

УДК 629.735.45-585.017.1

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ АВИАЦИОННЫХ ПРИВОДОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

© 2015 В. В. Голованов, В. Г. Василенко, А. А. Земсков,
С. С. Панов, А. А. Емельянова

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

На примере наземно-бортовой системы диагностики вертолётов рассмотрены основные методики определения технического состояния авиационных приводов по совокупности сигналов, получаемых в эксплуатации. Для реализации этих алгоритмов необходимо наличие кинематической схемы роторной машины с информацией о количестве зубьев зубчатых колёс, количестве шлиц в шлицевых соединениях, конструктивных параметрах подшипников, а также наличие синхросигналов, которые регистрируются параллельно с сигналами вибраций. Представленная методика оценки вибрационных параметров много-вальных механизмов учитывает флуктуацию характерных частот в реальных условиях эксплуатации редуктора. На основе моделей вибраций зубчатых передач и редукторов сформированы требования к аппаратным средствам. Рабочий частотный диапазон датчиков вибраций должен охватывать характерные частоты всех зубчатых передач, шлицевых соединений и подшипников качения. Динамический диапазон определяется, исходя из вибрационной активности редуктора и агрегатов в месте установки датчиков. Представлены и обоснованы требования к аппаратуре накопления и предварительной обработки данных. Представлена методика балансировки винтов вертолётов классической и соосной схем расположения несущих винтов, основанная на анализе влияния изменений значений регулировочных параметров лопастей (масса балансировочного груза, значение тяги автомата перекоса, угол отклонения триммера) на значения амплитуд гармонических составляющих вибраций. Сформулированы основные задачи центра сопровождения эксплуатации по техническому состоянию приводов вертолётов и особенности его взаимодействия с эксплуатирующей организацией.

Диагностика, редуктор, зубчатые колёса, подшипники качения, вибрация, техническое состояние, балансировка.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-213-221

Введение

Авиастроение и, в частности, вертолётостроение в настоящее время неэффективно без специальных средств диагностики, предотвращающих воздушное судно от лётных происшествий разной степени тяжести и катастроф. На вертолётах несущий и рулевой винты, а также главный редуктор и хвостовая трансмиссия являются нерезервируемыми системами. В результате, как свидетельствуют статистические данные, выход агрегатов трансмиссии вертолётов из строя является одной из основных причин аварий.

Системы диагностики вертолётов, представляющие собой сочетание сложных аппаратно-программных комплексов и специальных алгоритмов обработки, предназначены для оценки и контроля технического состояния агрегатов и систем вертолёта. Рассматриваемые в статье

методы и средства применяются для контроля и диагностики авиационных приводов, а именно: главного редуктора, хвостовой трансмиссии, главного и рулевого винтов и т.д.

В основе концепции систем диагностики авиационных приводов в эксплуатации лежит разделение системы на подсистемы, тесно взаимодействующие между собой, но решающие свои отдельные задачи. Бортовая подсистема в виде аппаратно-программных комплексов обеспечивает сбор и предварительную обработку первичной информации – сигналов вибраций, синхросигналов, сигналов температуры и т.д. Кроме того, бортовая подсистема взаимодействует со штатным оборудованием вертолёта для получения информации о режимах работы и режимах полёта вертолёта. Эта информация впоследствии используется для уточнения технического состояния и расчёта эквива-

лентной наработки агрегатов. Наземная подсистема представляет собой набор аппаратно-программных средств, обеспечивающий выполнение автоматического экспресс-анализа и расширенного анализа зарегистрированной на борту информации, определение оптимального набора значений регулировочных параметров для каждой лопасти при балансировке винтов вертолёта, а также ведение электронных формуляров агрегатов трансмиссии. Кроме того, наземная подсистема, как правило, имеет связь с базой данных сопровождения эксплуатации или базой данных производителя летательных аппаратов. В этой базе накапливается вся информация с вертолётов, оборудованных системами диагностики, производится анализ статистики изменения диагностических параметров и оценка параметров надёжности как отдельного вертолёта, так и всего находящегося в эксплуатации парка летательных аппаратов.

Методика оценки вибрационных параметров многовальных механизмов

В редукторах и коробках приводов основными источниками вибраций являются зубчатые передачи, шлицевые со-

единения и подшипники качения. Сигнал вибраций, регистрируемый с датчика, установленного на корпусе редуктора, содержит в себе весь спектр вынужденных колебаний, генерируемый этими деталями на своих характерных частотах. Таким образом, можно рассматривать модель вибраций редуктора как полигармоническую, т.е. равную сумме колебаний на этих частотах.

Значения характерных частот в реальных условиях эксплуатации флуктуируют, это приводит к «размыванию» спектральных компонент за регистрируемый период времени и заставляет рассматривать узкие полосы частот для оценки амплитуд вибраций на характерных частотах с применением следящего анализа. В предлагаемой методике с помощью преобразования Фурье оцениваются спектральные компоненты вибрационного сигнала с учётом флуктуации оборотов.

При регистрации сигналов вибраций параллельно регистрируется синхросигнал вращения одного из валов редуктора. Наличие этого сигнала позволяет определить частоты вынужденных колебаний и их комбинации в любой момент времени при работе редуктора (рис. 1).

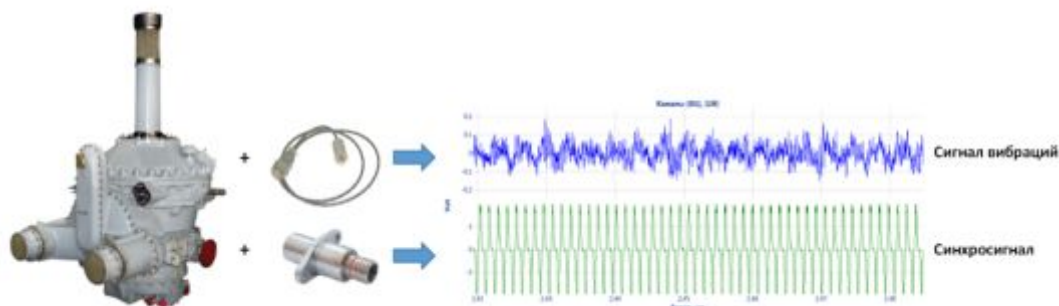


Рис. 1. Схема получения необходимых сигналов для выполнения синхронного анализа

Рассмотрим оценку уровня вибраций на частоте пересопряжения зубьев зубчатого колеса (зубцовой частоте). Пусть F – частота дискретизации регистрируемых сигналов вибрации и синхронизации. Сигнал $s(n), n = 0, \dots, N - 1$ представляет собой N дискретных значений вибрационного сигнала, взятых за период времени $T = \frac{N}{F}$. Прямое преобразо-

вание Фурье дискретного сигнала имеет вид:

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, k = 0, \dots, N - 1.$$

Выходными данными прямого преобразования Фурье являются комплексные амплитуды S_k на частотах $f_k = \frac{kF}{N}$. Вещественная амплитуда каждой гармоники равна:

$$A_k = 2 \frac{|S_k|}{N}.$$

Зубцовая частота рассчитывается по формуле: $f_z = i f_{\text{дат}} z$, где $f_{\text{дат}}$ – частота вращения вала датчика частоты вращения (ДЧВ), определяемая по регистрируемому синхросигналу; i – передаточное отношение от вала ДЧВ по вала зубчатого колеса; z – количество зубьев.

Частота вращения вала ДЧВ за период регистрации T изменяется от $f_{\text{min}T}$ до $f_{\text{max}T}$. Тогда амплитуда на зубцовой частоте будет равна:

$$A_z = \sqrt{\sum_{k=k_1}^{k=k_2} A_k^2}, \text{ где } k_1 = \text{Round}\left(z \frac{i f_{\text{min}T} N}{F}\right),$$

$$k_2 = \text{Round}\left(z \frac{i f_{\text{max}T} N}{F}\right).$$

Для каждого зубчатого колеса, шлицевого соединения и подшипника качения по указанному алгоритму определяются амплитуды вибраций на характерных частотах. Полученные оценки применяются для диагностики авиационных приводов и их деталей в качестве наиболее информативных в пространстве признаков [1]. При пороговом контроле и трендовом анализе важно регистрировать сигналы на одном и

том же стационарном режиме работы редуктора.

Аппаратно-программные средства

Бортовая подсистема, как правило, включает в себя датчики вибраций, датчики частоты вращения и блоки накопления и предварительной обработки.

На основе моделей вибраций зубчатых передач и редукторов формируются требования к аппаратным средствам, устанавливаемым на борт вертолёта.

Датчики вибраций должны иметь надёжную конструкцию для использования на борту. Рабочий частотный диапазон датчиков должен охватывать характерные частоты всех зубчатых передач, шлицевых соединений и подшипников качения. Динамический диапазон определяется, исходя из вибрационной активности редуктора и агрегатов в месте установки датчиков.

ЗАО «Виброприбор» по техническим заданиям ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» в последние несколько лет разработало ряд датчики вибраций бортового исполнения со встроенным в разъём усилителем заряда (рис. 2).



Рис.2. Датчики вибраций МВ-45ЭС (а), МВ-44ЭС (б), МВ-46ЭС (в)

Верхняя частота рабочего диапазона используемых датчиков составляет 10 кГц и выше. Это позволяет применять их для диагностики всех известных отечественных редукторов.

К аппаратуре накопления и предварительной обработки данных также предъявляются определённые требования. В первую очередь это время квантования и разрядность аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Время квантования определяет верхний диапазон частот регистрируемого сигнала, который должен

быть как минимум в два раза больше максимального значения характерной частоты элементов редуктора. Разрядность АЦП – это количество дискретных значений напряжения, на которые может делиться рабочий диапазон входных напряжений. В последнее время обычно используются 24-разрядные АЦП. При этом упрощается процесс адаптации чувствительности первичных преобразователей и согласующих усилителей к аппаратуре регистрации, снижаются шумы квантования сигналов по уровню, сохра-

няются метрологические характеристики тракта аналого-цифрового преобразования.

Наличие в аппаратуре процессоров цифровой обработки позволяет осуществлять оценку параметров регистрируемых сигналов (диагностических признаков) для их контроля в процессе всего полёта вертолёт и уже в процессе наземной обработки выполнять экспресс-анализ технического состояния.

УП «Фарнелл» по техническим заданиям ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» разработало несколько вариантов бортовой аппаратуры, применяемой в системах диагностики ЦИАМ. На рис. 3 представлен комплекс накопления и обработки диагностической информации последнего поколения. Комплекс имеет модульную структуру и состоит из блока обработки и модулей АЦП.



Рис. 3. Бортовой комплекс накопления и обработки диагностической информации

Работа аппаратных средств бортовой части систем диагностики основана:

- на преобразовании с помощью датчиков вибраций механических колебаний двигателя и корпуса главного редуктора в широкополосные электрические сигналы;
- преобразовании вращательного движения валов двигателя, несущих винтов вертолёт в последовательность электрических импульсов с помощью датчика частоты вращения;
- преобразовании в электронном блоке потоков входной аналоговой информации, поступающих с выходов датчиков

вибраций и датчиков частоты вращения, в потоки цифровых данных;

- предварительной обработке сигналов и оценке как их отдельных параметров, так и комбинаций этих параметров;
- накоплении в цифровой форме данных на накопители для передачи на наземную подсистему для дальнейшего анализа и решения задач оценки и прогнозирования технического состояния вертолёт.

Центр сопровождения эксплуатации по техническому состоянию

Наземную подсистему системы диагностики можно разделить на локальную часть и центральную (центр сопровождения).

Локальная часть представляет собой программное обеспечение обработки накопленной в полёте информации и базу данных, располагаемые у эксплуатирующей воздушное судно организации.

Ключевой момент центра сопровождения – это сервер со специальным программным обеспечением и базой данных, хранящей все накопленные данные, результаты оценок диагностических признаков, а также вибропаспорта агрегатов подконтрольных объектов.

Основные задачи центра:

- накопление результатов автоматического расчёта в базе данных посредством синхронизации по интернет с эксплуатирующими организациями;
- хранение истории технического состояния отдельных агрегатов вертолёт, получение этой информации за необходимый период (вибропаспорт);
- контроль работоспособности систем, установленных на вертолёт заказчика;
- уточнение существующих и исследование новых диагностических признаков для повышения достоверности оценки технического состояния;
- консультация по использованию системы диагностики.

Схематично организация работ при использовании систем диагностики пред-

ставлена на рис. 4. После полёта накопленные данные переносятся на наземную подсистему эксплуатирующей организации, где производится послеполётный анализ, выдача результатов обработки и сохранение полученных результатов в локальную базу данных. Далее результаты

обработки синхронизируются с базой данных центра сопровождения для предоставления информации о техническом состоянии разработчикам вертолётов и агрегатов, а также эксплуатирующим организациям.

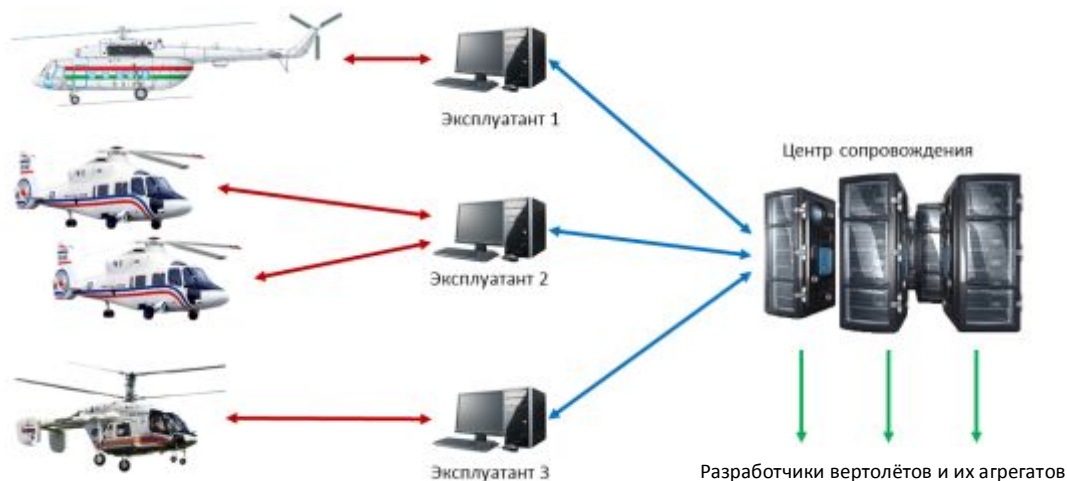


Рис. 4. Схема организации работ при эксплуатации систем диагностики

Методики балансировки винтов вертолётов классической и соосной схем расположения несущих винтов

К одной из основных целевых функций систем диагностики вертолётов следует отнести мониторинг сбалансированности его винтов, так как именно винты являются главным источником вибраций конструкции вертолёта и его агрегатов, приводящих к возникновению усталостных разрушений, уменьшению эксплуатационной надёжности авиационного оборудования и уровня комфорта в кабине экипажа [2]. В конечном счёте все эти факторы сказываются на технической готовности и целевой отдаче вертолёта, эксплуатационных расходах и безопасности полётов.

Открытая архитектура системы диагностики позволяет реализовать функцию балансировки винтов вертолёта в качестве одной из опций системы. В части аппаратуры для решения этой задачи необходима установка на вертолёт дополнительных датчиков вибрации и датчиков фазы. Места установки датчиков зависят от конструкции вертолётов и их винтов.

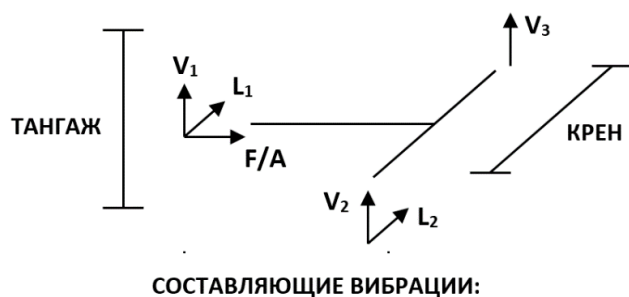
Также необходимо соответствующее программное обеспечение для наземной обработки данных и получения рекомендаций по балансировке.

Принцип действия системы при балансировке основан на анализе влияния изменений значений регулировочных параметров лопастей (масса балансировочного груза, значение тяги автомата перекоса, угол отклонения триммера) на значения амплитуд гармонических составляющих вибраций. Проводятся полёты с заданными регулировками лопастей, записанные в полётах сигналы вибраций обрабатываются с помощью программного обеспечения, рассчитываются таблицы коэффициентов влияния регулировок лопастей на вибрации, вычисляются оптимальные регулировки лопастей для минимизации вибраций, проводится контрольный полёт с рекомендуемыми регулировками лопастей для уточнения соответствующих коэффициентов.

Для балансировки винтов вертолётов с классической схемой расположения винтов используются три датчика вибраций, обеспечивающие шесть каналов из-

мерений в направлении трёх ортогональных измерительных осей. Стандартная схема размещения датчиков включает в себя трёхкомпонентный датчик, установленный как можно ближе к передней час-

ти фюзеляжа. Двухкомпонентный датчик устанавливается слева в задней части кабины, а однокомпонентный датчик – справа в задней части кабины (рис. 5).



$(V_1+V_2+ V_3)/3 = \text{Вертикальная}$	$V_1-V_2 = \text{Тангаж}$
$(L_1+L_2)/2 = \text{Поперечная}$	$V_2-V_3 = \text{Крен}$

Рис. 5. Схема размещения датчиков вибраций подсистемы на фюзеляже и направления их измерительных осей

Для балансировки рулевого винта используется дополнительный двухкомпонентный датчик вибрации, который, как правило, устанавливается на хвостовом редукторе так, чтобы одна его ось была перпендикулярна, а другая параллельна оси винта (рулевого).

Датчики фазы (датчики оборотов) с индукторами используются для получения одного импульса за оборот вала для синхронной обработки сигналов с датчиков вибрации.

Вибрационные данные обрабатываются с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ), в результате которого определяются когерентные коэффициенты Фурье гармонических составляющих частоты вращения ротора порядка, определяемого как 0.5 от количества лопастей (1-й коэффициент Фурье для двух- или трёхлопастного винта; 1-й и 2-й – для четырёх- или пятилопастного винта и т.д.).

Для каждой гармонической составляющей частоты вращения ротора винта шесть коэффициентов Фурье с каждого канала преобразуются в составляющие движения твёрдого тела: продольную, по-

перечную, вертикальную линейные составляющие ускорения; крен, тангаж, рысканье – угловые составляющие ускорения (рис. 6).

Далее рассчитываются значения регулировок лопастей винта для минимизации вибраций фюзеляжа с использованием матрицы коэффициентов влияния на вибрации:

$$\bar{\alpha} = \min_{\alpha} (V) = \min_{\alpha} (D * A),$$

где α – набор значений регулировочных параметров для каждой лопасти; $\bar{\alpha}$ – оптимальный набор значений регулировочных параметров для каждой лопасти; V – амплитуды вибраций на гармонических составляющих частоты вращения ротора несущего винта; D – матрица коэффициентов влияния на вибрации значений регулировочных параметров лопастей; A – Фурье-преобразование набора регулировочных параметров.

Матрицы коэффициентов влияния получены путём составления и решения матричных уравнений для данных, измеренных перед началом подконтрольной эксплуатации при проведении калибровки системы в процессе испытаний на основных эксплуатационных режимах полёта.

Все замеренные вибрационные данные вместе со значениями регулировочных параметров каждой лопасти, условиями полёта и отметкой времени хранятся в форме упорядоченной базы данных на компьютере. Каждый следующий полёт при использовании подсистемы приводит к уточнению соответствующих коэффициентов, результатом чего является оптимальная балансировка винтов вертолёта данного типа по мере накопления данных.

Накопленная база данных в дальнейшем используется для балансировки винтов любых вертолётов того же типа. Каждый полёт на вертолёте приводит к уточнению накопленных данных с одновременной их модификацией для отражения индивидуальных свойств данного вертолёта.

Балансировка несущих винтов при соосной схеме их расположения (рис. 6) отличается следующей особенностью. Датчики, установленные на фюзеляже, фиксируют суммарные вибрации от обоих несущих винтов, вращающихся с одинаковой частотой (рис. 7).

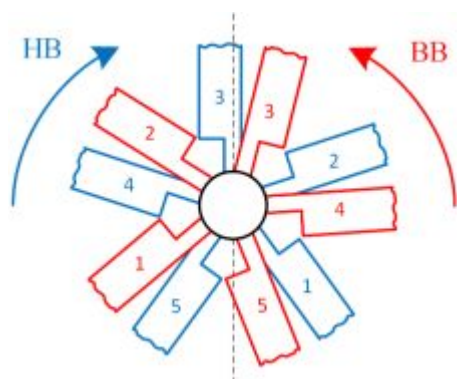


Рис. 6. Случай соосной схемы расположения винтов

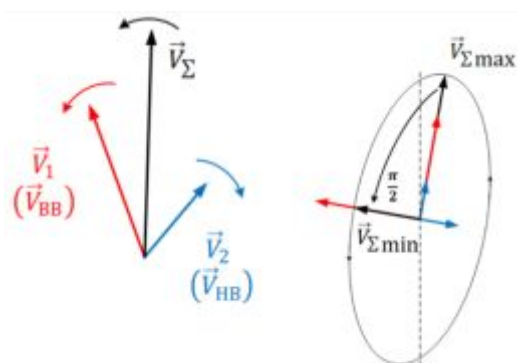


Рис. 7. Векторы вибраций для соосной схемы

Необходимо разделение вибраций по винтам (нижнему и верхнему) путём решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} V_{\Sigma \min} = V_1 - V_2 \\ V_{\Sigma \max} = V_1 + V_2. \end{cases}$$

Далее балансировка винтов проводится независимо друг от друга по аналогии с классической схемой.

Весовая балансировка рулевого винта типа Фенестрон также имеет свои особенности, так как в данном случае не представляются возможными регулировки отдельных лопастей. Данный винт в сборе рассматривается как колесо и используется соответствующая математическая модель. В части аппаратуры необходимы два трёхкомпонентных датчика вибрации и датчик фазы. По сигналам вибраций и синхросигналу определяется угловое положение дисбаланса. Масса балансировочных грузов определяется по зависимостям, полученным в ходе калибровки. Рулевой винт типа Фенестрон имеет конструкционные ограничения на места установки балансировочных грузов. С помощью программного обеспечения определяется комбинация балансировочных грузов для фактической последовательности мест установки.

Заключение

Рассмотрена методика оценки вибрационных параметров многовальных механизмов (на примере главного редуктора вертолёта), которая учитывает флуктуацию характерных частот в реальных условиях эксплуатации редуктора. Для реализации этих алгоритмов необходимо наличие кинематической схемы роторной машины с информацией о количестве зубьев зубчатых колёс, количестве шлиц в шлицевых соединениях, конструктивных параметрах подшипников, а также наличие синхросигналов, которые регистрируются параллельно с сигналами вибраций.

Системы контроля и диагностики разделяются на подсистемы: бортовую и наземную. В свою очередь, наземная подсистема также делится на локальную и центральную. Локальная располагается у эксплуатирующей воздушные судна организации. Центральная система получает информацию со всех систем диагностики посредством синхронизации по Интернет и предоставляет необходимую информацию о техническом состоянии разработчикам вертолётов и агрегатов.

Технические характеристики бортовых аппаратно-программных средств определяются в зависимости от контролируемых частотного и динамических

диапазонов. Возможность оценки и сохранения диагностических признаков в полёте уменьшает время послеполётной обработки и формирования диагноза о техническом состоянии.

Мониторинг сбалансированности винтов вертолёта и процедура их балансировки – одна из основных целевых функций систем диагностики. Работа системы при балансировке основана на анализе влияния изменений значений регулировочных параметров лопастей на вибрации и заключается в расчёте оптимальных значений регулировок лопастей для минимизации вибраций фюзеляжа.

Библиографический список

1. Биргер И.А., Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Володко А.М. Автоматизированный мониторинг работоспособности и применения зарубежных вертолётов // Сборник обзорной информации «Проблемы безопасности полётов». М.: ВИНТИ РАН, 2003.

Информация об авторах

Голованов Виктор Васильевич, начальник отдела авиационных приводов, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: vvg@ciam.ru. Область научных интересов: диагностика редукторов и зубчатых передач.

Василенко Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: vladimir.vasilenko@rambler.ru. Область научных интересов: теория обработки сигналов, методы контроля и диагностика в машиностроении.

Земсков Андрей Александрович, начальник сектора диагностики, Центральный институт авиационного моторострое-

ния имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: andrey@ciam.ru. Область научных интересов: диагностика редукторов, зубчатых передач и подшипников качения, обработка сигналов, системы диагностики вертолётов.

Панов Сергей Сергеевич, младший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: panovs@ciam.ru. Область научных интересов: теория обработки сигналов, диагностика редукторов, балансировка.

Емельянова Анна Анатольевна, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: anna_e@ciam.ru. Область научных интересов: диагностика редукторов и зубчатых передач.

DIAGNOSTIC METHODS AND TOOLS FOR CONDITION-BASED MAINTENANCE OF AIRCRAFT DRIVES

© 2015 V. V. Golovanov, V. G. Vasilenko, A. A. Zemskov,
S. S. Panov, A. A. Emelianova

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

The helicopter ground-airborne health and usage monitoring system (HUMS) presented in the paper illustrates the basic methods of determining the technical condition of aircraft drives by a set of signals received in operation. These algorithms can be realized using the kinematic scheme of a rotor unit with information about the number of teeth in gears, the number of splines in spline connections, the design parameters of the bearings as well as the presence of synchronization signals that are recorded in parallel with vibration signals. The presented methodology for the estimation of vibration parameters of multi-shaft units takes into account the fluctuation of specific frequencies in the real operating conditions of the gearbox. Hardware requirements are formed on the basis of vibration models of gears and gearboxes. The operating frequency envelope of vibration sensors is to include specific frequencies of all gears, spline connections and rolling bearings. The dynamic range is determined based on the vibration activity of the gearbox and units in the places where the sensors are installed. The requirements to the equipment of data accumulation and pretreatment are presented and validated. A method of balancing helicopter classical and coaxial rotors is presented. The method is based on the analysis of the effect of varying the values of the adjustment parameters of rotor blades (balance weight, assembly swash plate, tab angle) on the values of amplitudes of vibration harmonic components. The main goals of the support center concerning the technical condition of helicopter drives and its cooperation with the operator are stated.

Diagnostics, gearbox, rolling bearings, vibration, operating conditions, rotor balance.

References

1. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p.
2. Volodko A.M., Automated health monitoring and the application of foreign helicopters. *Collection of survey information «Problems of flight safety»*. Moscow: VINITI RAN Publ., 2003. (In Russ.)

About the authors

Golovanov Victor Vasilyevich, Head of the Department of Aircraft Drives, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: vvg@ciam.ru. Area of Research: diagnostics of tooth gearings and gearboxes.

Vasilenko Vladimir Grigorevich, Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: vladimir.vasilenko@rambler.ru. Area of Research: theory of signal processing, methods of control and diagnostics in mechanical engineering.

Zemskov Andrey Alexandrovich, Head of the Sector of Diagnostics, Central Institute of Aviation Motors named after

P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: andrey@ciam.ru. Area of Research: diagnostics of gearboxes, tooth gearings and roller bearings, signal processing.

Panov Sergey Sergeevich, junior research associate, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: panovs@ciam.ru. Area of Research: theory and application of signal processing, diagnostics of gearboxes, rotor balance.

Emelianova Anna Anatolievna, first-rank engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: anna_e@ciam.ru. Area of Research: diagnostics of gearboxes and tooth gearings.