционный фактор		?	–	–	–
Поломка зуба						
Изгибная усталость	Превышение ресурса	Высокие динамические нагрузки	?	–	–	?
	Повреждение поверхности	Усталостное выкрашивание	–	+	–	–
		Утонение ножки	Чрезмерный износ	+	+	?
			Накопление разрушения	+	?	–
Контактное выкрашивание	Повреждение поверхности	Питтинг	?	?	–	–
		Заедание	+	+	?	–
		Попадание посторонних предметов	?	–	–	–
Статическое разрушение	Внутренняя перегрузка	Некачественная сборка	+	+	+	–
		Разрушение подшипника	?	–	–	+
	Внешняя перегрузка		+	?	–	–
Разрушения, вызванные перегревом						
Разрушения из-за отсутствия смазки	Некачественное масло		?	+	?	+
	Потеря масла	Повреждение маслосистемы	–	+	+	–
		Повреждение фильтра	–	+	–	–
		Засорение фильтра или форсунки	–	+	+	–
Разрушения из-за высокой температуры масла	Поломка системы охлаждения	Поломка вала привода вентилятора, подшипника или зубчатого колеса	?	–	+	+

составляющих сигналов вибраций редукторов основана на том, что развитие усталостных повреждений в зубьях колес и роторных деталях приводит к дополнительному возбуждению динамических нагрузок на опорах валов, которые передаются на корпусные детали трансмиссий. В столбце «В» (вибродиагностика) зеленым цветом выделены те типы дефектов, для которых существуют экспериментально подтвержденные и используемые на практике диагностические признаки. Эффективное диагностирование дефектов, выделенных красным цветом, требует разработки или подтверждения диагностического признака. К наиболее опасным видам дефектов авиационных трансмиссий из представленных в таблице

относятся усталостные разрушения зубчатых колес и валов, которые в настоящее время не могут быть надежно и эффективно диагностированы методами измерения и контроля вибраций. Виброизмерения на эксплуатируемой вертолетной технике не позволяют набрать необходимые статистические данные вследствие крайне низкой вероятности возникновения данных дефектов. В связи с этим наиболее эффективным представляется подход, основанный на прогнозировании изменений в динамическом отклике системы по результатам динамического моделирования работы трансмиссии с введенным дефектом и на последующем экспериментальном подтверждении.

Методика поиска диагностического признака

Для зубчатых колес как наиболее ответственных и высоконагруженных элементов трансмиссий вертолетов, наиболее вероятны два вида усталостного разрушения: контактное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев и усталостное разрушение с развитием трещины у ножки зуба [20]. Первый вид поломки эффективно диагностируется (см. таблицу) с помощью датчика температуры масла и благодаря срабатыванию сигнализаторов стружки на частицы металла зубьев. Данный дефект развивается в течение длительного времени и может привести к разрушению только после достаточного для его выявления времени эксплуатации [21]. Второй вид разрушения – развитие трещины многоциклового усталости у ножки зуба – в настоящее время не имеет эффективных и подтвержденных способов диагностики. Низкая вероятность возникновения данного дефекта как в эксплуатации, так и в ходе стендовых испытаний обуславливает отсутствие достаточного объема информации о времени его развития и сопутствующем изменении динамического состояния передачи. Наиболее вероятным методом обнаружения этого дефекта в настоящее время считают вибродиагностику [20].

Альтернативным способом формирования диагностического признака, свидетельствующего об изменении технического состояния редуктора при развитии трещин у ножек зубьев, является расчетно-экспериментальное исследование, основанное на математическом моделировании процесса зацепления зубчатых колес с развивающейся трещиной и последующего экспериментального подтверждения для зубчатой передачи с искусственно введенным дефектом.

В ЦИАМ провели экспериментальные исследования [22] на паре высоконагруженных зубчатых колес в условиях, максимально приближенных к работе зубчатых передач в составе вертолетных трансмиссий. На одном из зубьев ведомого колеса методом электроэрозии сформировали подрез у межзубцовой впадины, в месте, соответствующем положению начала развития трещины многоциклового усталости [21]. В ходе эксперимента проводили динамическое тензометрирование торцов зубьев колес с одновременным виброметрированием корпуса экспериментального редуктора с целью подтверждения физической связи между динамическими нагрузками в зацеплении и уровнями вибраций в опорах валов редуктора.

Согласно разработанным в ЦИАМ подходам к динамическому моделированию зубчатого зацепления [22], основным источником возникновения динамических нагрузок и вибраций при работе зубчатой передачи является переменная жесткость зацепления колес, приводя-

щая к параметрическим колебаниям в многомассовой системе трансмиссии. В соответствии с этой гипотезой для моделирования динамического отклика в системе трансмиссии при возникновении трещины у ножки зуба необходимо ввести в модель функцию жесткости зацепления для передачи с дефектом. Моделирование с помощью метода конечных элементов показало значительный локальный провал в периодической функции жесткости зацепления в момент контакта с зубом, имеющим трещину, а последующее моделирование сымитировало модулированный сигнал динамического отклика системы на частоте, представляющей комбинацию зубцовой и роторной частот рассматриваемой шестерни.

Анализ результатов эксперимента подтвердил присутствие в спектральном составе вибраций редуктора уникальной частоты, амплитуда которой чувствительна к развитию усталостной трещины у ножки зуба (рисунок; f_z, f_r – зубцовая и роторная частота).

В ходе эксперимента посредством тензометрирования был также зафиксирован рост изгибных напряжений у впадин зубьев ответного колеса, свидетельствующий о росте динамической составляющей силы в зацеплении в результате дополнительного возбуждения, вызванного присутствием в зацеплении пары зубьев с развивающейся усталостной трещиной. При этом корреляция между уровнем динамических напряжений и уровнем вибраций на роторных и зубцовых частотах обнаружена не была, что говорит о необходимости пересмотра значимости данных показателей при проведении вибродиагностики трансмиссий. Важно отметить, что амплитуда частоты, обнаруженной в спектральном составе вибраций корпуса редуктора, чувствительной к развитию усталостной трещины, продемонстрировала значимый рост до начала изменения амплитуд в сигнале динамических напряжений.

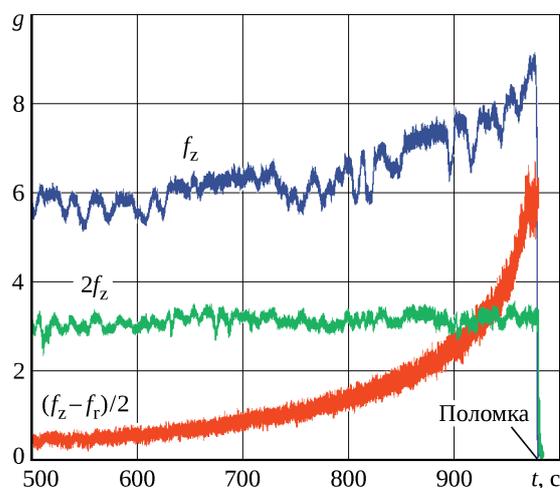


Рисунок. Амплитуды спектральных составляющих сигналов вибраций перед усталостной поломкой зубьев

Значимость диагностического признака определяется также возможностью его эффективного применения непосредственно во время эксплуатации объекта. Поскольку усталостные трещины во впадине зубьев развиваются в пределах минут и десятков минут, изменение амплитуды отслеживаемой спектральной составляющей сигнала вибраций в процессе развития усталостной трещины должно быть кратным для возможности ее обнаружения во время полета. Сигналы высокочастотных вибраций трансмиссий вертолетов характеризуются большим числом источников возбуждения, зашумляются флуктуациями частот вращения и дополнительными вибрациями со стороны системы несущих винтов, в связи с чем при их обработке во время полета необходимо проводить фильтрацию в широких частотных полосах. Данные ограничения определяют необходимость существенного роста амплитуд диагностируемых сигналов вибраций при изменении технического состояния в процессе развития дефекта. Как видно на рисунке, обнаруженный диагностический признак удовлетворяет данным требованиям – амплитуда модулированного сигнала перед поломкой зуба выросла более чем в шесть раз.

Для подтверждения эффективности сформированного диагностического признака были проведены повторные испытания при измененных условиях нагружения. Для оператора экспериментальной установки был сформулирован критерий останова испытаний в виде роста интегральной амплитуды вибраций на диагнос-

тической частоте при отслеживании в полосе частот шириной 80 Гц. После роста амплитуды более чем в три раза и останова испытаний в ходе оптического исследования зубчатого колеса с внесенным дефектом была обнаружена трещина у ножки зуба, длина которой составила 60% ширины зуба по диаметру окружности впадин. Данный диагностический признак может быть внедрен в бортовые системы диагностики вертолетов, что требует, в свою очередь, проведения дополнительных натурных испытаний.

Заключение

Описаны используемые в отечественной практике подходы к диагностике технического состояния трансмиссий вертолетов, основанные на измерении вибраций корпусов редукторов. Представлены пути развития для двух подходов к формированию диагностических признаков технического состояния основных деталей трансмиссии. Классический способ накопления и постобработки диагностической информации на объектах в ходе их эксплуатации на настоящем этапе требует активного внедрения методик, основанных на применении искусственных нейронных сетей. Альтернативным является подход, предполагающий расчетно-экспериментальное формирование признаков конкретных видов дефектов зубчатых колес и элементов трансмиссий, предварительно спрогнозированных посредством динамического моделирования.

Литература / References

1. AMC 29.1465. Vibration health monitoring // Certification specifications and acceptable means of compliance for large rotorcraft : CS-29 : Amendment 7 : 15 July 2019 : annex II to ED decision 2019/013/R / European Union Aviation Safety Agency. P. 2-79–2-90.
2. ГОСТ 26382-84. Двигатели газотурбинные гражданской авиации. Допустимые уровни вибрации и общие требования к контролю вибрации. М. : Изд-во стандартов, 1985. 14, [1] с.
GOST 26382-84. Gas-turbine engines in civil aviation. Acceptable vibration levels and vibration control general requirements. Moscow: Publishing House of Standards, 1985. 14, [1] p.
3. Соколов М.П., Земсков А.А., Куц М.С. Тренды технического диагностирования силовых установок и трансмиссий воздушных судов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 15. С. 37–46.
Sokolov M.P., Zemskov A.A., Kuts M.S. Trends in maintenance diagnostics of aircrafts power equipment and transmission. Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2022. No 15. P. 37–46.
4. Can neural networks predict dynamics they have never seen? / A. Pershin, C. Beaume, K. Li, and S.M. Tobias // ArXiv : website / Cornell University. Section «Computer science». Art. ID: arXiv:2111.06783v1. 7 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2111.06783.pdf>. Submitted on 12.11.2021.
5. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию / В.В. Голованов, В.Г. Василенко, А.А. Земсков, С.С. Панов, А.А. Емельянова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 3-1. С. 213–221.

-
- Golovanov V.V., Vasilenko V.G., Zemskov A.A., Panov S.S., Emelianova A.A. Diagnostic methods and tools for condition-based maintenance of aircraft drives. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta) [VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2015. Vol. 14, no. 3-1. P. 213–221.
6. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / by N.E. Huang, Zh. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-Ch. Yen, Chi Ch. Tung and H.H. Liu // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998. Vol. 454, iss. 1971. P. 903–995.
 7. Голяндина Н.Э. Метод «гусеница»-SSA: анализ временных рядов. СПб. : ВВМ, 2004. 74, [2] с.
Goliandina N.E. Metod "gusenitsa"-SSA: analiz vremennykh riadov [The "Caterpillar"-SSA method: time series analysis]. St. Petersburg: VVM, 2004. 74, [2] p.
 8. Fraedrich K. Estimating the dimensions of weather and climate attractors // Journal of the Atmospheric Sciences. 1986. Vol. 43, no. 5. P. 419–432.
 9. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1986. Vol. 20, no. 2/3. P. 217–236.
 10. Golyandina N.E., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. 2nd ed. Springer, 2020. ix, 120 p. (Springer Briefs in Statistics).
 11. Schmid P.J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data // Journal of Fluid Mechanics. 2010. Vol. 656. P. 5–28.
 12. Applications of the dynamic mode decomposition / P.J. Schmid, L. Li, M.P. Juniper, O. Pust // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2010. Vol. 25, no. 1/4. P. 249–259.
 13. Brunton S.L., Kutz J.N. Data driven science and engineering : Machine learning, dynamical systems, and control. Cambridge University Press, 2019. xii, 472 p.
 14. On dynamic mode decomposition: theory and applications / J.H. Tu, C.W. Rowley, D.M. Luchtenburg, S.L. Brunton, and J.N. Kutz // Journal of Computational Dynamics. 2014. Vol. 1, iss. 2. P. 391–421.
 15. Overschee P. van, Moor B. de. Subspace identification for linear systems : Theory – implementation – applications. Boston ; London ; Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. xiv, 254 p.
 16. Brincker R., Ventura C. Introduction to operational modal analysis. John Wiley & Sons, 2015. xi, 360 p.
 17. Brincker R., Andersen P. Understanding stochastic subspace identification. 2006. 6 p. (24th Conference and Exposition on Structural Dynamics : IMAC – XXIV, January 30 – February 2, 2006, St. Louis, Missouri, USA).
 18. Егоров И.В., Соколов М.П. Сравнение эффективности нейросетевых алгоритмов с методами факторного анализа при диагностировании технического состояния ГТД // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 123. С. 89–95. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12846143> (дата обращения: 14.06.2022).
Egorov I.V., Sokolov M.P. Efficiency analysis neural diagnostics algorithms in contrast with factor analysis methods. Nauchnyi vestnik MGTU GA [The Civil Aviation High Technologies]. 2007. No. 123. P. 89–95. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12846143> (accessed: 14.06.2022).
 19. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. MIT press, 2016. xiv, 785, [1] p.
 20. Баринов Ю.Г. Методы, модели и алгоритмы вибродиагностики авиационных зубчатых приводов : дис. ... д-ра техн. наук. Рига, 1992. 353 с.
Varinov Iu.G. Metody, modeli i algoritmy vibrodiagnostiki aviatsionnykh zubchatykh privodov [Methods, models and algorithms of vibration-based diagnostics of aviation gear drives]. Advanced Doctorate thesis in Engineering Sciences. Riga, 1992. 353 p.
 21. Авиационные зубчатые передачи и редукторы : справочник / В.И. Алексеев, В.М. Ананьев, М.М. Булыгина и др. ; под ред. Э.Б. Вулгакова. М. : Машиностроение, 1981. 374 с.
Alekseev V.I., Anan'ev V.M., Bulygina M.M. et al. Aviatsionnye zubchatye peredachi i reduktory: spravochnik [Aviation gear drives and gearboxes: a reference book] edited by E.B. Vulgakov. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1981. 374 p.
 22. Калинин Д.В. Разработка метода расчета динамических нагрузок в высоконагруженных зубчатых передачах планетарных редукторов ТРДД : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 197 с.
Kalinin D.V. Razrabotka metoda rascheta dinamicheskikh nagruzok v vysokonagruzhennykh zubchatykh peredachakh planetarnykh reduktorov TRDD [Development of a method for calculating dynamic loads in high-loaded gear drives of bypass turbofan engines' planetary gearboxes]. Ph.D. thesis in Engineering Sciences. Moscow, 2021. 197 p.

Материалы получены редакцией 04.10.2022
