

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВАЛА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

Михаил Владов, Дмитрий Добров, Даниил Украинцев

Молдова, Кишинев, «Comelpro» SRL,
office@comelpro.com

Abstract: In the report has described the technique of the helicopter rotor main draft shaft residual life prediction and has done description of the helicopter on-board rotor main draft shaft stress amplitude measurement and display system.

Ключевые слова: амплитуда напряжений вала несущего винта вертолета, измерение крутящего момента, прогноз остаточного ресурса вала

I. Введение

Опыт показывает, например в литературе [1,2] что гипотеза линейного суммирования позволяет достаточно точно определить долговечность, если все амплитуды превышают предел выносливости материала детали и отсутствуют резкие всплески напряжений. Кроме того, опытами показано, что линейное суммирование повреждений подтверждается при монотонном увеличении амплитуд с ростом числа циклов, и действует иной закон накопления повреждений, если сначала приложить циклическую нагрузку с амплитудами, близкими к пределу текучести материала.

Таким образом, на долговечность существенно влияет история нагружения. Экспериментально также установлено, что образец, нагруженный сначала циклическими напряжениями, меньшими предела выносливости, при дальнейшем повышении амплитуд малыми порциями показывает большую долговечность, чем исходная. В то же время предварительно перенапряжение образца циклическими напряжениями выше предела выносливости приводит к противоположным результатам. Однако вредное влияние перенапряжения начинает сказываться только после некоторого предельного числа циклов перенапряжения, зависящего от величины этих напряжений.

При случайном изменении амплитуд напряжений явления усталостного упрочнения и разупрочнения будут чередоваться и отчасти нивелироваться, что оправдывает в известной степени применение гипотезы накопления повреждений к таким нерегулярным режимам изменения напряжений. Поэтому любой теоретический подход к проблеме долговечности конструкции при нерегулярном изменении напряжений требует экспериментальной проверки теоретических методов.

В настоящее время исследования проводятся по двум основным направлениям. Одно из них состоит в испытании непосредственно конструкций по программе нагружения, возможно ближе подходящей к экспериментально определенному спектру нагрузок. Другое направление исследования состоит в испытании лабораторных образцов по различным ступенчатым программам циклического нагружения, в которых изменяется последовательность чередования нагрузок разной интенсивности с различным количеством циклов их действия. Исследуется влияние параметров нагрузки на долговечность образцов и полученные закономерности используются для оценки долговечности конструкций.

Практика показывает, что оборудование может иметь остаточный ресурс не только до истечения расчетного срока службы, но и после него, так как фактические режимы

нагрузки при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов (по прочности, износо- и коррозионной стойкости) обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования.

II. Методика прогноза остаточного ресурса вала несущего винта вертолета

Исходя из вышесказанного, в основу прогноза величины остаточного ресурса вала несущего винта положено постоянное измерение параметров крутящего момента и амплитуды изгибного напряжения вала несущего винта вертолета и известны критерии его предельного состояния. В нашем случае прогнозирование надежности вала осуществляем исходя из методики изложенной в [3] используя создаваемый во время эксплуатации график прогнозирования технического состояния вала несущего винта, внешний вид которого показан на рис. 1. Описываемая система постоянно измеряет амплитуды напряжений вала и экстраполирует зависимость до предельно допустимой величины повреждений $u_{пр}$. Такой метод позволяет получить достаточно точные оценки показателей надежности, если известен вид зависимости $y(t)$ и при измерениях значений y_1, y_2 определяются действительно максимальные значения амплитуд напряжений вала несущего винта вертолета.

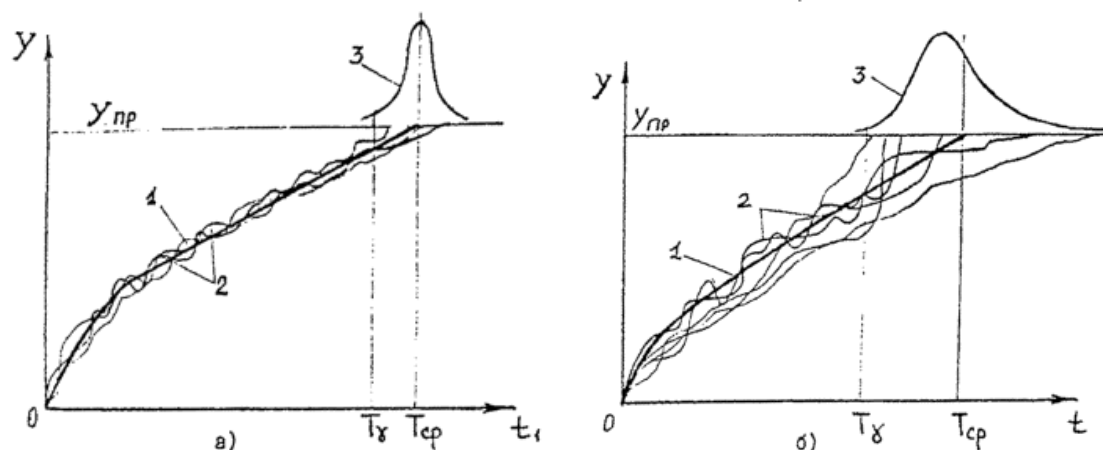


Рис. 1. График изменения параметров технического состояния вала несущего винта

при постоянной дисперсии (а) и непостоянной дисперсии (б); кривые: 1 - математического ожидания $Y(t)$; 2 - отдельных реализаций; 3 - плотности распределения ресурса; T_{cp} - средний ресурс; T_g - гарантированный (гамма-процентный) ресурс; $Y_{пр}$ - предельное значение параметров технического состояния.

Прогнозированию предшествует анализ случайных процессов, определяющих параметры технического состояния вала несущего винта вертолета. Суть рекомендуемого метода заключается в использовании наблюдений за изменением контролируемых параметров до момента контроля для оценки скорости деградации и ее возможных отклонений в последующий период эксплуатации вала до его предельного состояния. На рис.2 показан график прогноза остаточного ресурса вала несущего винта вертолета.

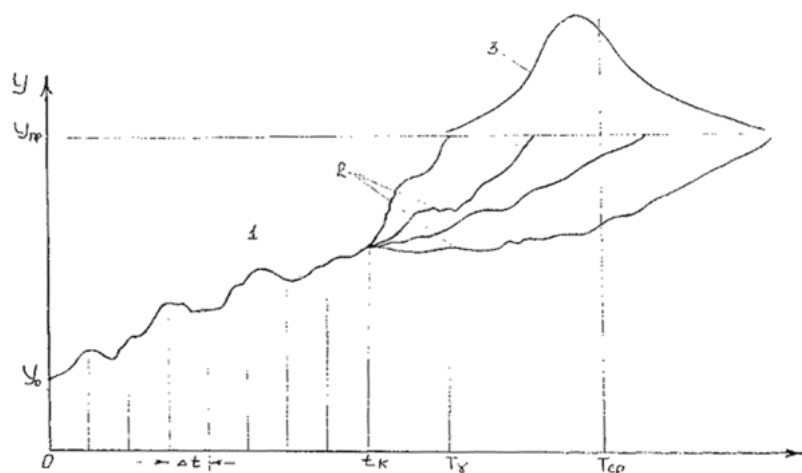


Рис.2. График прогноза остаточного ресурса вала несущего винта после момента контроля t_k

Кривые: 1 - изменения контролируемого параметра Y до момента контроля; 2 - возможных реализаций процесса деградации; 3 - плотности распределения остаточного ресурса. $(T_{cp} - t_k)$ - средний (ожидаемый) остаточный ресурс; $(T_g - t_k)$ - гарантированный (гамма-процентный) остаточный ресурс; Δt - периодичность контроля или интервал разбиения записи параметра.

Оценку остаточного ресурса осуществляем путем статистической обработки результатов измерений значений амплитуд напряжений по результатам их записи в память за текущий период эксплуатации. В расчетные формулы входит предельно допустимая величина амплитуды напряжений вала, значение которой определяем по критериям отказов и предельному состоянию вала по допустимым амплитудам напряжений. При статистической обработке результатов измерений результаты измерений, нанесенные на рабочий график, подвергаем качественной оценке:

- определяем период приработки (выхода на стационарный режим) - по перегибу графика параметра технического состояния (ПТС) или стабилизации колебаний параметра;
- определяем монотонность или немонотонность зависимости ПТС от наработки - при отсутствии отрицательных приращений ПТС зависимость считается монотонной;
- оцениваем стационарность или нестационарность процесса; (из рассмотрения исключают резкие отклонения параметров по известным причинам - из-за внезапных остановок, резкого изменения внешних условий и т.п.);
- при наличии признаков нелинейности оценку параметров осуществляем по линейной, степенной или другой функции по формулам из табл. 8 методики [10].

Статистическая обработка результатов измерений значений амплитуд напряжений включает 3 этапа:

1). Предварительная статистическая обработка, где оцениваем величину дисперсии измеряемых параметров и ее однородность:

а) Определяем среднюю скорость изменения параметра:

$$W = \frac{\Delta Y_i}{N} \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

где ΔY_i - приращение контролируемого параметра за 1-й интервал наработки Δt_i , N - число интервалов наблюдений.

б) Определяем среднее квадратическое отклонение скорости изменения параметра:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\frac{\Delta Y_i}{\Delta t} - W)^2}{N-1}} \quad (2)$$

в) Определяем коэффициент вариации скорости изменения параметра:

$$V = s/\bar{X}. \quad (3)$$

где σ - среднее квадратичное отклонение, \bar{X} - средняя величина.

Проверку однородности дисперсии осуществляем по критерию наименьшей значимой разности, известному как критерий Фишера, следующим образом:

- выделяем из всего периода наблюдений начальный (без периода приработки) и конечный периоды, в каждый из которых включаем не менее 10 измерений контролируемого параметра;

- определяем выборочную дисперсию в каждом периоде (выборке) по формуле:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}, \quad (4)$$

где Y_i , \bar{Y} - соответственно i -е и среднее значение контролируемого параметра в каждой выборке. Проводим такую же операцию по следующей выборке и определяем дисперсию D_2 ;

- определяем F - критерий Фишера $F = D_2/D_1$, согласно условию критерия, величина числителя должна быть больше или равна величине знаменателя, и сравниваем его с табличным значением F - критерия Фишера, если F превышает табличное значение, то оцениваемые дисперсии неоднородны.

2). Определение интервала корреляции.

Поскольку близкорасположенные на графиках точки замеров являются зависимыми друг от друга (коррелированными), необходимо интервал разбиения графика выбирать большим, чем интервал корреляции. Для определения интервала корреляции строится корреляционная функция $r(y)$ связи приращений контролируемого параметра (см. рис.3), где y - параметр сдвига ($y=0, 1, 2, \dots, n-1$); n - количество интервалов квантования.

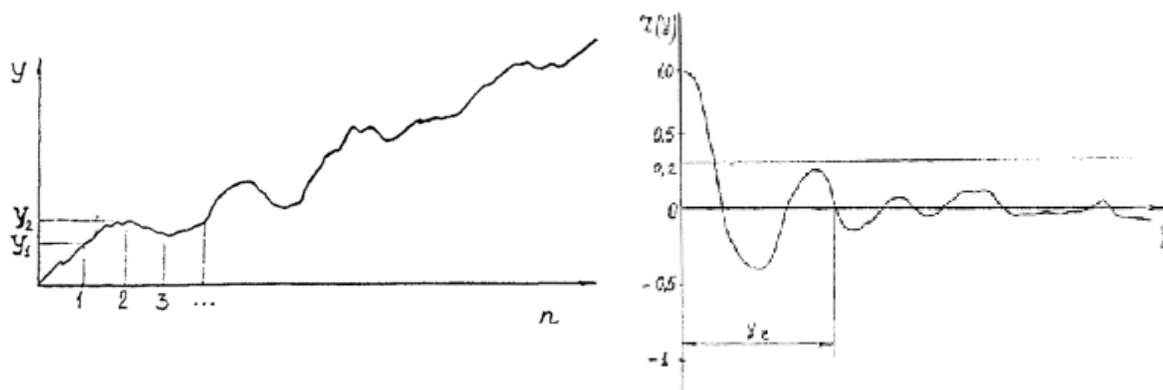


Рис. 3. Схема определения интервала корреляции y_k по корреляционной функции $r(y)$.

Значения $r(y)$ определяем по формуле:

$$r(y) = \frac{\sum_{i=y}^{n-y} \Delta Y_{i+y} \cdot \Delta Y_i}{(n-y)D}, \quad (5)$$

где $\Delta Y_i = Y_{i+1} - Y_i$; D - выборочная дисперсия

За величину интервала корреляции принимают значение y_k , при котором $r(y) < 0,2$ при всех $y > y_k$.

3). Оценка параметров скорости изменения контролируемого параметра.

При линейной зависимости контролируемого параметра от наработки определяем его среднюю скорость изменения по формуле (3). Определение верхней и нижней доверительных границ скорости изменения контролируемого параметра осуществляем по формуле:

$$W_{B(H)} = W \pm U_g \cdot S / \sqrt{n} \quad (6)$$

где U_g - квантиль нормального распределения; $U_g = 1,28$ при $g = 0,9$; $U_g = 1,65$ при $g = 0,95$; $U_g = 2,33$ при $g = 0,99$.

Определение верхней доверительной границы коэффициента вариации скорости осуществляем по формуле (7):

$$V_g = V \left(1 + U_g \sqrt{\frac{3}{n}} \right) \quad (7)$$

Определение коэффициента вариации остаточного ресурса осуществляем по формуле (8):

$$V_T = V_g \sqrt{\frac{\Delta \bar{Y}}{Y_{np} - Y_k}} \quad (8)$$

Далее производится оценка среднего (T_{cp}) и гарантированного (T_g) остаточного ресурса по формулам диффузионных распределений (9) для монотонных зависимостей контролируемого параметра от наработки и (10) - для немонотонных

$$T_{cp} = \frac{1}{a} (1 + V_T^2 / 2);$$

$$T_g = \frac{1}{a_x} \left[1 + U_g^2 V_T^2 / 2 - U_g V \left(1 + U_g^2 V^2 / 4 \right)^{1/2} \right], \quad (9)$$

где $a = w / (Y_{np} - Y_k)$; $a_e = w_a / (Y_{np} - Y_k)$; w - средняя скорость изменения контролируемого параметра, V - коэффициент вариации скорости изменения контролируемого параметра, Y_{np} и Y_k - соответственно предельное и контрольное значение контролируемого параметра.

$$T_{cp} = 1/a$$

$$T_g = \frac{1}{a(1+V_T^2/2)} \left[1 + U_g^2 V_T^2 / 2 - U_g V_T (1 + U_g^2 V_T^2 / 4)^{1/2} \right] \quad (10)$$

Система контрольно измерительная СКИ «Агат –ИНИ», построена на основе концепции реализации адаптивных телеметрических систем реализуемых на предприятии «Comelpro» SRL, описание архитектуры, принципов реализации и методов самообучения системы семейства СКИ «АГАТ» изложены в публикациях, например [4, 5,6]. СКИ «Агат –ИНИ», кроме измерения и индикации амплитуд напряжений, позволяет производить прогноз остаточного ресурса вала несущего винта вертолета по методике изложенной выше. Индикация значений амплитуд напряжений на валу главного редуктора выведена на приборную панель, при этом все текущие амплитуды напряжений, на каждом режиме полета, в том числе от момента запуска двигателей до их останова на земле, записываются в блок памяти системы с возможностью их дальнейшего анализа и прогноза остаточного ресурса. Система имеет устройство внутренней проверки и калибровки запускаемое из кабины пилотов перед каждым полетом и в случае выявления значительной разницы измерений амплитуд напряжений в двух каналах (более 10%) выдается сигнализация о неисправностях.

III. Заключение

Приведенная методика прогноза остаточного ресурса вала несущего винта вертолета на базе измерения и контроля амплитуды напряжений вала несущего винта во время эксплуатации дает предпосылки для организации работ по использованию такой системы в качестве штатной системы вертолета по прогнозу остаточного ресурса несущего вала, по типу систем, используемых на вертолетах стран НАТО.

IV. Библиография

1. Методы и средства измерений: Учебник для вузов/ Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко.-Изд. 3-е, стер.- М.: Издательский центр «Академия», 2006,-336с.
2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов для вузов. М.: Высшая школа, 2001,- 560 с.
3. Методические указания РД 26.260.004-91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.1992- 61с
4. M. Vladov, D. Dobrov, D. Ukrainsev. Rotor main draft shaft moments measurement and display system for the «Ansat» helicopter// Seventh Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY, 29 November – 1 December 2011, Sofia, Bulgaria
5. М. Владов, Д. Добров, Д. Украинцев. Архитектура семейства СКИ «АГАТ»//Сборник статей 1-ой Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, Информатика и Современные технологии.- Кишинев, Молдова 15-16 Октября.- 2008,- 83стр.
6. Vladov M. Methods of self-training of the adaptive telemetry monitoring system of engines of flight vehicles// Труды шестой научной конференции с международным участием „Космос, экология, нанотехнологии, безопасность” SENS 2010, София, 2-4 ноября 2010г.