

УДК 629.7.083.03:629.735.45

В.А. Войтов, В.Н. Чернявский

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГЛАВНОГО РЕДУКТОРА ТРАНСПОРТНО-БОЕВОГО ВЕРТОЛЕТА

*В статье 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.

### Введение

**Постановка проблемы.** Проведенный анализ военных конфликтов свидетельствуют, что количество задач решаемых в современных условиях составляет около 70% от общего количества.

Для успешного их выполнения инженерно-технический состав проводит комплекс мероприятий, который направлен на поддержание авиационной техники (АТ) в постоянной исправности, обеспечения безотказности и высокой эффективности применения. В настоящее время на вооружении авиации Воздушных Сил находятся летательные аппараты, ресурсные показатели которых истекают. Достижение предельных значение указанных показателей и не дает возможности их дальнейшей эксплуатации АТ.

Наиболее рациональным, по мнению специалистов, является проведение модернизации образцов АТ, которые находятся на вооружении. Затраты на проведение модернизации в 6–10 раз ниже закупки новой АТ [1]. При этом проводимый комплекс мероприятий должен включать работы по оценке остаточного ресурса агрегатов, на которых планируется выполнить данный комплекс работ.

Наиболее остро в настоящее время стоит вопрос с оценкой технического состояния вертолетного парка. Поэтому актуальной является задача исследовать возможность контроля технического состояния главного редуктора вертолета, а также провести оценку остаточного ресурса.

**Анализ литературы.** Выполненный анализ научной литературы свидетельствует, 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 при помощи данного метода, могут быть использованы в качестве исходных данных для определения остаточного ресурса главного редуктора транспортно-боевого вертолета.

**Цель работы.** Представить методику оценки остаточного ресурса главного редуктора вертолета Ми-8 МТ, основанную на использовании значений и скорости изменения вибрационного сигнала диагностируемых узлов.

### Основной материал

При проведении измерений вибрации главного редуктора вертолета были получены массивы значе-

ний уровня вибрации по 5 информационным пола-сам вибраций диагностируемых узлов – роторные вибрации, вибрации возбуждаемые подшипниками и зубчатыми колесами. Измерениям подвергались 2 группы агрегатов – редуктора не прошедшие ремонт и прошедшие ремонт, их общая численность составила 15 главных редукторов ВР-14.

С целью проверки возможности применения метода наименьших квадратов при обработке полученных массивов данных были вычислены числовые характеристики случайных величин, а для проверки гипотезы нормальности распределения применялся  $\chi^2$ -критерий. Проверка гипотезы нормальности распределения свидетельствует, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения на 10-% уровне.

Используя полученные результаты и применяя метод 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.

Применение методики [6] позволило произвести расчет доверительных интервалов при доверительной вероятности  $P_d = 0,95$  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.

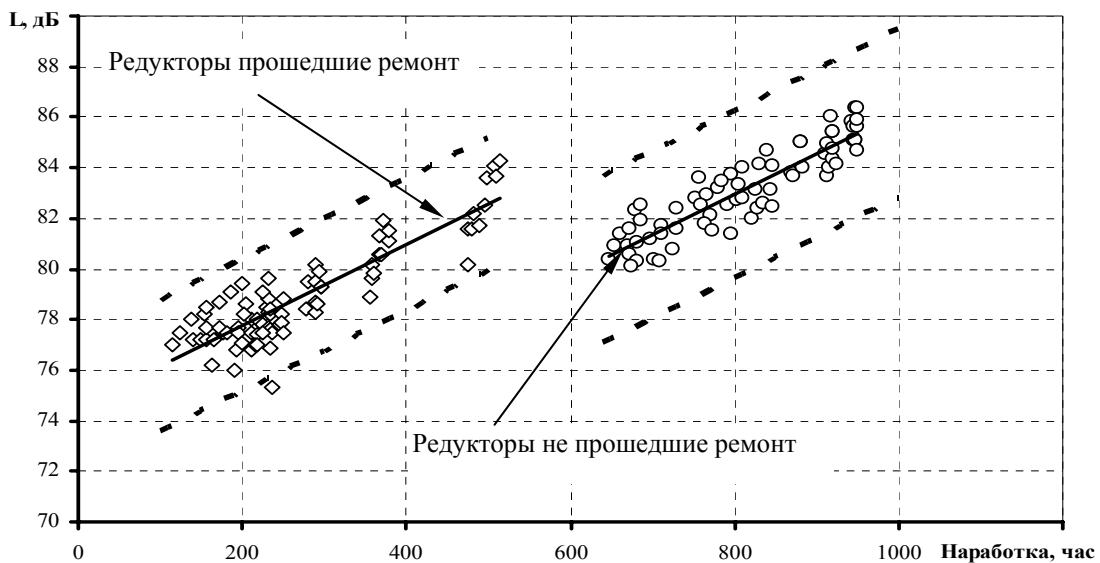


Рис. 1. Изменение уровня вибрации на частоте проявления дефектов тел качения подшипников

С целью 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 экспериментальным данным проводилась при помощи критерия Фишера и показала, что зависимости адекватны.

В уравнениях (1), (2) первый коэффициент, характеризует начальный уровень вибраций, а второй коэффициент, стоящий при переменной  $t$ , характеризует 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 для оценки остаточного ресурса конкретного редуктора (индивидуальный ресурс) в процессе его эксплуатации, а также используя результаты, полученные 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 представлена графически на рис. 2. В случае если известно предельное значение уровня вибрации  $L_{\text{ПР}}(t)$ , то время его достижения вычис-

лим из (4), путем подстановки  $L_{\text{ПР}}(t)$  вместо  $L_T(t)$ :

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

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

В случае если время достижения вибрационным параметром своего предельного значения менее чем установленного ресурса  $t_{\text{ПР}} \leq t_{\text{РЕС}}$ , то уровень вибрации главного редуктора достигнет предельного значения до выработки объектом диагностирования установленного ресурса, и в результате этого произойдет отказ (разрушение) узла главного редуктора вертолета.

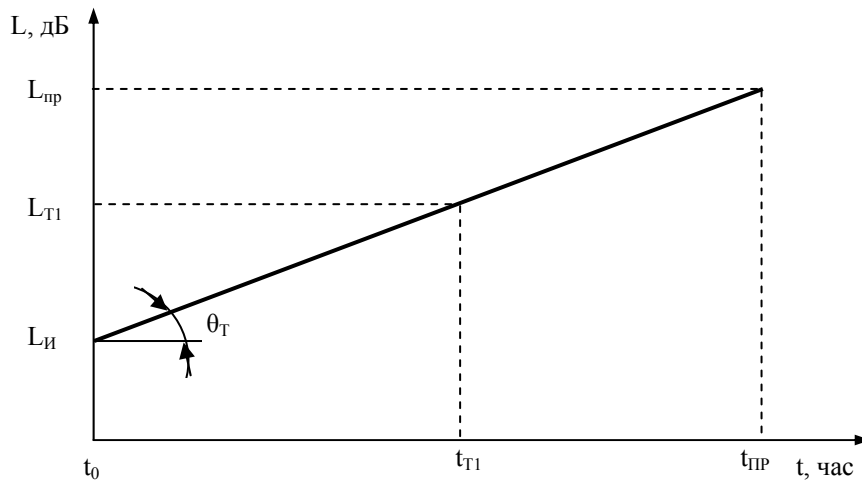


Рис. 2. Зависимость уровней вибрации от наработки

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

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

Затем подставим полученное выражение в (3) и 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  $L_И$ , соответствующее времени  $t_0$ , через  $L_\Gamma$  получим

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

При этом угловой коэффициент  $K = \text{tg} \theta_T$  по замеренному уровню вибрации  $L_{Т1}$  в момент времени  $t_{Т1}$  равен

$$K = \text{tg} \theta_T = \frac{L_{Т1} - L_И}{t_{Т1} - t_0}. \quad (10)$$

Вычислив угловой коэффициент тренда виброускорения из (8) и приравняв его выражению (10), получим

$$K = 20G \lg e = \frac{L_{Т1} - L_И}{t_{Т1} - t_0}. \quad (11)$$

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

$$L = L_И + K T. \quad (12)$$

Имея две пары значений тренда общего уровня виброускорения  $t_0, L_И$  и  $t_{Т1}, L_{Т1}$ , вычислим с помощью соотношений (9) и (10)  $K$ , а время прогноза ресурса  $t_p$  определим по известному предельному уровню

$$L_{\text{ПР}} = L_И + K t_p. \quad (13)$$

Из соотношения (13) получим

$$t_p = \frac{L_{\text{ПР}} - L_{\text{И}}}{K}. \quad (14)$$

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

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

Заменив  $L$  на  $L_{\text{ПР}}$ , из (15) можно получить время  $t_p$ , при достижении которого  $L = L_{\text{ПР}}$ :

$$t_p = \frac{L_{\text{ПР}} - L_{\text{И}}}{A_1}, \quad (16)$$

где  $L_{\text{И}}$  – 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  $L_{\text{И}}$  в выражении (10) на текущее значение вибрации  $L_{\text{T}}$  получим

$$t_{\text{ОС.Р}} = \frac{L_{\text{ПР}} - L_{\text{T}}}{A_1}. \quad (17)$$

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

### Выводы

1. Предложенный в работе подход по 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. С целью увеличения достоверности результатов с использованием разработанной методики предлагается в качестве исходных данных использовать 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, июль-октябрь. – 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. школа, 1982. – 224 с.
7. Мигаль В.Д. Вибродиагностика машин при эксплуатации: Монография / 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 / Мигаль В.Д. – Х.: ХНДАУ, 1999. – 34 с.
9. Ігуменцев Є.О. Прилади, системи та методологія спектрально-кореляційного віброконтролю перед аварійного стану газотранспортного обладнання: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.11.132 / Ігуменцев Є.О. – Х.: ХДПУ, 2000 – 34 с.

Поступила в редколлегию 3.12.2008

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

### МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ГОЛОВНОГО РЕДУКТОРА ТРАНСПОРТНО-БОЙОВОГО ВЕРТОЛЮТА

В.А. Войтов, В.М. Чернявський

У статті приведена методика оцінки залишкового ресурсу головного редуктора ВР-14. Представлені підходи до проведення прогнозування технічного стану в процесі експлуатації по зміні вібраційних характеристик вузлів редуктора.

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

### METHOD OF ESTIMATION OF REMAINING RESOURCE OF MAIN Reducing GEAR of TRANSPORT-BATTLE HELICOPTER

V.A. Vojtov, V.N. Chernyavsky

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.