

УДК 629.7.083.03:629.735.45

В.А. Войтов, В.Н. Чернявский, Д.С. Дашук, И.Ф. Исаченко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЛАВНОГО РЕДУКТОРА ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА

*В статье представлен подход по оценке технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса главного редуктора вертолета по вибрационным характеристикам его узлов с применением метода экстраполяции ретроспективных данных о состоянии объекта.*

**Ключевые слова:** главный редуктор, уровень вибрации, остаточный ресурс.

### Введение

**Постановка проблемы.** В условиях изменения технического состояния летательных аппаратов (ЛА), обусловленного физическим износом и исчерпанием сроков службы, актуальной является задача обеспечения требуемого уровня исправности парка и безопасности полетов. На начальном этапе путями обеспечения исправности является выполнение модернизации в комплексе с работами по продлению установленных показателей, а в перспективе переход на эксплуатацию по техническому состоянию. Реализация обоих этих путей включает разработку и внедрение новых методов контроля технического состояния агрегатов и систем ЛА. Наиболее остро в настоящее время стоит вопрос по оценке технического состояния вертолетного парка, а именно одного из наиболее отказоопасных агрегатов вертолета – главного редуктора (ГР). Решение этого вопроса помимо повышения его контролепригодности позволит также подойти вплотную к проблеме прогнозирования остаточного ресурса ГР, используя в качестве обобщающего параметра вибрационный сигнал [1 – 3].

**Цель данной работы** - разработка методики по оценке технического состояния главного редуктора вертолета Ми - 8МТ и прогнозирования его остаточного ресурса.

### Основной материал

Применение метода спектрального анализа вибрационного сигнала при проведении контроля технического состояния главного редуктора вертолета в моменты времени  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_k$ , позволяет получить текущие значения виброускорения. Использование полученных значений и решение задачи прогнозирования состояния главного редуктора позволяет определить значения виброускорения в моменты времени  $t_j$  ( $j = k + 1, \dots, k + 1$ ).

Выполнение прогнозирования остаточного ресурса ГР основывается на существовании очевидной зависимости параметров вибрации от технического состояния диагностируемого узла. При этом зако-

номерность изменения виброускорения редуктора в эксплуатации представляет собой временную функцию, которую согласно [4, 5] можно использовать в качестве прогнозируемого параметра.

Последовательность решения задачи прогнозирования с использованием аналитических методов состоит в получении массива данных, характеризующих прогнозируемый параметр, его анализе с последующим построением тренда соответствующего порядка и на его основе прогнозирования изменения технического состояния, а также определения остаточного ресурса ГР вертолета.

Нахождение зависимостей изменения вибрационных процессов в узлах ГР от времени эксплуатации, является важнейшим этапом реализации процедуры прогнозирования, поскольку непосредственно определяет его результаты.

Для обработки статистического материала и выбора вида аппроксимирующей функции был использован метод наименьших квадратов (МНК). Такой подход позволил получить зависимости изменения вибрации в узлах ГР в процессе эксплуатации.

Использование методики, которая представлена в работе [6], позволило выполнить расчет доверительных интервалов при доверительной вероятности  $P_d = 0,95$  и предположении о нормальном характере распределения полученных результатов.

Изменение уровня вибрации по мере выработки установленного ресурса может быть представлено полиномом первой степени. Так, например, для подшипниковых узлов ГР на частотах проявления дефектов тел качения она имеет вид:

– для редукторов, не прошедших ремонт:

$$L = 70,130 + 0,016t; \quad (1)$$

– для редукторов, прошедших ремонт:

$$L = 74,562 + 0,016t. \quad (2)$$

Влияние ряда субъективных факторов на выбор уравнения регрессии может привести к ошибкам прогноза, вызванным неточностью выбора формы регрессионной кривой, аппроксимирующей тренд. Проведенная количественная оценка сходимости экспериментальных данных регрессионной кривой проводилась по оценке значимости коэффициентов

регрессии. Проверка полученных регрессионных зависимостей, проведенная с помощью критерия Фишера показала, что зависимости адекватны экспериментальным данным.

В уравнениях (1), (2) первый коэффициент характеризует начальный уровень вибраций, а второй коэффициент, стоящий при переменной  $t$  – скорость роста уровня вибрации по мере наработки.

В результате выполненных исследований по влиянию технологического процесса сборки при капитальном ремонте ГР, на вибрационные характеристики узлов установлено, что отличие между первыми коэффициентами в уравнениях (1) и (2) вызваны качеством выполнения сборочных работ и технологического совершенства ремонта. При этом коэффициент скорости роста вибрации для каждого из узлов имеет свои значения лежащие в диапазоне 0,012...0,016.

В условиях низкой интенсивности эксплуатации, для которой характерны интенсивные процессы старения и коррозионный износ, результаты контроля виброускорения узлов ГР могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью. Так зависимость текущего значения виброускорения  $a_t$  от времени  $t$ , согласно [7 - 9], может быть представлена уравнением:

$$a_{T_i} = H + a_n e^{Gt_i}, \quad (3)$$

где  $H$  определяет начальное значение виброускорения на участке от начала эксплуатации ГР до точки возрастания виброускорения по экспоненциальной зависимости  $t_1$ ;  $a_n$  – значение виброускорения в момент времени  $t_1$ ;  $G$  – коэффициент, характеризующий рост виброускорения на участке  $t_1...t_n$ .

Учитывая, что в последующем будет переход от абсолютного параметра виброускорения к относительному уровню вибрации выполним логарифмирование выражения (3). Приняв, что в период эксплуатации ГР от  $t_0$  до  $t_1$ ,  $H = \text{const}$  значение  $a_{T_i}$  будет определяться исключительно вторым членом выражения (3):

$$\lg a_{T_i} = \lg a_n + Gt_i \lg e. \quad (4)$$

Когда известно предельное  $a_n$  и начальное значения виброускорения  $a_n$ , а также скорость его роста, легко определить время достижения вибрационным параметром своего предельного значения:

$$t_n = (g a_n - \lg a_n) / (G \lg e). \quad (5)$$

Достоинством данного способа определения времени  $t_n$  заключается в его независимости от условий и интенсивности эксплуатации АТ. Это особенно важно для случая низкой интенсивности эксплуатации ЛА, когда теоретически имеется большой запас ресурсных показателей.

Для дальнейших исследований будем применять относительные единицы – уровень вибрации, который согласно [10] представим:

$$L_{T_i} = 20 \lg(a_{T_i}/a_0), \quad (6)$$

где  $a_0$  – условное нулевое значения виброускорения.

Из этого выражения определим,  $a_{T_i}$  :

$$\lg a_{T_i} = \frac{L_{T_i} + 20 \lg a_0}{20}. \quad (7)$$

Полученное выражение подставим в (4):

$$L_{T_i} + 20 \lg a_0 = 20 \lg a_n + 20Gt_i \lg e, \quad (8)$$

и определим значение текущего уровня вибрации:

$$L_{T_i} = 20 \lg(a_n/a_0) + 20Gt_i \lg e. \quad (9)$$

Приняв  $L_n$ , за уровень вибрации в момент времени  $t_1$  :

$$L_n = 20 \lg(a_n/a_0), \quad (10)$$

получим  $L_{T_i} = L_n + 20Gt_i \lg e$  (11)

Выражение (11) с применением логарифмической шкалы можно представить как линейную функцию времени (рис. 1). При этом значение  $20G \lg e = K_T$  является тангенсом угла наклона  $\theta_T$ , величина которого зависит от параметра  $G$ , и который может изменяться в процессе эксплуатации в зависимости от процесса технического обслуживания, интенсивности полетов, влияния внешней среды.

Для установления предельного значения наработки ГР проведем замену  $L_{T_i}$  на  $L_n$ , получим выражение для тренда изменения уровня вибрации в виде:

$$L_n = L_n + K_T t_n. \quad (12)$$

Полученные линейные регрессионные зависимости (1) – (2), идентичные выражению (12), которые в общем виде можно записать как:

$$L = L_n + A_1 t, \quad (13)$$

где  $A_1$  – показатель скорости роста вибрации при аппроксимации изменения уровня виброускорения полиномом первой степени.

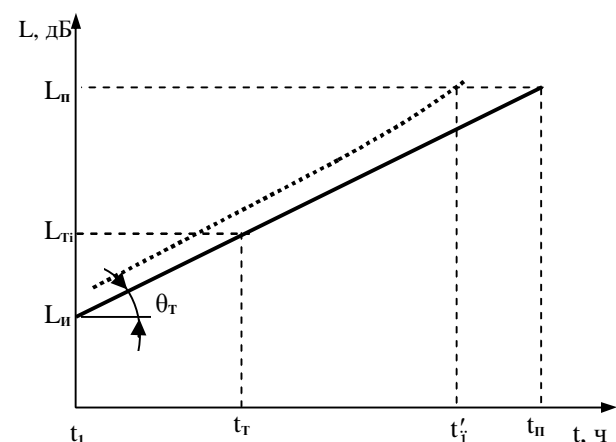


Рис. 1. Зависимость уровней вибрации от наработки

В [8 – 9] установлено, что предельное состояние диагностируемый узел достигает при возрастании в нем уровня вибрации на 20 дБ от исходного.

Заменив  $L_{\Pi} = L_{\Pi} + 20\text{дБ}$  и приняв допущение, что  $K = A_1$  из (13), установим перед началом ввода в строй нового ГР наработку  $t_{\Pi}$ , при которой его техническое состояние достигнет своего предельного значения:

$$t_{\Pi} = (L_{\Pi} + 20 - L_{\Pi}) / A_1 = 20 / A_1 \quad (14)$$

Выражение (14), также позволяет определить остаточный ресурс  $t_{\text{ос.р}}$  диагностируемого узла по значениям вибрационных характеристик и скорости роста вибрации:

$$t_{\text{ос.р}} = (L_{\Pi} - L_{\tau}) / A_1 \quad (15)$$

Полученное выражение позволяет в эксплуатации определить точечную оценку остаточного ресурса диагностируемого узла по значениям предельного и текущего уровня вибрации, а также скорости ее роста. Точечная оценка  $t_{\Pi}$  имеет вероятностный характер и не всегда подтверждается экспериментальными данными. Для выполнения прогнозирования и определения значений остаточного ресурса с гарантированной степенью вероятности на интервале необходимо использовать интервальные оценки.

Прогнозирование с использованием верхней доверительной границы с доверительной вероятностью 0,90 - 0,99 позволяет установить время  $t'_{\Pi}$  достижения вибрационным параметром своего предельного значения, а следовательно и время снятия главного редуктора с эксплуатации.

### Выводы

1. В работе представлена методика оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса главного редуктора вертолета Ми-8МТ по вибрационным характеристикам его узлов с применением метода экстраполяции ретроспективных данных о состоянии объекта. Использование предложенной методики в эксплуатации позволяет выполнить оценку изменения технического состояния одного из наиболее отказоопасных агрегатов вертолета – главного редуктора и предотвратить возникновение его отказов, как в полете, так и на земле.

2. В целях увеличения достоверности результатов прогнозирования с использованием разработанной методики предлагается в качестве исходных ретроспективных данных применять результаты измерений конкретного редуктора, что позволит

перейти на индивидуальное установление ресурса агрегатам трансмиссии летательного аппарата.

3. Показано, что прогнозирование технического состояния главного редуктора вертолета необходимо проводить с использованием верхней доверительной границы на интервале прогнозирования с доверительной вероятностью 0,90-0,99.

### Список литературы

1. Володко А.М. Автоматизированный мониторинг работоспособности и применения зарубежных вертолетов / А.М. Володко // Проблемы безопасности полетов. – М.: ВИНТИ – 2003. – № 4. – С. 3-48.
2. Егоров И.В. Прогнозирование технического состояния турбомашин методами трендового анализа параметров / И.В. Егоров, П.А. Бобович, А.Т. Нуруллаев // Конверсия в машиностроении. – 2005. – С. 128-132.
3. Тырсин А.Н. Определение динамических характеристик элементов ГТД по спектру вибросигнала / А.Н. Тырсин // Авиационная техника. – Казань: КГТУ, 2005. – №3. – С. 78-80.
4. Александров А.А. Вибрация и виброакустика судового электрооборудования / А.А. Александров, А.В. Барков, И.А. Баркова, В.А. Шафранский. – Л.: Судостроение, 1986. – 276 с.
5. Баркова Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин [Электронный ресурс] / Н.А. Баркова. – Ассоциация ВАСТ - 2002. – Режим доступа : <http://vibrotek.com/russian/articles/ref.htm>.
6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Львовский Е.Н. М.: Высш. школа, 1982. – 224с.
7. Мигаль В.Д. Вибродиагностика машин при эксплуатации: моногр. / В.Д. Мигаль. – Х.: ХГПУ, 1997. – 293 с.
8. Мигаль В.Д. Вібраційні методи оцінки якості тракторів на стадіях проектування, виготовлення та експлуатації: автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.22.02 „Автомобілі і трактори” / В.Д. Мигаль – Х., 1999 – 34с.
9. Ізменцев Є.О. Прилади, системи та методологія спектрально-кореляційного віброконтролю перед аварійного стану газотранспортного обладнання: автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.11.13 „Прилади і методи контролю та визначення складу речовин” / Є.О. Ізменцев – Х., 2000 – 34 с.
10. Вибрация. Термины и определения : ГОСТ 24346-80 – [введ. 1981-01.01]. – М.: Госуд-й комитет по упр-ю качеством продукции и стандартам, 1981. – 31с.

Поступила в редколлегию 22.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. А.Б. Леонтьев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГОЛОВНОГО РЕДУКТОРА ВЕРТОЛЬОТА НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

В.А. Войтов, В.М. Чернявський, Д.С. Дашук, І.Ф. Ісаченко

У статті представлений підхід за оцінкою технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу головного редуктора вертольота по вібраційних характеристиках його вузлів із застосуванням методу екстраполяції ретроспективних даних про стан об'єкту.

**Ключові слова:** головний редуктор, рівень вібрації, залишковий ресурс.

### PROGNOSTICATION OF THE TECHNICAL STATE OF MAIN REDUCING GEAR OF HELICOPTER ON BASIS OF THE USE OF METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL

V.A. Voytov, V.N. Chernyavskiy, D.S. Dashuk, I.F. Isachenko

In the article approach is presented as evaluated by the technical state and prognostication of remaining resource of main reducing gear of helicopter on vibration descriptions of his knots with the use of method of extrapolation of retrospective information about the state of object.

**Keywords:** main reducing gear, level of vibration, remaining resource.