

## **Переход к эксплуатации по техническому состоянию главного редуктора вертолета с контролем вибрационных характеристик**

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Приведена методика оценки остаточного ресурса главного редуктора ВР-14. Представлены подходы к проведению прогнозирования технического состояния в процессе эксплуатации по изменению вибрационных характеристик узлов редуктора.

**Ключевые слова:** главный редуктор, оценка остаточного ресурса, уровень вибрации.

В настоящее время в эксплуатации находятся вертолеты, ресурсные показатели которых истекают. Затраты на проведение модернизации в 6–10 раз ниже затрат на закупку новой авиационной техники (АТ) [1]. При этом проводимый комплекс мероприятий должен включать в себя работы, связанные с оценкой остаточного ресурса агрегатов, на которых планируется выполнить данный комплекс работ. Остро стоит вопрос оценки технического состояния вертолетного парка. Поэтому актуальной является задача исследования возможности контроля технического состояния главного редуктора вертолета, а также оценка остаточного ресурса.

Выполненный анализ научной литературы свидетельствует о том, что наиболее приемлемым методом для оценки и контроля технического состояния авиационных редукторов и двигателей является вибрационно-диагностический метод [2 – 5]. При этом результаты контроля, полученные с помощью данного метода, могут быть использованы в качестве исходных данных для определения остаточного ресурса главного редуктора транспортно-боевого вертолета.

Цель данной работы является разработка методики оценки остаточного ресурса главного редуктора вертолета Ми-8 МТ, основанной на использовании значений и скорости изменения вибрационного сигнала диагностируемых узлов.

### **Основной материал**

При проведении измерений вибрации главного редуктора вертолета были получены массивы значений уровня вибрации по пяти информационным полосам вибраций диагностируемых узлов – роторные вибрации, вибрации, возбуждаемые подшипниками и зубчатыми колесами. Измерениям подвергались две группы агрегатов – редукторы не прошедшие ремонт и редукторы после ремонта. Их общая численность составляла 15 главных редукторов ВР-14.

В целях проверки возможности применения метода наименьших квадратов, при обработке полученных массивов данных были рассчитаны числовые характеристики случайных величин, а для проверки гипотезы нормальности распределения использован  $\chi^2$ -критерий. Проверка гипотезы нормальности распределения свидетельствует о том, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения на 10%-ном уровне.

На основе полученных результатов применения метода наименьших квадратов к массивам данных были получены зависимости, показанные на рис. 1. Регрессионные зависимости характеризуют динамику роста уровня вибрации для конкретных элементов конструкции исследуемых вертолетных редукторов.

Использование методики [6] позволило провести расчет доверительных интервалов при доверительной вероятности  $P_{\delta} = 0,95$  и аппроксимации отклонения экспериментальных данных от линии регрессии нормальным распределением.

Оценочные значения уровней вибраций для различных значений времени наработки главных редукторов на рис. 1 показаны сплошной линией, границы доверительного интервала выделены штриховыми линиями.

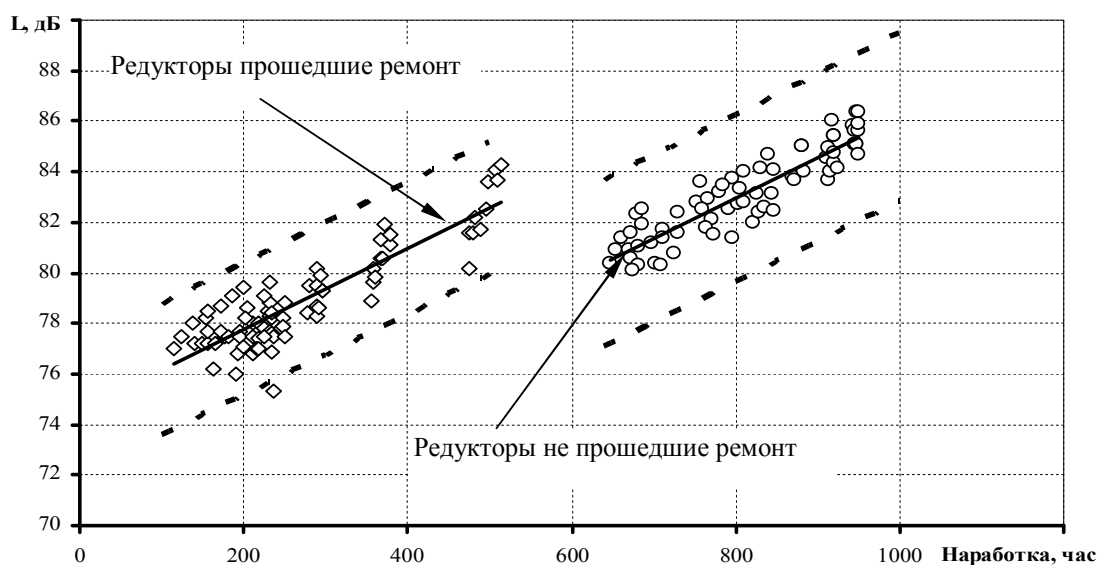


Рис. 1. Изменение уровня вибрации на частоте проявления дефектов тел качения подшипников

В целях оценки характеристик роста уровня вибраций исходя из предположения о зависимости уровня вибрации от времени наработки  $L = f(t)$  с помощью МНК были получены регрессионные зависимости, которые отвечают соответствующим линиям отклика на рис. 1.

Так, например, зависимость изменения уровня вибрации подшипников на частоте проявления дефектов тел качения подшипников может быть представлена:

– для редукторов, не прошедших ремонт:

$$L = 70,13 + 0,016t; \quad (1)$$

– для редукторов, прошедших ремонт:

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

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

В уравнениях (1), (2) первый коэффициент характеризует начальный уровень вибраций, а второй коэффициент, стоящий при переменной  $t$ , - скорость

роста уровня вибрации. Было установлено, что для диагностируемых узлов коэффициент скорости роста вибрации находится в диапазоне 0,0123...0,016.

Для повышения точности расчетов при использовании данного подхода к оценке остаточного ресурса конкретного редуктора (индивидуальный ресурс) в процессе его эксплуатации, а также на основе результатов, полученных в работах [7, 8, 9] при проведении расчетов остаточного ресурса, применим экспоненциальный закон для оценки изменения вибродиагностических характеристик диагностируемых узлов. Зависимость текущего значения уровня вибрации  $L_T$  от времени  $t$ , согласно [7, 8, 9], как правило, носит во временном интервале экспоненциальный характер

$$L_T(t) = H + I \exp(Gt), \quad (3)$$

где коэффициенты  $H, I, G$  определяют исходя из рассчитанных текущих значений уровня вибрации  $L_T(t)$  при  $t = t_j (j = \overline{1, n})$ .

Выполнив логарифмирование выражения (3) и приняв, что  $H = 0$ , определим показатель экспоненты  $G$ , который характеризует рост значения  $L_T(t)$ :

$$\lg L_T(t) = \lg I + Gt \lg e. \quad (4)$$

Полученное выражение представляет собой линейную функцию времени в логарифмических координатах, которая показана графически на рис. 2. В случае, если известно предельное значение уровня вибрации  $L_{\text{ПП}}(t)$ , то время его достижения вычислим из (4) путем подстановки  $L_{\text{ПП}}(t)$  вместо  $L_T(t)$ :

$$t_{\text{ПП}} = \frac{(\lg L_{\text{ПП}}(t) - \lg I)}{G \lg e}. \quad (5)$$

Значение постоянной  $G$  определяет угол наклона  $\theta_T$  прямой тренда (рис.2).

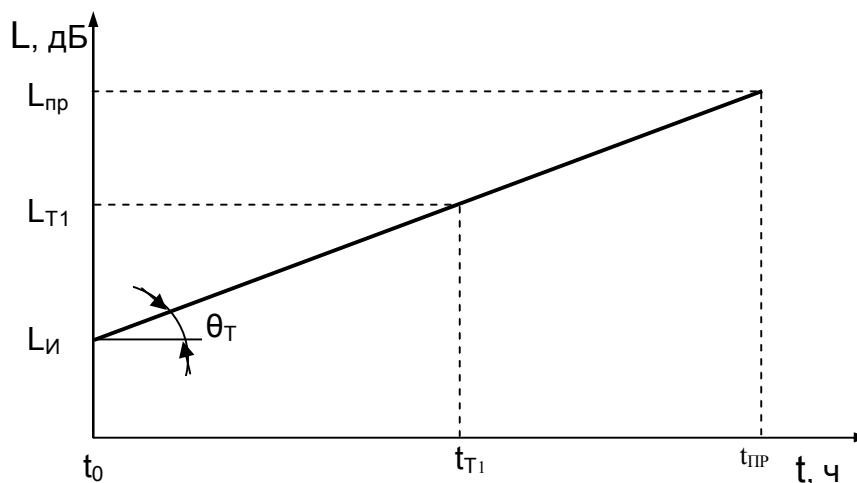


Рис. 2. Зависимость уровней вибрации от наработки

В случае, если время достижения вибрационным параметром своего предельного значения меньше установленного ресурса  $t_{\text{ПП}} \leq t_{\text{PEC}}$ , то уровень вибрации главного редуктора достигнет предельного значения до выработки объек-

том диагностирования установленного ресурса, и в результате этого произойдет отказ (разрушение) узла главного редуктора вертолета.

Для определения линейного тренда уровня виброускорения перейдем к формуле

$$L = 20 \lg \frac{L_T}{L_\Gamma} = 20(\lg L_T - \lg L_\Gamma) = 20 \lg L_T - 20 \lg L_\Gamma, \quad (6)$$

где  $L_\Gamma$  – нулевой гостированный уровень виброускорений на частоте  $f = 1000$  Гц. Преобразуем уравнение (6) к виду

$$\lg L_T = \frac{L + 20 \lg L_\Gamma}{20}, \quad (7)$$

подставив которое в выражение (3), получим

$$L = 20 \lg \frac{I}{L_\Gamma} + 20Gt \lg e. \quad (8)$$

Отсчет времени будем проводить от  $t_0$ , т.е. от момента начала экспоненциального роста уровня виброускорения. Обозначив исходное значение уровня виброускорения  $L_{II}$ , соответствующее времени  $t_0$ , через  $L_\Gamma$ , запишем

$$L_{II} = 20 \lg \frac{I}{L_\Gamma}. \quad (9)$$

При этом угловой коэффициент  $K = \operatorname{tg} \theta_T$  по замеренному уровню вибрации  $L_{T1}$  в момент времени  $t_{T1}$  определяется выражением

$$K = \operatorname{tg} \theta_T = \frac{L_{T1} - L_{II}}{t_{T1} - t_0}. \quad (10)$$

Вычислив угловой коэффициент тренда виброускорения из (8) и подставив в выражению (10), получим

$$K = 20G \lg e = \frac{L_{T1} - L_{II}}{t_{T1} - t_0}. \quad (11)$$

С учетом введенных соотношений (10) и (11) прямую тренда представим в виде

$$L = L_{II} + KT. \quad (12)$$

Имея две пары значений тренда общего уровня виброускорения  $t_0, L_{II}$  и  $t_{T1}, L_{T1}$ , вычислим с помощью соотношений (9) и (10)  $K$ , а время прогноза ресурса  $t_p$  определим по известному предельному уровню

$$L_{ПП} = L_{II} + Kt_p. \quad (13)$$

Из соотношения (13) получим

$$t_p = \frac{L_{ПП} - L_{II}}{K}. \quad (14)$$

Путем обработки экспериментальных данных были получены линейные регрессионные зависимости (1), (2), которые идентичны выражению (12) и которые в общем виде можно записать как

$$L = L_{II} + A_1 t. \quad (15)$$

Заменив  $L$  на  $L_{III}$ , из (15) можно получить время  $t_P$ , при достижении которого  $L = L_{III}$ :

$$t_P = \frac{L_{III} - L_{II}}{A_1}, \quad (16)$$

где  $L_{II}$  – начальный уровень вибрации агрегата перед началом эксплуатации, т.е. когда  $t = 0$ .

Выражение (16) позволяет определить ресурс диагностируемого узла по значениям вибрационных характеристик и скорости роста вибрации.

При выполнении замены  $L_{II}$  в выражении (10) на текущее значение вибрации  $L_T$  получим

$$t_{OC.P} = \frac{L_{III} - L_T}{A_1}. \quad (17)$$

Полученное выражение позволяет в эксплуатации определить остаточный ресурс диагностируемого узла по значениям предельного и текущего уровня вибрации, а также скорости ее роста.

### Выводы

1. Предложенный в работе подход к проведению измерений вибрации на главных редукторах ВР-14 в процессе их эксплуатации позволил построить регрессионные зависимости изменения уровня вибрации во времени, а также выявить значения начального уровня вибрации и коэффициенты скорости ее роста.

2. В работе представлена методика оценки остаточного ресурса главного редуктора вертолета Ми-8 МТ, которая основана на использовании значений и скорости изменения вибрационного сигнала диагностируемых узлов.

3. В целях увеличения достоверности результатов с использованием разработанной методики предлагается в качестве исходных данных применять результаты измерений конкретного редуктора, что позволит установить остаточный ресурс конкретному редуктору.

### Список литературы

1. Фінадорін Г.О. Можливі шляхи модернізації бойової авіаційної техніки ВПС України / Г.О. Фінадорін, В.Д. Кудрицький, О.В. Самков // Наука і оборона. – 2001. – №4. – С. 55-58.

2. Карасев В.А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В.А.Карасев, В.П. Максимов, М.К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.

3. Володко А.М. Автоматизированный мониторинг работоспособности и применения зарубежных вертолетов / А.М. Володко // Проблемы безопасности полетов. – М.: ВИНТИ – 2003. – № 4. – С. 3-48.

4. 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.

5. Тырсин А.Н. Определение динамических характеристик элементов ГТД по спектру вибросигнала / А.Н. Тырсин // *Авиационная техника*. – Казань: КГТУ, 2005. – №3. – С. 78-80.

6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1982. – 224 с.

7. Мигаль В.Д. Вибродиагностика машин при эксплуатации: моногр. / В.Д. Мигаль. – Х.: ХГПУ, 1997. – 293 с.

8. Мігаль В.Д. Вібраційні методи оцінки якості тракторів на стадіях проектування, виготовлення та експлуатації: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.22.02 / Мігаль В.Д. – Х.: ХНДАУ, 1999. – 34 с.

9. Ігуменцев Є.О. Прилади, системи та методологія спектрально-кореляційного віброконтролю передаварійного стану газотранспортного обладнання: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.11.132 / Ігуменцев Є.О. – Х.: ХДПУ, 2000. – 34 с.

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

Поступила в редакцию 27.05.09

## **Перехід до експлуатації за технічним станом головного редуктора вертольота з контролем вібраційних характеристик**

Наведено методику оцінювання залишкового ресурсу головного редуктора ВР-14. Описано підходи до проведення прогнозування технічного стану в процесі експлуатації за зміною вібраційних характеристик вузлів редуктора.

**Ключові слова:** головний редуктор, оцінювання залишкового ресурсу, рівень вібрації.

## **Regarding on-condition maintenance of helicopter main reducing gear followed by monitoring of vibration characteristics**

The method of estimation of remaining resource of main reducing gear of SR-14 is resulted in the article. Approaches are presented to conducting of prognostication of the technical state in the process of exploitation on the change of descriptions of vibrations of knots of reducing gear.

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