

УДК 621.396

В.И. Гридин, А.А. Пьянков

Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АГРЕГАТОВ РАКЕТНО-Артиллерийского вооружения с использованием корреляционных зависимостей контролируемых эксплуатационных параметров износа

Предложена методика определения остаточного ресурса систем и агрегатов ракетных комплексов, основанная на учете изменений контролируемых эксплуатационных параметров, связанных с износом. Используются корреляционные зависимости групп эксплуатационных параметров, а также начальные, промежуточные и предельные их значения для определения остаточного ресурса по измеренным данным параметров.

остаточный ресурс систем и агрегатов, контролируемые эксплуатационные параметры

Введение

Постановка проблемы. При прогнозировании процессов износа и определения остаточного ресурса ракетно-артиллерийских систем по параметрам, на которые влияет износ, согласно [1, 2] изменение состояния ресурса многопараметрических систем рассматривается как процесс, характеризуемый компонентами, численные значения которого зависят от контролируемых параметров процесса и, как правило, описывается одномерной функцией. Для определения ресурса $R[X(t)]$, имеющего значения безразмерной величины, $0 \leq R[X(t)] \leq 1$ параметры приводятся к системе нормированного относительного исчисления.

При этом считается, что контролируемые параметры независимы, что не всегда отвечает действительности. При изменении состояния системы, рассматриваемой как кластер [3], изменение одного из показателей неизменно приводит к изменению других в разной степени.

Например, в электрической схеме изменение сопротивления (емкости) элемента с течением времени, приводит к повышению (понижению) значений тока (напряжения), протекающего через электрическую цепь и как правило влияет на режимы работы других элементов цепи и даже к выходу их из строя. Аналогично для механических систем, на-

пример в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) износ шатунных подшипников приводит к падению давления в системе смазки и как следствие к повышенному износу распредвала и т.п.

Поэтому необходимость учета связей между контролируемыми параметрами эксплуатируемой системы для определения остаточного ресурса ракетного и реактивно-артиллерийского вооружения более точно позволит определить его значение.

Анализ последних исследований и публикаций. Методики определения остаточного ресурса [1] и прогнозирования надежности [4] используют за основу либо один определяющий параметр, либо совокупность контролируемых независимых друг от друга параметров. В первом случае с использованием Гамма функции прогнозируется надежность, а затем на основе диффузионного монотонного или диффузионного немонотонного распределения прогнозируется остаточная наработка объекта. Во втором случае, как отмечалось, независимые контролируемые параметры нормируются по их начальным и критичным значениям, а затем по матрице нормированных значений параметров определяется остаточный ресурс.

Целью статьи является формализованное описание реализации методики определения остаточного ресурса агрегатов и систем ракетных комплексов с использованием корреляционных связей контролируемых параметров исследуемых систем

Изложение основного материала

Прогнозируют техническое состояние некоторых агрегатов, узлов и сопряжений только по эксплуатационным показателям, так как измерить зазоры, люфты без разборки узла невозможно. Так, техническое состояние сопряжения кольцо – канавка поршня двигателя внутреннего сгорания оценивают по расходу масла на угар, сопряжение кольцо – гильза – по утечке газа в картер, подшипников коленчатого вала и всей совокупности сопряжений двигателя внутреннего сгорания, смазка которых производится под давлением – по изменению давления в системе смазки.

Для получения прогноза технического состояния любого агрегата необходимо иметь исходные данные по изменению эксплуатационных показателей этого агрегата в процессе эксплуатации. Прогнозируемым параметром может выступать пробег агрегата, время его работы, число циклов работы, ресурс работы и т.п. Исходные данные могут быть получены [5, 6] в результате стендовых испытаний или в процессе эксплуатации данного агрегата. Эксплуатационные показатели, выбранные для получения значений прогнозируемого параметра, должны быть связаны с ним и влиять на его значение.

Остаточный ресурс работы будем оценивать внутри зоны изменения эксплуатационных параметров. Достижение предельного уровня какого-либо параметра свидетельствует о необходимости ремонта агрегата. Для определения уравнения корреляции ресурса при трех эксплуатационных параметрах необходимо иметь хотя бы еще одно промежуточное значение эксплуатационного параметра.

Корреляционный анализ, основанный на использовании методов математической статистики при обработке исходных данных, позволяет выявить комплексное влияние на величину выбранного критерия целого ряда факторов, причем не только эксплуатационных, но и производственных и других. В практических расчетах обычно достаточно ограничиться выявлением влияния лишь основных, наиболее существенных факторов, так как метод корреляционного анализа позволяет установить, как изменяется величина выбранного критерия с изменением одного или нескольких факторов. При использовании этого метода выбранный критерий рассматривается как функция выбранных его характеристик вида:

$$S_n = f(x_1; x_2; \dots; x_n), \quad (1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – факторы, характеризующие конструктивные параметры и эксплуатационные свойства анализируемого образца.

Для расчета критерия может быть использован вид регрессии:

$$S = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n. \quad (2)$$

Для ее установления достаточно найти значения $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$.

Эти значения могут быть определены методом наименьших квадратов, при котором сумма квадра-

тов отклонений зависимой переменной, рассчитанной по формуле, от ее фактических значений наименьшая при значениях b_i :

$$\gamma = \sum_i^N (S_i - \bar{S}_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где S_i – фактическое значение критерия; \bar{S}_i – расчетное значение критерия; N – число статистических данных о критерии.

Векторы нормированных значений эксплуатационных параметров для исходных значений $X_{ИСХ}$, промежуточных $X_{ПР}$ и конечных $X_{КОН}$, имеют вид:

$$X1 = \begin{bmatrix} X1_{ИСХ} \\ X1_{ПР} \\ X1_{КОН} \end{bmatrix}; \quad X2 = \begin{bmatrix} X2_{ИСХ} \\ X2_{ПР} \\ X2_{КОН} \end{bmatrix}; \quad X3 = \begin{bmatrix} X3_{ИСХ} \\ X3_{ПР} \\ X3_{КОН} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а вектор значений ресурса

$$Y1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Коэффициенты матрицы a_{ij} и вектора k_n эксплуатационных параметров определяются в виде:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 4; \quad a_{12} = \sum_{i=0}^2 X1_i; \quad a_{13} = \sum_{i=0}^2 X2_i; \quad a_{14} = \sum_{i=0}^2 X3_i; \\ a_{21} &= \sum_{i=0}^2 X1_i; \quad a_{22} = \sum_{i=0}^2 X1_i^2; \\ a_{23} &= \sum_{i=0}^2 X1_i X2_i; \quad a_{24} = \sum_{i=0}^2 X1_i X3_i; \\ a_{31} &= \sum_{i=0}^2 X2_i; \quad a_{32} = \sum_{i=0}^2 X1_i X2_i; \quad a_{33} = \sum_{i=0}^2 X2_i^2; \\ a_{34} &= \sum_{i=0}^2 X2_i X3_i; \quad a_{41} = \sum_{i=0}^2 X3_i; \quad a_{42} = \sum_{i=0}^2 X1_i X3_i; \quad (6) \\ a_{43} &= \sum_{i=0}^2 X2_i X3_i; \quad a_{44} = \sum_{i=0}^2 X3_i^2; \\ k_1 &= \sum_{i=0}^2 Y1_i; \quad k_2 = \sum_{i=0}^2 X1_i Y1_i; \\ k_3 &= \sum_{i=0}^2 Y1_i X2_i; \quad k_4 = \sum_{i=0}^2 Y1_i X3_i. \end{aligned}$$

Матричное уравнение, связывающее компоненты процесса, имеет вид:

$$U \cdot A = K, \quad (7)$$

где U – вектор значений коэффициентов полинома, а матрицы A и вектор K имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Значения вектора U получаем решением матричного уравнения:

$$U = A^{-1}K; \quad U = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Определяем нормированное относительное значение ресурса t через уравнение регрессии:

$$t = U_0 + U_1x_1 + U_2x_2 + U_3x_3, \quad (10)$$

где $x_1 = X1t/X1n$, $x_2 = X2t/X2n$, $x_3 = X3t/X3n$ при измеренных $X1t$, $X2t$, $X3t$.

Таким образом, оставшийся ресурс работы Tr агрегата составляет

$$Tr = t \cdot T, \quad (11)$$

где T – предельное значение времени эксплуатации агрегата.

Для примера работы методики рассмотрим расчет остаточного ресурса силового агрегата пусковой установки по имеющимся исходным данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1
Расширенная таблица исходных данных

	Прорыв газов в картер, л/мин	Компрессия в стартерном режиме, кгс/см ²	Давление в масляной магистрали, кгс/см ²	Ресурс работы двигателя, час
Номинальное значение	28,000	8,000	2,500	500
Промежуточное значение	57,966	7,211	2,125	250
Предельное значение	120,000	6,500	1,800	0
Обозначение эксплуатационного параметра	X1	X2	X3	T

Проведем нормирование параметров путем деления значений эксплуатационных параметров на начальное значение (табл. 2).

Таблица 2
Нормированная таблица исходных данных

	Прорыв газов в картер	Компрессия в стартерном режиме	Давление в масляной магистрали	Ресурс работы двигателя
Номинальное значение	1,00	1,00	1,00	1,0
Промежуточное значение	2,07	0,90	0,85	0,5
Предельное значение	4,30	0,81	0,72	0
Обозначение нормированного эксплуатационного параметра	x ₁	x ₂	x ₃	T

Тогда, согласно (4) и (5), векторы нормированных значений эксплуатационных параметров и значений ресурса имеют значения:

$$X1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2,07 \\ 4,30 \end{bmatrix}; \quad X2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,90 \\ 0,81 \end{bmatrix}; \quad X3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,85 \\ 0,72 \end{bmatrix}; \quad Y1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Решение матричного уравнения (9) имеет вектор значений U_y которого:

$$U_0 = -9,246 \cdot 10^{-14}; \quad U_1 = -0,065; \quad U_2 = -5,413; \quad U_3 = 6,478.$$

Согласно (9), (11) при $X1t = 60$ л/мин, $X2t = 7$ кгс/см², $X3t = 2$ кгс/см²:

$$x_1 = X1t/X1n = 2,143; \quad x_2 = X2t/X2n = 0,875;$$

$$x_3 = X3t/X3n = 0,800 \quad t = 0,307.$$

Таким образом, оставшийся ресурс работы силового агрегата пусковой установки составляет

$$Tr = t \cdot T = 154 \text{ моточаса.}$$

Выводы

Разработана методика определения остаточного ресурса агрегатов и систем ракетных комплексов, элементы которых имеют износные параметрические отказы. Она учитывает изменения основных контролируемых эксплуатационных параметров, связанных с износом наиболее уязвимых узлов и элементов агрегатов. Для того чтобы учесть их взаимное влияние на изменение параметров, используются корреляционные зависимости групп эксплуатационных параметров. Для реализации методики необходимы статистические данные по начальным, промежуточным и предельным значениям параметров в зависимости от ресурсной наработки агрегатов (узлов) для определения остаточного ресурса. Для более точного определения значений необходима база статистических данных по типам агрегатов и систем и их зависимостям эксплуатационных параметров от наработки. Измерение эксплуатационных параметров возможно как на дополнительном стендовом оборудовании, так и встроенными средствами на агрегатах.

Полученные результаты моделирования позволяют получать прогнозные значения показателей ресурса в произвольные отрезки времени эксплуатации.

Список литературы

1. Стрельников В.П., Рыкунич Ю.Н., Яковлев М.Ф. Прогнозирование остаточного ресурса на основе измерения ресурсных или диагностических параметров // Математические машины и системы. – 2001. – № 1-2. – С. 186-193.
2. Ксендзов В.Н., Дыко Г.А., Мурашко С.П. Прогнозирование остаточного ресурса деталей приводов машин // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 10. – С. 18-24.
3. Харченко В.С., Гридин В.И., Ушаков А.А. Модели надежности невосстанавливаемых систем с учетом изменений параметров при отказах // Вестник национального технического университета "ХПИ". Том 3. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2002. – Вып. № 9. – С. 110-114.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник. 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдудевский и др.; Т.8: Эксплуатация и ремонт; Под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
5. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л.В. Мирошников и др. – М.: Транспорт, 1977. – 340 с.
6. Моделювання та дослідження надійності та живучості систем літальних комплексів: Методичний посібник / А.П. Батуков, В.І. Грідін, В.В. Скляр та ін.; Під ред. В.С. Харченко. – Х.: ХВУ, 2001. – 134 с.

Поступила в редколлегию 8.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.И. Антюфеев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.