

УДК 629.7.017.1

А. В. Кацура

**ПРИМЕНЕНИЕ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ КРИТЕРИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ**

*Обобщение информации по техническому состоянию длительно эксплуатируемых летательных аппаратов и анализ отказов свидетельствуют о том, что очень важным является учет факторов коррозионной стойкости конструкции.*

*Ключевые слова: коррозионное поражение, прочность, коррозионно-усталостная долговечность.*

Сложные технические системы могут быть классифицированы в виде трех состояний:

- 1) новая конструкция – обозначим это состояние как 0;
- 2) зачищенная от коррозии конструкция – это состояние 1;
- 3) замененная конструкция – обозначим как 2.

Не все указанные здесь состояния связаны с переходом друг в друга. Совершенно очевидно, что зачищенная конструкция уже не может возвратиться в состояние «новая». Зачистка производится в местах видимой коррозии, но остается еще много мест, где коррозия не видима, но уже имеет место [1].

Невозможен переход из состояния 2 в состояние 0. Это связано с тем, что замена обшивки сопровождается заменой конструктивных элементов. Кроме того, обшивка панели может быть заменена не целиком, а только частично, в местах обнаруженных коррозионных поражений.

Таким образом, схема переходов из одного состояния в другое, в общем случае, представлена на рис. 1.

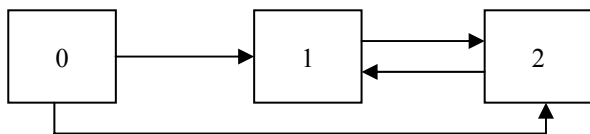


Рис. 1. Схема переходов

При подсчете вероятностей переходов было учтено, что конструкция может переходить из состояния 1 в состояние 1, т. е. оставаться в состоянии 1, если производится повторная зачистка, а может переходить из состояния 2 в состояние 2, если повторная замена производится без фиксации состояния 1.

Соответственно имеет место следующая матрица переходов и переходных вероятностей (указаны в скобках):

Было \ Стало	0	1	2
0	00 ( $P_{00}$ )	01 ( $P_{01}$ )	02 ( $P_{02}$ )
1	10 ( $P_{10}$ )	11 ( $P_{11}$ )	12 ( $P_{12}$ )
2	20 ( $P_{20}$ )	21 ( $P_{21}$ )	22 ( $P_{22}$ )

Вероятность перехода  $P_{00}$  означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция находилась в состоянии «новая» и при поступлении в очередной ремонт она также не нуждается в зачистке или замене.

Вероятность перехода  $P_{01}$  означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция находилась в состоянии «новая», а на следующем ремонте требует зачистки. Вероятность  $P_{02}$  означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция находилась в состоянии «новая» и требует замены на следующем ремонте (без промежуточной зачистки).

Вероятность  $P_{11}$  означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция была зачищена и при поступлении в очередной ремонт вновь требует зачистки.

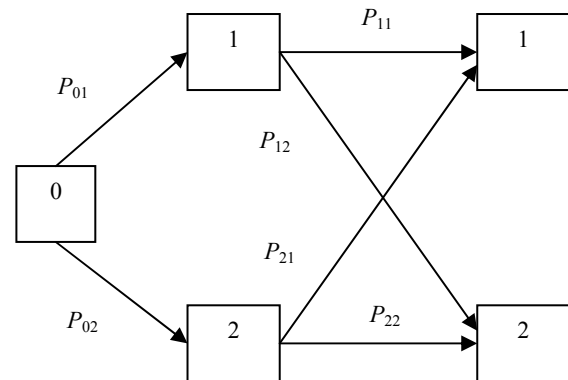


Рис. 2. Иллюстрация схемы переходов из одного состояния в другое

Аналогично:  $P_{12}$  – означает вероятность перехода из состояния 1 в состояние 2;  $P_{21}$  – вероятность перепада из состояния 2 в состояние 1 и  $P_{22}$  – вероятность перехода из состояния 2 в состояние 2.

Указанные матрицы представляли бы однородную цепь Маркова, если бы переходные вероятности  $P_{ij}$  зависели только от предыдущего состояния. При этом исчисления наработки панели надо было бы вести от предыдущего состояния к последующему. Пусть, например, наработка с начала эксплуатации при состоянии 2 есть  $T_2$ , и состояние 2 перешло в состояние 1. Пусть наработка с начала эксплуатации в состоянии 1 есть  $T_{21}$ , тогда наработка при переходе 2–1 составит

( $T_{21} - T_2$ ). Такой подход был бы правильным, если замена или зачистка полностью охватывала бы рассматриваемую зону, или если бы при дальнейшей дефектации координаты коррозии жестко фиксировались и лежали в области замены или зачистки.

На самом деле это не так. Зачистка выполняется лишь в местах появления коррозии и остается еще много площадок с необнаруженной коррозией. При дальнейшей дефектации коррозия может быть обнаружена вне зоны зачистки и нет возможности строго зафиксировать ее координаты, сказанное относится и к процессу замены (состояние 2). Это означает, что, например, переход 2-1 зависит не только от предыдущего состояния 2, но и от наработки самолета с начала эксплуатации. Здесь надо добавить, что необнаружение коррозии не означает ее полного отсутствия, а длительность эксплуатации оказывает существенное влияние на зачаточные коррозионные повреждения.

**Сведение немарковских параметров системы к марковским.** С теоретической точки зрения любой случайный процесс можно представить как процесс Маркова: для этого достаточно в понятие «состояние» включить всю предысторию поведения системы. Следовательно, о возможности аппроксимации Маркова необходимо судить с 2-х позиций: насколько точно модели Маркова отражают реальный характер случайных процессов и насколько сложны сами модели. Аппроксимация Маркова возможна, если потоки возникновения и устранения отказов и неисправностей являются простейшими, т. е. удовлетворяются условия ординарности и стационарности. Для определения вероятностей состояний  $P_i$  возможна замена реальных функций распределения  $F_i(t)$ , характеризующих потоки, переводящие системы ЛА из одного состояния в другое, на экспоненциальные при условии равенства их первых моментов [2]. В некоторых случаях, вместо замены реальных законов распределения экспоненциальными путем приравнивания их математических ожиданий, можно использовать способ введения фиктивных состояний и представлений исследуемых процессов как кусочно-однородных. Зная характер изменения интенсивности потоков отказов, можно для каждого периода принять их постоянными  $\omega_1, \omega_2$  и  $\omega_3$  (что соответствует замене монотонно изменяющихся функций ступенчатыми) и решить ряд независимых задач для каждого периода. Но в этом случае возникает необходимость нахождения значений  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  и длительности периодов  $T_1$  и  $T_3$  по имеющимся статистическим данным. В соответствии со сказанным, вероятность перехода  $P_{ij}$  следует рассматривать как функцию  $P_{ij}(T)$  от наработки  $T$  с начала эксплуатации.

Фактически речь идет об условной вероятности переходов, при условии, что известна наработка с начала эксплуатации. В нашем случае производится замена вероятностных переходов  $P_{01}$  и  $P_{12}(P_{21})$  на кусочно-однородные процессы:  $P_{01}$  – необслуживаемая нерезервируемая система,  $P_{12}(P_{21})$  – как непрерывно контролируемая нерезервируемая система [3].

**Модель состояний необслуживаемых нерезервированных конструктивных элементов (КЭ) летательных аппаратов (ЛА).** Для необслуживаемых нерезервированных КЭ ЛА характерными состояниями являются: 1 – готовность к работе (Г); 2 – отказа (О).

В связи с невозможностью выявления и устранения возникших в процессе эксплуатации отказов будет иметь место лишь одно направление перехода: из состояния 1 в состояние 2 (1-2). Ориентированный граф состояний таких КЭ представлен на рис. 3.

Состояние 2 является поглощающим, и поведение этих КЭ описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -a_{12}P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= a_{12}P_1(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Интенсивность перехода  $a_{12}$  по своей физической сущности представляет собой интенсивность отказов  $\lambda$  необслуживаемого КЭ:

$$a_{12} = \lambda.$$

Используя преобразование Лапласа, от системы дифференциальных уравнений (2) перейдем к системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} SP_1(S) - P_1(0) &= -\lambda P_1(S); \\ SP_2(S) - P_2(0) &= \lambda P_1(S). \end{aligned}$$

Из данной системы найдем выражение для  $P_1(S)$ :

$$P_1(S) = \frac{P_1(0)}{S + \lambda}.$$

Перейдя к оригиналу, окончательно получим

$$P_1(t) = P_1(0) e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

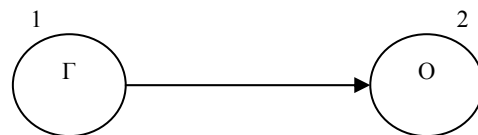


Рис. 3. График состояний необслуживаемых нерезервированных КЭ ЛА

В модели необслуживаемых КЭ (рис. 3) переменной является интенсивность отказов  $\lambda$ . Значение вероятности  $P_1(0)$  принимается равным оценке, полученной теоретическим путем или при заводских испытаниях. Характер изменения вероятности  $P_1$  заставить КЭ в состоянии готовности к работе показан на графиках (рис. 4), построенных по исходным данным, приведенным в табл. 1 (значение  $P_1(0)$  принято равным единице, что, как правило, имеет место при теоретических расчетах и является явно завышенной оценкой).

Из этих графиков видно, что даже при малых, трудно достижимых значениях  $\lambda = 10^{-6}$  1/ч вероятность  $P_1$  готовности необслуживаемого КЭ к работе

уже после одного года эксплуатации снижается до недопустимо малых значений ( $P_1(T = 8\ 760 \text{ л. ч.}) = 0,9913$ ). Это указывает на необходимость тщательной обработки статистических данных для оценки по результатам испытаний необслуживаемых КЭ с целью подтверждения правильности принятого главным конструктором решения о его необслуживаемости в процессе эксплуатации.

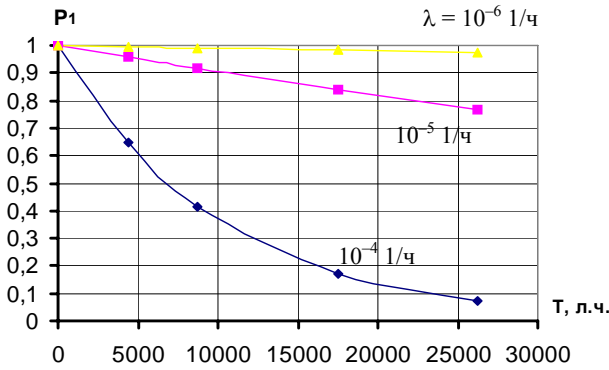


Рис. 4. Зависимость вероятности  $P_1$ , перехода  $P_{(01)}$  от времени эксплуатации

Вероятность  $P_1$  нахождения КЭ в состоянии готовности к применению

$\lambda, 1/\text{ч}$	$T, \text{ л. ч.}$			
	4 380	8760	17 520	26279
$10^{-4}$	0,6453	0,4164	0,1734	0,072
$10^{-5}$	0,9571	0,9161	0,8393	0,7689
$10^{-6}$	0,9956	0,9913	0,9826	0,9741

**Модель состояний непрерывно контролируемых нерезервированных конструктивных элементов летательных аппаратов.** Для непрерывно контролируемых в процессе эксплуатации нерезервированных КЭ ЛА модель системы ТО имеет простейший вид (рис. 5). В любой произвольный момент времени такие КЭ могут находиться в одном из двух состояний: 1 – готовности к работе (Г); 2 – отказа (О).

Наличие непрерывного контроля технического состояния КЭ позволяет в случае возникновения отказа (переход 1–2) немедленно приступить к восстановлению его готовности (переход 2–1).

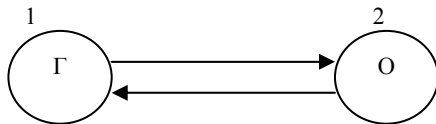


Рис. 5. График состояний непрерывно контролируемых нерезервированных КЭ ЛА

Система дифференциальных уравнений для представленной на рис. 5 модели будет иметь следующий вид:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -a_{12}P_1(t) + a_{21}P_2(t); \quad (4)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -a_{21}P_2(t) + a_{12}P_1(t).$$

Используя преобразование Лапласа, перейдем от системы дифференциальных уравнений (4) к системе алгебраических уравнений, что позволит получить выражение для вероятности  $P_1(t)$  нахождения КЭ в состоянии 1 готовности к работе (при начальном условии  $P_1(0) = 1$ ):

$$P_1(t) = \frac{a_{21}}{a_{12} + a_{21}} + \frac{a_{12}}{a_{12} + a_{21}} \cdot e^{-(a_{12} + a_{21})t} = \frac{\mu}{\omega_{\text{нп}} + \mu} + \frac{\omega_{\text{нп}}}{\omega_{\text{нп}} + \mu} \cdot e^{-(\omega_{\text{нп}} + \mu)t} \quad (5)$$

где  $a_{12} = \omega_{\text{нп}}$ ;  $a_{21} = 1/T_{\text{устр}}^{\text{нп}} = \mu$ ;  $\omega_{\text{нп}}$  – параметр потока отказов непрерывно контролируемых нерезервированных КЭ;  $T_{\text{устр}}^{\text{нп}}$  – среднее время устранения отказов;  $\mu$  – интенсивность восстановления.

В стационарном режиме эксплуатации ( $t \rightarrow \infty$ ) система уравнений (4) вырождается в систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} -a_{12}P_1 + a_{21}P_2 &= 0; \\ a_{12}P_1 - a_{21}P_2 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

из которой с учетом нормировочного условия  $P_1 + P_2 = 1$  получаем

$$P_1 = \frac{\mu}{\omega_{\text{нп}} + \mu}. \quad (7)$$

Выражения (5) и (7) широко известны из литературы по теории надежности и эксплуатации [4]. Но при этом модели Маркова позволяют получить еще целый ряд показателей качества систем ТО ( $F_i, p_{ij}, \mu_i$  и др.).

В модели непрерывно контролируемых нерезервированных КЭ и систем ЛА вектор эксплуатационных характеристик  $\bar{x}$  включает две характеристики:  $\omega_{\text{нп}}$  и  $T_{\text{устр}}^{\text{нп}}$  (или  $\mu$ ). Графики изменения вероятности  $P_1$  готовности КЭ к работе приведены на рис. 6, они построены по исходным данным табл. 2. Из них видно, что при  $\omega_{\text{нп}} \leq 10^{-5} 1/\text{ч}$  вероятность  $P_1$  практически не зависит от времени устранения отказов в реальном диапазоне их изменения [5].

Вероятность  $P_1$  нахождения КЭ в состоянии готовности к применению

$T_{\text{устр}}^{\text{нп}}, \text{ ч}$	$\omega, 1/\text{ч}$		
	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
10	0,9901	0,9990	0,9999
25	0,9756	0,9975	0,9998
50	0,9524	0,9950	0,9995
100	0,9091	0,9901	0,9990

Так, при изменении  $T_{\text{устр}}^{\text{нп}}$  на 90 % (с 10 до 100 ч) вероятность  $P_1$  изменяется всего лишь на 0,09 %. Однако при  $\omega_{\text{нп}} > 10^{-5} 1/\text{ч}$  картина меняется: изменение  $T_{\text{устр}}^{\text{нп}}$  на 90 % при  $\omega_{\text{нп}} = 10^{-4} 1/\text{ч}$  приводит к изменению  $P_1$  на 0,9 %, а при  $\omega_{\text{нп}} = 10^{-3} 1/\text{ч}$  – на 8 %. Следовательно, в ходе проведения испытаний исходя из достигнутого уровня  $\omega_{\text{нп}}$  требования к точности

нахождения оценки времени  $T_{устр}^{нп}$  и, следовательно, числу испытаний должны быть различны для значений  $\omega_{нп} \leq 10^{-5}$  1/ч и  $\omega_{нп} \geq 10^{-5}$  1/ч.

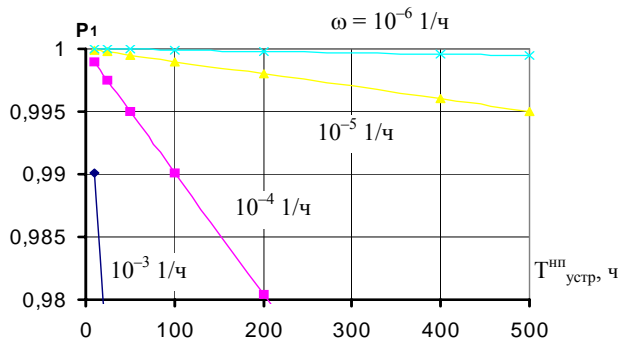


Рис. 6. Зависимость вероятности  $P_1$ , перехода  $P_{12}$ , от времени устранения отказов

Таким образом, создание матрицы вероятностей переходов из одного состояния в другое позволяет осуществлять прогнозирование развития коррозионных поражений и оценивать минимальный, средний, максимальный объем работ и расход материальных

ресурсов, связанных с устранением коррозии при поступлении ЛА в ремонт.

Сведение немарковских параметров системы к Марковским и представление исследуемых процессов как кусочно-однородных позволило провести оценку вероятности  $P_1$  нахождения систем панелей обшивки фюзеляжа в состоянии готовности к применению по назначенному техническому обслуживанию и определить вероятность работоспособности конструктивных элементов для самолетов типа Ан-24.

#### Библиографические ссылки

1. Акимов Г. В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М. : Из-во АН СССР, 1945.
2. Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. Е., Каштанов В. А. Вопросы математической теории надежности. М. : Радиосвязь, 1983.
3. Герцбах Н. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов. М. : Сов. радио, 1966.
4. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности. М. : Наука, 1965.
5. Голего Н. Л. Ремонт летательных аппаратов. М. : Транспорт, 1977.

A. V. Katsura

#### USE OF METHODS OF NONDESTRUCTIVE TEST FOR EXPOSURE OF CORROSION DAMAGE OF THE AIRFRAME STRUCTURE WITH ACCOUNT OF CORROSIVE DAMAGE CRITERIA

*From the analysis of the tasks caused by the necessity to mitigate and prevent the effects of corrosion during a scheduled service, the most important one is to define the limits of corrosion damage.*

*Keywords: corrosion damage, corrosion resistance, corrosion fatigue life, corrosion ulcer.*

© Кацура А. В., 2011

УДК 532.542:621.67-762:62

М. В. Краев, И. С. Протевень

#### СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ЧАСТИЧНО СМОЧЕННОГО ДИСКА С РАДИАЛЬНЫМИ ЛОПАТКАМИ\*

*На основе представлений картины течения рабочей жидкости в каналах диска с лопатками выполнен расчет основных параметров границы раздела «жидкость–газ» с подтвержденными экспериментальными данными.*

*Ключевые слова: диск, вращение, каналы, поверхность, граница, жидкость–газ.*

Высокооборотные насосные агрегаты (НА) широко применяются в качестве агрегатов для подачи жидких рабочих тел в энергодвигательных установках летательных аппаратов (ЛА), ротор которых состоит из различных типов рабочих колес, дисков, систем уплотнений и т. п. [1].

Вопросам исследования гидродинамики по торцевой поверхности вращающегося диска посвяще-

ны работы [2–4], авторы которых принимают в расчетах, что границы раздела жидкостной и газовой фаз представляют собой размытую цилиндрическую поверхность. Такая неопределенность с положением расчетных параметров вносит существенную погрешность при расчете элементов вспомогательного гидравлического тракта насосного агрегата [5].

\*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: ФПЦ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. ГК № П231 от 23.04.2010 и АВЦП РНП ВШ № 2.1.2/802.