

УДК 629.735.08 (075.8)

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83

ПРИМЕНЕНИЕ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬЮ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ю.М. ЧИНЮЧИН¹, А.С. СОЛОВЬЕВ²

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²АО «Камов», г. Москва, Россия

Процесс эксплуатации летательного аппарата сопровождается постоянным воздействием различных факторов на его компоненты, приводящие к случайным или систематическим изменениям их технического состояния. Марковские процессы являются частным случаем случайных процессов, которые имеют место в процессе эксплуатации объектов авиационной техники. Очевидная связь характеристик безотказности объектов с затратами на их восстановление позволяют применить аналитический аппарат марковских процессов для анализа и управления эксплуатационной технологичностью летательных аппаратов. В статье описываются методы анализа и управления эксплуатационной технологичностью объектов, основанных на стационарных и нестационарных марковских цепях. Модель стационарной марковской цепи используется для объектов, у которых интенсивность событий постоянна во времени. Для объектов с переменной во времени интенсивностью событий используется нестационарная марковская цепь. С целью сокращения вычислительных объемов, необходимых для выполнения анализа эксплуатационной технологичности объектов авиационной техники с помощью нестационарных марковских процессов, представлен алгоритм их оптимизации. Предложенные методы анализа с помощью марковских цепей позволяют провести сравнительные оценки ожидаемых затрат на техническое обслуживание и ремонт одного или нескольких однотипных объектов с учётом их начальных состояний и времени эксплуатации. Процесс управления эксплуатационной технологичностью с использованием марковских цепей заключается в поиске оптимальной при каждом состоянии объекта стратегии технического обслуживания и ремонта (варианта действий), при которой затраты на его техническую эксплуатацию будут минимальными. Проведённая апробация методов анализа и управления эксплуатационной технологичностью с использованием марковских процессов для объекта, подконтрольного в эксплуатации, позволила построить прогнозно-управляемую модель, в которой рассчитаны ожидаемые затраты на его техническое обслуживание и ремонт, а также необходимое количество запасных частей на каждый заданный интервал наработки. Показана возможность использования математического аппарата марковских процессов для большого количества объектов с различными законами распределения характеристик надёжности. Программная реализация описанных методов, а также использование программного обеспечения, адаптированного к табличной среде, будут способствовать снижению трудоёмкости расчётов и более наглядному представлению получаемых данных.

Ключевые слова: марковские процессы, марковские цепи, эксплуатационная технологичность, анализ эксплуатационной технологичности.

ВВЕДЕНИЕ

Марковский процесс как математическая модель для изучения сложных технических систем хорошо известен в авиационной отрасли. Наглядность, высокий уровень адекватности математической модели и глубоко проработанный математический аппарат марковских процессов позволяют использовать его по таким направлениям, как управление процессами технической эксплуатации (ПТЭ) летательных аппаратов (ЛА), системами массового обслуживания парка ЛА, эксплуатационно-техническими свойствами ЛА (эксплуатационной надёжности и технологичности ЛА и их компонентов) [1,2,3]. Основные преимущества марковских процессов заключаются в возможности построения прогнозно-управляемых моделей поведения объекта или группы объектов во времени на основе статистических данных или по результатам эксплуатационных наблюдений. Наиболее часто марковский процесс представляется как модель с веро-

ятностной структурой, которая позволяет определять вероятность попадания объекта в одно из состояний процесса за определённое время или интервал времени.

Одним из наиболее эффективных путей существенного снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт ЛА является выбор оптимальной стратегии ТОиР (варианта действий по ТОиР), которая во многом зависит от поведения в эксплуатации компонентов ЛА [4]. При описании модели поведения объекта с использованием аналитического аппарата марковского процесса представляется возможным связать вероятностную структуру смены состояний объекта с доходами или расходами, которые возникают при переходе объекта из одного состояния процесса в другое (например, переход объекта из неработоспособного состояния в работоспособное сопровождается затратами на его ремонт). Для анализа ЭТ объекта в качестве основного показателя используются трудозатраты на его техническое обслуживание, а модель на основе марковских процессов позволяет оценить суммарные трудозатраты на обслуживание объекта за определенный период эксплуатации, а также выбрать стратегию ТОиР (вариант действий), при которой затраты труда будут оптимальными.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс эксплуатации объекта как марковский процесс представляет собой последовательную смену состояний объекта и его переходов в различные состояния. Объект совершает переход из одного состояния в другое, когда значения его параметров, характеризующие одно состояние, сменяются другими параметрами. В общем случае эксплуатируемый объект может иметь три состояния:

- исправное;
- неисправное работоспособное;
- неисправное неработоспособное.

Переход объекта из одного состояния в другое носит случайный во времени характер и описывается как непрерывный процесс. Однако, так как контроль состояния ЛА происходит через определённый интервал времени (послеполётный осмотр, осмотр каждые 25 часов налёта и т.д.), целесообразно процесс эксплуатации представить как марковский процесс с дискретным временем, в котором переход из состояния в состояние происходит за равные интервалы времени. В литературе марковский процесс с дискретным пространством состояний и времени именуется как марковская цепь [5].

Таким образом, объект наделяется набором значений вероятностей переходов p_{ij} , при этом, находясь в конкретный момент времени в состоянии i , в течение следующего интервала времени объект окажется в состоянии j . Пример графа состояний и переходов для объекта, имеющего три указанных выше состояния, показан на рис. 1.

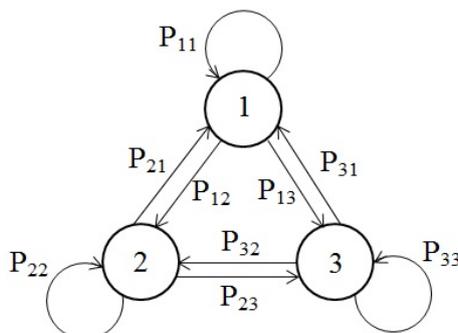


Рис. 1. Пример графа состояний и переходов объекта
Fig. 1. Example of a graph of states and transitions of an object

В матричной форме набор вероятностей переходов будет иметь вид:

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Так как после перехода объект обязательно окажется в одном из трёх состояний, сумма вероятностей по каждой строке будет равна 1, а матрица вероятностей переходов будет называться стохастической [6].

Если переход из одного состояния в другое сопровождается некоторыми доходами r_{ij} , то такой набор может быть принят как матрица доходов R вида:

$$R = [r_{ij}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Следует отметить, что данная матрица называется матрицей доходов лишь условно. На самом деле переход объекта из одного состояния в другое может приносить как доход, так и сопровождаться некоторыми расходами.

При анализе ЭТ объекта элементы матрицы доходов будут иметь либо нулевые значения, свидетельствующие о том, что при переходе из одного состояния в другое работы по ТОиР не потребовались, либо отрицательные значения, отражающие затраты на ТОиР. Сама задача снижения затрат на ТОиР объекта сводится к выбору стратегии ТОиР (варианта действий), при которой суммарные затраты на ТОиР будут минимальны за определённое количество переходов. Таким образом, суммарные затраты на ТОиР объекта после наработки за n интервалов (шагов) исследуемого процесса будут описываться уравнением полных доходов (расходов) V вида:

$$v_i(n) = q_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} * v_j(n - 1), \quad (3)$$

где q_i – средний одношаговый доход;
 N – количество состояний.

Средний одношаговый доход представляет собой величину, которую объект (условно) принесёт при выходе из состояния i :

$$q_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} * r_{ij}. \quad (4)$$

В период нормальной эксплуатации наступление события (например, отказа) происходит неожиданно и повторяется примерно с одинаковой интенсивностью за достаточно большие и равные промежутки времени. Как правило, если интенсивность отказов постоянна на всех временных интервалах, то вероятность отказа будет также одинакова на каждом взятом временном интервале [7]. Марковский процесс, описывающий состояние объекта, у которого вероятности

переходов на каждом интервале не зависят от общей наработки, называется стационарной марковской цепью [8]:

$$\lambda(n) = \text{const}; \quad P(n) = [p_{ij}] = \text{const}. \quad (5)$$

Для объектов, у которых интенсивность смены состояний изменяется со временем непрерывной работы (износ, старение и т.д.), матрица вероятностей переходов не будет одинакова для всех интервалов времени, а марковская цепь, описывающая состояние объекта, в этом случае называется нестационарной:

$$\lambda(n) = f(n); \quad P(n) = [p_{ij}(t)]. \quad (6)$$

Приведенные марковские цепи являются цепями первого порядка, так как не зависят от предыдущих изменений состояний. При описании процесса эксплуатации объектов АТ нестационарная марковская цепь может быть цепью высшего порядка, в которой смена состояний зависит от предыдущих. Так, если за определённое время объект отказал и происходит его замена на новый, то вновь установленный объект только начинает свою наработку, в то время как общее время процесса эксплуатации продолжается. Таким образом, изменение вероятностей состояний процесса на каждом шагу в целом будет зависеть от предыдущих изменений:

$$\lambda(n) = f(t); \quad P(n) = [p_{ij}(t, n-1)]. \quad (7)$$

Марковские процессы высшего порядка в наибольшей степени соответствуют процессам технической эксплуатации (ПТЭ) ЛА. Однако в условиях повышенных требований к подтверждению степени адекватности модели увеличивается объём обрабатываемой статистики, при этом значительно усложняется математический аппарат марковского процесса. Некоторые методы оптимизации математической модели поведения объекта позволяют условно заменить марковские цепи высших порядков на цепи первого порядка, обеспечивая точность, достаточную для анализа и управления ЭТ ЛА и приемлемую для практики.

МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ТРУДОЗАТРАТ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ МАРКОВСКОМ ПРОЦЕССЕ

При стационарном марковском процессе вероятности смены состояний объекта подчиняются экспоненциальному закону и одинаковы за любой одинаковый промежуток времени:

$$p_{ij} = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_{ij} dt} = 1 - e^{-\lambda_{ij} t}. \quad (8)$$

Порядок определения интенсивности переходов объекта из одного состояния в другое по статистическим данным изложен в ряде многих научных изданий [7, 9].

Пусть объект работает в период нормальной эксплуатации и может находиться в трёх состояниях: исправное; неисправное работоспособное (повреждение); неисправное неработоспособное (отказ).

Для данного объекта выбрана следующая стратегия ТО (вариант действий). Объект контролируется через каждые 10 часов наработки. Если при следующем контроле объект оказался исправным, то он не нуждается в техническом обслуживании и продолжает работать. Если объект отказал, то производится его замена, трудоёмкость которой составляет 30 чел.-ч, и к началу

следующего интервала времени он становится исправным. Если объект оказался неисправным, но работоспособным, то имеются три варианта дальнейших действий ($S = 3$):

- 1) продолжить эксплуатацию объекта;
- 2) провести регулировку объекта с трудозатратами 10 чел.-ч;
- 3) заменить объект с трудозатратами 30 чел.-ч.

Вероятности переходов и соответствующие им затраты на ТОиР для каждого варианта действий показаны в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Исходные данные эксплуатируемого объекта
Initial data of an operational object

Состояние i	Варианты действий S	Вероятности переходов			Затраты на ТОиР, чел.-ч		
		p_{i1}	p_{i2}	p_{i3}	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}
1. Исправное	1	0,89	0,1	0,01	0	0	30
	2	0,89	0,1	0,01	0	10	30
	3	0,89	0,1	0,01	0	30	30
2. Повреждение	1	0	0,8	0,2	0	0	30
	2	0,85	0,1	0,05	0	10	30
	3	0,89	0,1	0,01	0	0	30
3. Отказ	1	0,89	0,1	0,01	0	30	30
	2	0,89	0,1	0,01	0	10	30
	3	0,89	0,1	0,01	0	30	30

По формулам (3) и (4) рассчитаем и составим сравнительную таблицу полных трудозатрат для всех вариантов действий на каждом интервале за 100 часов эксплуатации. Полученные значения представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Полученные данные ЭТ эксплуатируемого объекта
Calculated data of maintainability of an operational object

$i(s)$	Ожидаемая трудоёмкость ТОиР, чел.-ч									
	10 ч	20 ч	30 ч	40 ч	50 ч	60 ч	70 ч	80 ч	90 ч	100 ч
1	0,3	1,2	2,4	4,0	5,7	7,6	9,6	11,6	13,7	15,8
2	1,3	2,7	4,1	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,7	14,1
3	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,1	26,4	29,7	33,0
1	6	10,9	14,9	18,4	21,5	24,4	27,0	29,5	32,0	34,3
2 (+10)	2,5	3,9	5,3	6,8	8,2	9,6	11,0	12,4	13,9	15,3
3 (+30)	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,1	26,4	29,7	33,0
1 (+30)	0,3	1,2	2,4	4,0	5,7	7,6	9,6	11,6	13,7	15,8
2 (+30)	1,3	2,7	4,1	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,7	14,1
3 (+30)	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,1	26,4	29,7	33,0

Прибавка к начальному (плановому) значению затрат на ТОиР объекта будет зависеть от его фактического состояния до начала работы на нем, отличного от исправного, при этом непосредственно ожидаемый одношаговый доход q является сравнительным параметром для оценки целесообразности начала работы с целью вывода объекта из данного состояния. Если затраты на ремонт поврежденного объекта ниже ожидаемого одношагового дохода, то данный объект целесообразно отремонтировать до начала эксплуатации.

Полученные значения показывают, какие суммарные трудозатраты мы ожидаем получить, начиная с i состояния и применяя S -вариант действий. Например, начиная работы по 10 исправным объектам и применяя на каждом интервале первый вариант действий, ожидаемые суммарные трудозатраты после 100 ч наработки составят 158 чел.-ч, применяя второй вариант, можем получить 141 чел.-ч. Это соответствует данным, полученным путём компьютерного моделирования процесса эксплуатации 100 объектов.

Сравнительная таблица ожидаемых трудоёмкостей служит для принятия оптимального решения по вариантам действий для заранее определённой наработки изделия. Из таблицы видно, что выбор оптимального варианта действий зависит как от начального состояния, так и от планируемой наработки объекта. Так для исправного объекта, который планируется эксплуатировать 70 часов, оптимальной стратегией уже будет первая, а не вторая.

Если в процессе эксплуатации объекта на каждом интервале имеется возможность смены вариантов действий, тогда применимо рекуррентное соотношение:

$$v_i(n+1) = \min_s \left| q_i^s + \sum_{j=1}^N p_{ij}^s * v_j(n) \right|. \quad (9)$$

Таким образом, исходя из ожидаемых затрат на ТОиР, рекуррентное соотношение позволяет выбрать оптимальный вариант действий в каждом состоянии и на каждом интервале (шаге) наработки объекта.

МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ТРУДОЗАТРАТ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ МАРКОВСКОМ ПРОЦЕССЕ

При анализе и управлении ЭТ объекта, интенсивность отказов которого изменяется по его наработке, целесообразно построить математическую модель, которая достаточно точно описывала бы исследуемый процесс, а количество математических расчётов было бы приемлемым [6].

Первым этапом такой оптимизационной задачи является замена непрерывного характера изменения интенсивности состояния (отказов) объекта на ряд ее дискретных во времени величин (рис. 2).

Разбиение функции распределения показателя надёжности на средние постоянные значения для каждого интервала наработки позволяет перевести непрерывную марковскую модель в дискретную, при этом вероятности смены состояний на каждом шагу будут достаточно точно описываться экспоненциальной функцией распределения:

$$\lambda(n) = f(n); \quad P(n) = [p_{ij}(n)]. \quad (10)$$

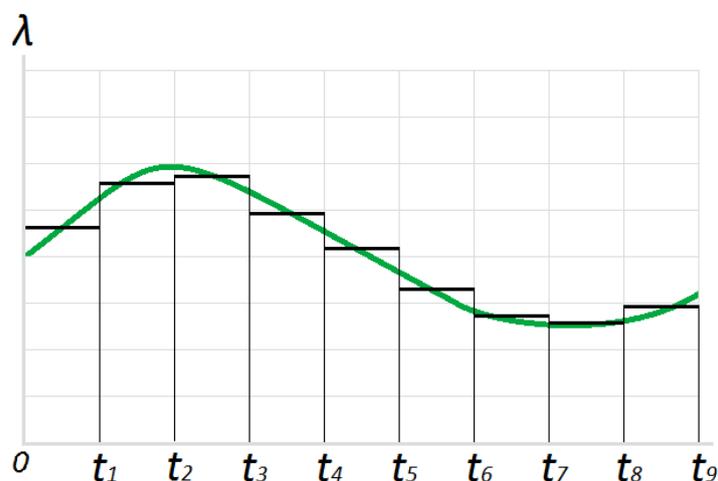


Рис. 2. Разбиение распределения функции интенсивности изменения состояния (отказов) на ряд постоянных значений в заданных интервалах наработки t объекта
Fig. 2. Separation of the distribution function of change intensity of the state (failures) into constants at specified time intervals t

Дискретная связь матрицы вероятностей переходов с интервалом наработки позволяет использовать математический аппарат стационарного марковского процесса для анализа и управления ЭТ объекта с использованием модели нестационарного марковского процесса. В расчётах также следует учесть изменение среднего одношагового дохода на каждом интервале наработки объекта:

$$q_i(n) = \sum_{j=1}^N p_{ij}(n) * r_{ij}. \quad (11)$$

На втором этапе решения задачи применяется условная замена марковский цепи высшего порядка на цепь первого порядка. Алгоритм условной замены заключается в поиске такого шага m , на котором полные ожидаемые затраты будут примерно равны затратам замены объекта при попадании в состояние отказа:

$$v_i(m) = r_{\text{зам}}. \quad (12)$$

Следующий шаг связан с наделением объекта параметрами его начального (исправного) состояния, а полные ожидаемые расходы складываются из расходов, полученных за m шагов и расходов на каждом последующем шаге:

$$v_i(m + 1) = v_i(m) + v_{\text{испр}}(n), n = 1, 2, 3... \quad (13)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования стали V-образные торсионы, установленные в рукавах колонки несущих винтов вертолёта Ка-226. Торсион представляет собой пакет тонких стальных пластин из высокопрочной стали и воспринимает центробежную силу, вертикальный изгибающий

момент при маховом движении лопасти, закручивается при повороте лопасти и нагружается в плоскости вращения [10]. Такие нагрузки приводят к регулярным повреждениям торсиона, характеризующимся разрушением одной или нескольких пластин. При принятой стратегии ТОиР вертолёта допускается его эксплуатация при наличии не более трёх разрушенных пластин в одном рукаве. Если в процессе эксплуатации выявлено разрушение четырёх и более пластин либо разрушение хотя бы одной пластины в зоне крепления торсиона, тогда торсион подлежит замене.

Известны 198 случаев разрушения пластин торсиона, позволяющие сформировать интенсивность наступления такого рода событий по времени наработки (рис. 3).

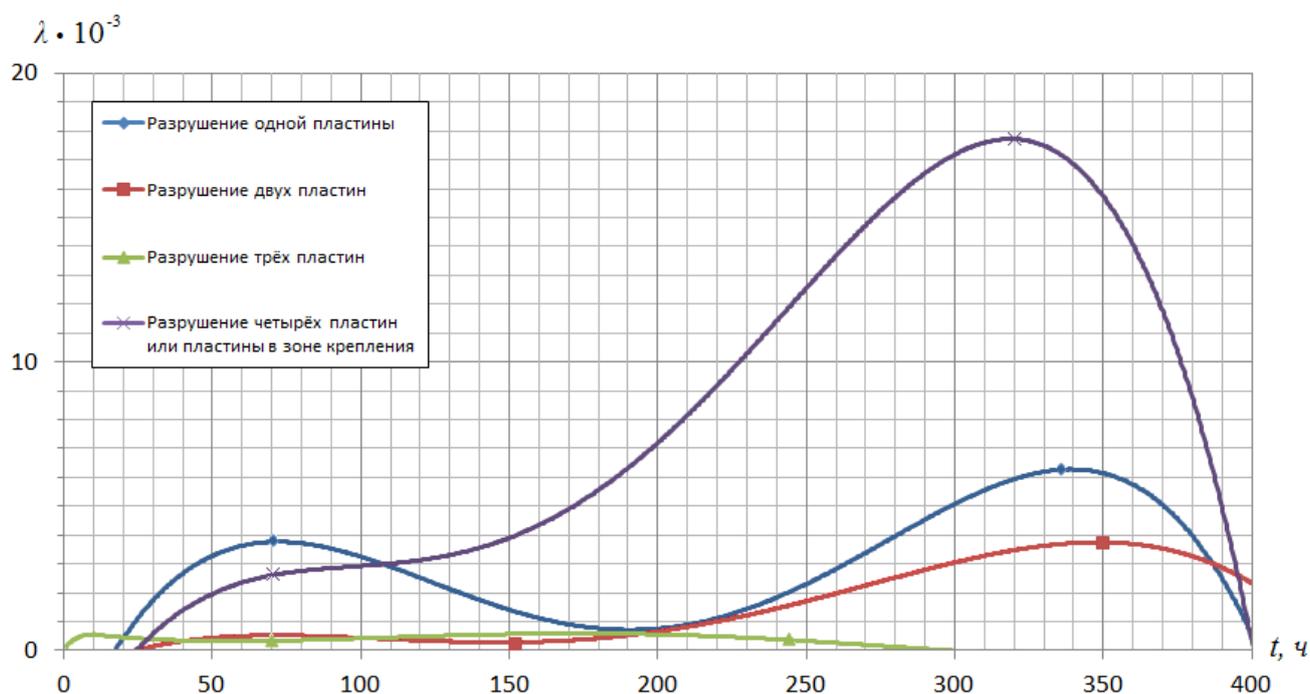


Рис. 3. Зависимость интенсивности отказов различных видов при эксплуатации торсиона от наработки t
Fig. 3. The dependence of the failure rate of different types in the operation of the torsion on the operating time t

Анализ полученных зависимостей интенсивностей отказов различных категорий указывает на необходимость использования нестационарного марковского процесса.

Для оптимизации нестационарного марковского процесса интенсивности отказов аппроксимированы средними постоянными значениями на каждом интервале в 100 часов. Воспользовавшись полученными значениями интенсивностей, находим вероятности каждого события на заданном интервале по формуле (8).

Далее рассчитаны вероятности смены состояний для интересующих нас интервалов наработки, исходя из свойства конечной аддитивности вероятностей [11]:

$$P(A_1 + \dots + A_n) = P(A_1) + \dots + P(A_n). \quad (14)$$

Для исследуемого объекта выбран контролируемый интервал наработки (шаг), равный 10 ч. Результаты расчёта вероятности разрушений пластин на каждом шагу представлены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Вероятность наступления события на каждом шаге в зависимости от интервала наработки
The probability of occurrence of the event at each step depending on the operating time (for every 10 hours of operation with a change every 100 hours)

Событие (состояние)	Вероятность события за каждые 10 ч			
	0-100	100-200	200-300	300-400
1. Исправный	0,9618	0,9386	0,9055	0,8786
2. Разрушение одной пластины	0,0207	0,0188	0,0126	0,0283
3. Разрушение двух пластин	0,0042	0,0051	0,0027	0,0000
4. Разрушение трёх пластин	0,0018	0,0041	0,0150	0,0154
5. Разрушение четырёх и более /в зоне крепления	0,0115	0,0334	0,0642	0,0777

Общий вид матрицы вероятностей переходов составляется, исходя из свойства её стохастичности и принципа накопления отказов объектом:

$$P(n) = \begin{pmatrix} 1 - \sum_{j=2}^5 p_{1j}(n) & p_{12}(n) & p_{13}(n) & p_{14}(n) & p_{15}(n) \\ 0 & 1 - \sum_{j=3}^5 p_{2j}(n) & p_{12}(n) & p_{13}(n) & \sum_{j=4}^5 p_{1j}(n) \\ 0 & 0 & 1 - \sum_{j=4}^5 p_{3j}(n) & p_{12}(n) & \sum_{j=3}^5 p_{1j}(n) \\ 0 & 0 & 0 & 1 - p_{45}(n) & \sum_{j=2}^5 p_{1j}(n) \\ 1 - \sum_{j=2}^5 p_{1j}(n) & p_{12}(n) & p_{13}(n) & p_{14}(n) & p_{15}(n) \end{pmatrix} \quad (15)$$

Замена торсиона в эксплуатации включает ряд дополнительных операций, таких, как демонтаж/монтаж лопасти и рукава несущего винта, в котором торсион установлен. Данная работа выполняется силами трёх специалистов за пять часов (трудоемкость 15 чел.-ч). Построение предварительного распределения ожидаемых трудоемкостей позволяет интервал (шаг), на котором произойдет замена блока и начало наработки нового. Итоговые значения ожидаемых трудоемкостей ТОиР с учетом замены торсиона в течение 400 часов наработки торсиона отражены в табл. 4.

Таблица 4
Table 4

Ожидаемые трудоёмкости ТОиР по достижению наработки объекта
Anticipated factors of manhours of maintenance and repair

Начальное состояние по табл. 3	Ожидаемая трудоёмкость ТОиР, чел.-ч							
	50 ч	100 ч	150 ч	200 ч	250 ч	300 ч	350 ч	400 ч
1	0,9	1,8	4,4	7,1	12,3	15,8	16,7	18,4
2	1	2,1	5	7,9	13,6	16,4	17,5	19,6
3	1,4	2,8	6	9	14,5	16,7	18,1	20,9
4	2,7	5,1	8,6	11,8	16,3	18,9	21,5	24,9
5 (+15)	0,9	1,8	4,4	7,1	12,3	15,8	16,7	18,4

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе исследования значения позволяют рассчитать ожидаемые суммарные затраты на ТОиР как для одного, так и для множества объектов, находящихся в различных состояниях. Суммарные ожидаемые расходы на ТОиР для торсионов в различных состояниях будут складываться из полученных ожидаемых расходов для исправленных торсионов, расходов для торсионов с одной разрушенной пластиной и т.д.

Для модели эксплуатации торсионов, а также в других моделях, в которых имеют место затраты, связанные только с заменой объекта $T_{\text{зап}}$, математический аппарат марковского процесса позволяет рассчитать число запасных частей $n_{\text{зап}}$, необходимых для эксплуатации N изделий в течение заданной наработки:

$$n_{\text{зап}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{T_{\text{зам}}} \quad (16)$$

Для парка из десяти исправных соосных вертолётов, каждый из которых имеет в составе колонки несущих винтов шесть торсионов, количество запасных частей, необходимых для эксплуатации вертолётов в течение 100 ч наработки, составит:

$$n_{\text{зап}} = \frac{1,8 * 6 * 10}{15} \cong 7. \quad (17)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения мероприятий по анализу и снижению затрат на ТОиР летательного аппарата необходимо наглядное представление поведения его объектов во времени. Наглядной и достаточно точной прогнозно-управляемой моделью эксплуатации объекта является марковская цепь, которая позволяет описать вероятностную картину эксплуатации объекта в интервалах времени. Связь вероятностной структуры марковской модели с расходами на ТОиР позволяет провести анализ затрат на ТОиР объекта за заданную наработку, выявить его оптимальную, с

точки зрения минимизации затрат труда, стратегию технической эксплуатации, а также количество необходимых запасных частей для обслуживания объекта. Преимуществом математического аппарата марковских процессов является его универсальность для широкого круга изделий АТ с различными законами распределения надёжности, которые установлены путём аппроксимации результатов испытаний, наблюдений при эксплуатации или взяты из справочных данных.

Представленные методы оптимизации марковских процессов позволяют снизить трудоёмкость математических расчётов, подтверждая адекватность математической модели процесса эксплуатации и обеспечивая приемлемую для практики точность получаемых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ицкович А.А., Смирнов Н.Н.** Управление эффективностью процесса технической эксплуатации самолетов гражданской авиации: учеб. пособие. М.: МИИГА, 1993. 88 с.
2. **Барзилович Е.Ю.** Модели технического обслуживания сложных систем: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1982. 232 с.
3. **Кузнецов В.И., Барзилович Е.Ю.** Надёжность и эффективность в технике: справочник. Том 8. Эксплуатация и ремонт / Под ред. В.И. Кузнецова, Е.Ю. Барзиловича. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
4. **Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М.** Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов: учеб. пособие. М.: Транспорт, 1994. 256 с.
5. **Тихонов В.И., Миронов М.А.** Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.
6. **Ховард Р.А.** Динамическое программирование и марковские процессы / Пер. с англ. В.В. Рыкова, под ред. Н.П. Бусленко. М.: Советское радио, 1964. 189 с.
7. **Шишмарев В.Ю.** Надёжность технических систем: учебник для ВУЗов. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.
8. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации авионики как марковские цепи // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 201. С. 56–64.
9. **Воробьёв В.Г., Константинов В.Д.** Надёжность и техническая диагностика авиационного оборудования. М.: МГТУ ГА, 2010. 488 с.
10. **Далин В.Н., Михеев С.В.** Конструкция вертолётов: учебник. М.: издательство МАИ, 2001. 352 с.
11. **Чжун К.Л., АитСахлиа Ф.** Элементарный курс теории вероятностей. Стохастические процессы и финансовая математика: учебник. 2-е издание / Пер. М.Б. Лагутин, К.Л. Чжун. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 457 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чинючин Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

Соловьев Алексей Сергеевич, ведущий инженер отдела надёжности АО «Камов», soloviev-avia@yandex.ru.

APPLICATION OF MARKOV PROCESSES FOR ANALYSIS AND CONTROL OF AIRCRAFT MAINTAINABILITY

Yuriy M. Chinyuchin¹, Alexey S. Solov'ev²

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

²JSC "Kamov", Moscow, Russia

ABSTRACT

The process of aircraft operation involves constant effects of various factors on its components leading to accidental or systematic changes in their technical condition. Markov processes are a particular case of stochastic processes, which take place during aeronautical equipment operation. The relationship of the reliability characteristics with the cost recovery of the objects allows us to apply the analytic apparatus of Markov processes for the analysis and optimization of maintainability factors. The article describes two methods of the analysis and control of object maintainability based on stationary and non-stationary Markov chains. The model of a stationary Markov chain is used for the equipment with constant in time intensity of the events. For the objects with time-varying events intensity, a non-stationary Markov chain is used. In order to reduce the number of the mathematical operations for the analysis of aeronautical engineering maintainability by using non-stationary Markov processes an algorithm for their optimization is presented. The suggested methods of the analysis by means of Markov chains allow to execute comparative assessments of expected maintenance and repair costs for one or several one-type objects taking into account their original conditions and operation time. The process of maintainability control using Markov chains includes search of the optimal strategy of maintenance and repair considering each state of an object under which maintenance costs will be minimal. The given approbation of the analysis methods and maintainability control using Markov processes for an object under control allowed to build a predictive-controlled model in which the expected costs for its maintenance and repair are calculated as well as the required number of spare parts for each specified operating time interval. The possibility of using the mathematical apparatus of Markov processes for a large number of objects with different reliability factors distribution is shown. The software implementation of the described methods as well as the usage of tabular adapted software will contribute to reducing the complexity of the calculations and improving data visualization.

Key words: Markov processes, Markov chains, maintainability, analysis of maintainability factors.

REFERENCES

1. **Itskovich, A.A. and Smirnov, N.N.** (1993). *Upravlenie effektivnostyu protsessa tekhnicheskoy ekspluatatsii samoletov grazhdanskoj aviatsii: uchebnoe posobie* [Efficiency management of the process of technical operation of civil aviation aircraft: Training manual]. Moscow: MIIGA, the Moscow Institute of Engineers of Civil Aviation, 88 p. (in Russian)
2. **Barzilovich, E.Yu.** (1982). *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh sistem: uchebnoe posobiye* [Models of maintenance of complex systems: Training manual]. Moscow: Vysshaya shkola, Higher school, 232 p. (in Russian)
3. **Kuznetsov, V.I. and Barzilovich, E.Yu.** (1990). *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik. Tom 8. Ekspluatatsiya i remont* [Reliability and efficiency in engineering: Reference book. Vol. 8. Maintenance and Repair]. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 320 p. (in Russian)
4. **Smirnov, N.N. and Chinyuchin, Yu.M.** (1994). *Ekspluatatsionnaya tekhnologichnost letatelnykh apparatov: uchebnoe posobie* [Maintainability of aircraft: Training manual]. Moscow: Transport, 256 p. (in Russian)
5. **Tikhonov, V.I. and Mironov, M.A.** (1977). *Markovskiye protsessy* [Markov processes]. Moscow: Sovetskoe radio, Soviet Radio, 488 p. (in Russian)
6. **Howard, R.A.** (1960). *Dynamic programming and Markov processes*. Transl. from English by V.V. Rikov, ed. by N.P. Buslenko. Moscow: Soviet Radio, 1964, 189p. The MIT Press, 136 p.

7. **Shishmarev, V.Yu.** (2010). *Nadezhnost tekhnicheskikh system. Uchebnik dlya VUZov* [Reliability of engineering systems: Textbook for higher educational institutions]. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», Publ.house "Akademia", 304 p. (in Russian)

8. **Kuznetsov, S.V.** (2014). *Processes and systems of avionics technical operation as Markov chains in mathematical models*. Nauchnyy vestnik MGTU GA, no. 201, pp. 56-64. (in Russian)

9. **Vorobev, V.G. and Konstantinov, V.D.** (2010). *Nadezhnost i tekhnicheskaya diagnostika aviatsionnogo oborudovaniya* [Reliability and technical diagnostics of aeronautical equipment]. Moscow: MGTU GA, the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 488 p. (in Russian)

10. **Dalin, V.N. and Mikheev, S.V.** (2001). *Konstruktsiya vertoletov. Uchebnik* [Helicopter design: Textbook]. Moscow: izdatelstvo MAI, Publ.house of the Moscow Aviation Institute, 352 p. (in Russian)

11. **Chung, K.L. and AitSahlia, F.** (2003). *Elementary Probability Theory. With Stochastic Processes and an Introduction to Mathematical Finance*. 4th ed, Springer-Verlag New York, 404 p. DOI: 10.1007/978-0-387-21548-8

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. Chinyuchin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, the Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

Alexey S. Solov'ev, Leading Engineer of Reliability Department, JSC "Kamov", soloviev-avia@yandex.ru.

Поступила в редакцию 07.10.2019
Принята в печать 23.01.2020

Received 07.10.2019
Accepted for publication 23.01.2020