

УДК 629.734/.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Ю.И. САМУЛЕНКОВ¹, Я.А. ФИЛАТОВА¹, А.Д. ГРУЗД¹

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

Развитие авиационной транспортной системы характеризуется усложнением взаимодействующих объектов, многокритериальностью решаемых задач, трудностями принятия управленческих решений. Например, на современных среднемагистральных воздушных судах устанавливается до 25 000 датчиков контроля работоспособности изделий функциональных систем, применяются многочисленные наземные инструментальные методы и средства оценки технического состояния. Это требует разработки методов, алгоритмов определения и контроля критериев предельного состояния наблюдаемых изделий и функциональных систем авиационной техники. В связи с этим существенное значение приобретают аналитические модели прогнозной оценки технического состояния авиационной техники, расчет режимов технического обслуживания воздушных судов и обеспечения запасными частями и материалами. В работе предложена схема моделирующего алгоритма системы технического обслуживания парка воздушных судов и нахождение оптимального количества состояний воздушных судов математической модели с целью исключения второстепенных и субъективных факторов. Базисом предлагаемой аналитической модели является метод статистического моделирования на основе марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем. Предлагаемый метод сводится к синтезу некоторого моделирующего алгоритма исследуемого процесса, имитирующего поведение и взаимодействие элементов сложной системы и случайных возмущающих факторов. Отличительной чертой представленного алгоритма является определение основных расчетных зависимостей вероятностей и интенсивностей перехода с учетом требований современной нормативной базы по надежности в технике и определения технического состояния. Анализ результатов исследования основных расчетных зависимостей в условиях функционирования системы технического обслуживания воздушных судов подтвердил высокую степень корреляции времени нахождения в состоянии оценки технического состояния в зависимости от диагностической концепции. Предлагаемая имитационная модель может быть использована для прогнозной оценки технического состояния воздушных судов, авиационных газотурбинных двигателей и функциональных систем.

Ключевые слова: техническое обслуживание воздушных судов, имитационное математическое моделирование, слабоформализуемые многокомпонентные системы, минимально допустимая точность диагностирования, техническое состояние, концепция технического обслуживания воздушных судов, марковские и полумарковские процессы.

ВВЕДЕНИЕ

В гражданской авиации России обеспечение летной годности воздушных судов (ВС) осуществляется посредством наземного и технического обслуживания ВС¹. Система технического обслуживания ВС представляет собой множество взаимодействующих между собой объектов обслуживания (летательные аппараты), средств технического обслуживания (средства наземного обслуживания общего и специального применения, инструмент и контрольно-проверочная аппаратура), документацию технического обслуживания (ТО) (программа ТО, руководство по эксплуатации и др.) и исполнителей, поддерживающих и обеспечивающих качество и уровень заданных эксплуатационно-технических характеристик объектов системы ТО ВС². При разработке и утверждении программы ТО ВС, единого документа, определяющего

¹ Воздушный кодекс РФ от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ: Принят Государственной Думой 19 февраля 1997 года: Одобрен Советом Федерации 5 марта 1997 года [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс – справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения: 14.03.2021).

² МТ РФ Приказ от 25.09.2015 № 285 «Об утверждении ФАП "Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим техническое обслуживание гражданских воздушных судов. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридических лиц, индивидуальных предпринимателей»

эффективность системы ТО ВС, необходимо учитывать совершенство конструкции летательного аппарата, эксплуатационную технологичность, режимы ТО ВС, концепцию и методы ТО, квалификацию персонала и др.^{3,4,5,6}

Современные исследователи эргатических систем относят сложные системы «человек – машина» к слабоформализуемым системам и процессам [1]. Математическая модель таких систем включает некоторый алгоритм F вычисления параметров состояния объекта Y по входным детерминированным и стохастическим параметрам U и X , и, следовательно, можно записать $Y = F(X, U)$ [2]. К таким слабоформализуемым системам следует отнести и систему технической эксплуатации (ТЭ) воздушных судов, и техническое обслуживание (ТО) ВС как часть ТЭ.

Таким образом, в связи с отсутствием аналитического математического аппарата для сложных систем «человек – машина» широкое применение нашли вероятностно-статистические модели. Анализ современных подходов к имитационному моделированию систем ТО ВС и их компонентов показывает, что, как правило, такие модели строятся как на основе давно известных и широко применяемых методов системы массового обслуживания, метода динамики средних, алгоритмов на основе марковских процессов [3, 4], так и, например, на основе методологии IDEF3 (Integrated DEFINITION for Process Description Capture Method) и нотации DFD (Data Flow Diagrams) [5].

При статистических подходах к построению моделирующих алгоритмов систем ТО ВС производится агрегатирование некоторого математического моделирующего аппарата и подсистемы, моделирующей детерминированные и вероятностные входные параметры. В этом случае имитация стохастических входных параметров может быть выполнена при помощи случайных чисел [6, 7].

Как правило, эффективность системы ТО ВС реализуется и оценивается через процесс технической эксплуатации (ПТЭ). ПТЭ ВС в общем случае включают в себя летно-техническую эксплуатацию, наземное и техническое обслуживание авиационной техники (АТ), технологические процессы наземного и технического обслуживания, аэродромное обеспечение полетов и технического обслуживания АТ, инженерно-авиационное обеспечение и др. [5, 8].

Широкое распространение при исследовании системы ТО ВС получил марковский процесс с дискретными состояниями системы и непрерывным временем переходов из состояния в состояние системы. Модель ПТЭ представляется следующим образом: состояния ПТЭ задаются через состояния ВС (рис. 2), находятся времена пребывания в состояниях ТО со своими функциями распределения, что позволяет оценивать эффективность режимов ТО ВС. Окончание нахождения в одном из состояний системы характеризуется мгновенным переходом в иное состояние, причем переход в другое состояние можно описать определенной интенсивностью и вероятностью перехода [7, 8]. Таким образом, осуществляется процесс системы ТО ВС в целом. При построении такой модели функционирования сложной многокомпонентной системы ТО ВС в качестве метода исследования может быть использован статистический анализ состояний

телей, осуществляющих техническое обслуживание гражданских воздушных судов, требованиям федеральных авиационных правил"» (Зарегистрировано в Минюсте России 22.10.2015 № 39409) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс – справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187899/ (дата обращения: 14.03.2021).

³ МР-03-001 по одобрению программ ТО ВС, зарегистрированных в государственном реестре гражданских ВС Российской Федерации. Министерство транспорта РФ. Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация), 2014. 35 с.

⁴ АТА MSG-3 Основные положения по разработке требований к плановому техническому обслуживанию самолета. Совместный документ изготовителя и авиакомпании. Изменение 2003.1. 2003, 87 с.

⁵ Эксплуатация воздушных судов. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Часть I: Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. 9-е изд. // ИКАО, 2010. 10 с.

⁶ Летная годность воздушных судов. Приложение 8 к Конвенции о международной гражданской авиации. 11-е изд. // ИКАО, 2010. 230 с.

ВС и переходов реального ПТЭ. При этом статистический анализ ПТЭ выполняется в два этапа. На первом этапе исследуются состояния процесса, а на втором – вложенная цепь, которая образует процесс «моментов перехода». Считается, что вложенная цепь обладает марковскими свойствами, а на состояниях развиваются временные процессы, близкие по структуре к процессам восстановления. На основании этого констатируется факт полумарковости ПТЭ ВС.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ ТО ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Анализ результатов работы математической модели позволяет проследить распределение фонда времени по состояниям процесса технической эксплуатации и оценить трансформацию выбранных показателей эффективности системы ТО ВС.

Для оценки эффективности системы ТО ВС производится выбор показателей, к которым следует отнести среднюю продолжительность технического обслуживания, среднюю трудоемкость технического обслуживания, удельную суммарную продолжительность технических обслуживаний, удельную суммарную трудоемкость технических обслуживаний, коэффициент готовности, коэффициент технического использования, готовность парка объектов и др.^{7,8}

Влияние управленческих и эксплуатационных параметров на эффективность системы ТО ВС за отчетный период, как правило, оценивается по относительным показателям. В этом случае берут отношение показателя за рассматриваемый период к нормируемому показателю. Принцип системного подхода к исследованию эффективности любой системы требует необходимости определения относительной важности рассматриваемых параметров, т. е. определения относительных показателей состояния системы.

Оценить относительную значимость факторов по влиянию на результирующий параметр можно по коэффициенту доминанты, определяемому из соотношения

$$\Theta = \left| \frac{\beta_i}{\beta_{\max}} \right|,$$

где β_{\max} и β_i – максимальный и i -й коэффициенты регрессии стандартизованного вида соответственно.

Вероятностно-статистические модели многокомпонентных систем на основе марковских процессов позволяют оценивать влияние различных мероприятий, в том числе случайных параметров, на изменение значений вероятности P_i нахождения элементов системы в i -м состоянии. Такая методология позволяет проследить изменение располагаемых временных и материальных ресурсов системы ТО ВС в динамике.

Классический подход при планировании численного эксперимента предусматривает выработку концепции создаваемой модели, описание математического аппарата и, наконец, создание электронно-вычислительного продукта [9].

В основу эффективного моделирующего алгоритма системы ТО ВС могут быть положены следующие математические методы: описание марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем (системой дифференциальных уравнений Колмогорова), методы статистических испытаний (Монте-Карло) и логико-комбинаторного анализа [10].

⁷ ГОСТ Р 53863-2010 Воздушный Транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 23 с.

⁸ ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.

Эти методы позволяют с требуемой точностью отразить все особенности поведения реального процесса системы ТО ВС. Схема моделирующего алгоритма исследуемой системы ТО парка воздушных судов представлена на рис. 1.

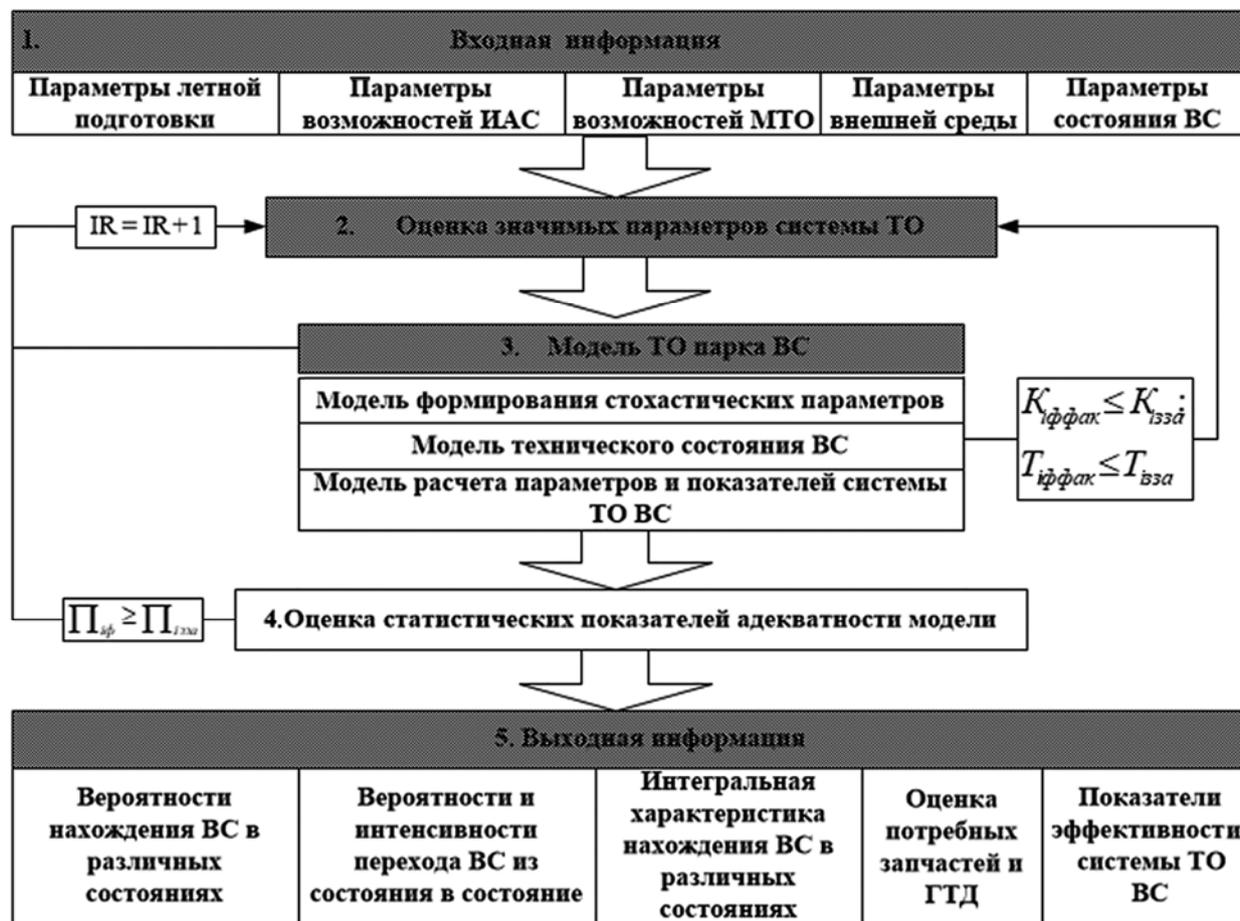


Рис. 1. Схема моделирующего алгоритма исследуемой системы ТО парка воздушных судов
Fig. 1. Modeling algorithm diagram of the aircraft fleet maintenance system under study

При функционировании реальных сложных технических систем смена состояний происходит в моменты времени, заранее неизвестные для наблюдателя. Для описания процедуры взаимодействия таких компонентов часто применяют непрерывную цепь Маркова. В этом случае делается допущение о дискретных состояниях системы и непрерывном времени функционирования системы.

Определение количества состояний ВС исследуемой модели носит, как правило, субъективный характер. При нахождении оптимального количества состояний ВС математической модели и исключения второстепенных факторов предлагается использовать относительный показатель структуры (ОПС), характеризующий долю или удельный вес части совокупности в общем ее объеме:

$$W_i = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^n t_n} \cdot 100 \%,$$

где t_i продолжительность нахождения ВС в i -м состоянии, $\sum_{i=1}^n t_n$ – суммарное время нахождения ВС в n -состояниях.

В случае нахождения значений θ_i одного из состояний ниже пороговых значений, данное состояние следует исключить из модели либо в результате непрерывного контроля «включать» в работу модели при достижении нормируемых значений. Пороговым (нормируемым) значением рекомендуется принимать 5 %.

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТО ПАРКА ВС

Для реализации научно обоснованного подхода к оценке состояний ВС, как правило, разрабатывается топологическая модель системы ТО в виде графа состояний, в которых находится ВС в процессе технической эксплуатации (рис. 2) [10]. Этот граф позволяет проследить в динамике последовательность и частоту попадания ВС в различные состояния.

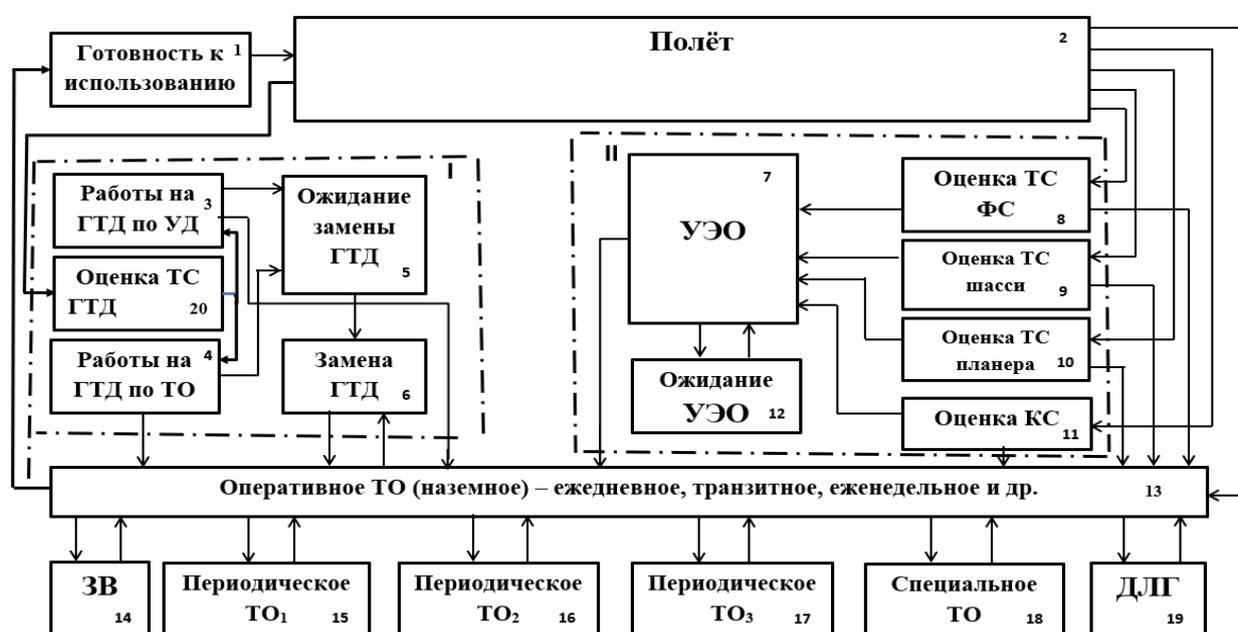


Рис. 2. Граф состояний ВС в процессе технической эксплуатации: I – блок эксплуатационной надежности ГТД; II – блок эксплуатационной надежности ВС; ГТД – газотурбинный двигатель; УЭО – устранение эксплуатационных отказов; ТС – техническое состояние; УД – устранение дефектов; ФС – функциональная система; ЗВ – задержки вылетов по техническим причинам; ДЛГ – директивы летной годности; КС – коррозионное состояние

Fig. 2. Graph for aircraft conditions in the process of technical operation. I – gas turbine engine operational reliability unit, II – aircraft operational reliability unit, EOF – elimination of operational failures, TC – technical condition, DE – defects elimination, FS – functional system, FD – flight delays for technical reasons, AWD – airworthiness directives, CS – corrosion state

Для описания случайного процесса, протекающего в этой системе, применяются вероятности состояний

$$p_1(t), p_2(t), \dots, p_i(t), (*),$$

где $p_i(t)$ – вероятность того, что система S в момент t находится в состоянии S_i :

Очевидно, что любого t

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1.$$

Для нахождения вероятностей (*) необходимо решить систему дифференциальных уравнений (уравнений Колмогорова), имеющих вид

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji}(t)P_j(t) - \sum_{i=1}^n \lambda_{ij}(t)P_i(t) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

Произведение плотности вероятности перехода λ_{ij} из S_i состояния в S_j на вероятность нахождения в S_j называется потоком вероятности перехода из состояния S_i в состояние S_j [10]:

$$\lambda_{ij}P_i(t).$$

Правомерность того, что марковские процессы с непрерывным временем являются частным случаем полумарковских процессов, в которых на независимые функции распределения времени ожидания перехода наложено ограничение по их экспоненциальности [11].

Функция λ_{ij} описывает закон перехода ВС из состояния i в состояние j , и в этом случае она представляет собой условную вероятность перехода при нахождении объекта в состоянии i . Зачастую делают допущение, что переходы между состояниями осуществляются под действием пуассоновских потоков. Тогда эти переходы можно аналитически описать экспоненциальным распределением. Следует отметить, что потоки переходов событий состояний сложной системы в большинстве случаев не будут простейшими. Следовательно, плотности вероятности перехода λ_{ij} являются интенсивностями соответствующих потоков событий, произвольным образом зависящими от времени [11].

Для корректного решения задач построения математических алгоритмов при возникновении мгновенных отказов АТ делается допущение о том, что на небольшом интервале времени Δt протекание процесса в многокомпонентных системах рассматривается как процесс с дискретными состояниями и дискретным временем, трансформация состояний системы происходит с шагом $t = 0, t = \Delta t, t = 2\Delta t, \dots$. Временной шаг задается при решении уравнений состояния системы ТО ВС и ФС с использованием программного обеспечения работы ЭВМ [12].

Обозначим через a_{ij} интенсивности, а через p_{ij} соответственно вероятности перехода из одного состояния в другое. Интенсивность перехода a_{ij} характеризует, с какой скоростью осуществляется переход из одного состояния в другое в единицу времени, а вероятность перехода p_{ij} – с какой вероятностью осуществляется переход из одного состояния в другое:

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} &= \frac{1}{t_i} p_{ij}; \\ a_{ij} &= \frac{1}{t_i}; a_{ji} = \frac{1}{t_j}; \\ \frac{dP_i(t)}{dt} &= \sum_{j=1}^n a_{ji} \cdot p_{ji} \cdot P_j(t) - \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot p_{ij} \cdot P_i(t) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \end{aligned}$$

При рассмотрении элементарных потоков событий, в том числе отказов и повреждений АТ, в многокомпонентных технических системах, очевидно, что время нахождения в состояниях ПТЭ и время перехода t между событиями распределяется по экспоненциальному закону⁹. В этом случае математическое ожидание (среднее значение) времени нахождения в состояниях ПТЭ t равно среднему квадратическому отклонению [13]:

$$M[t] = S_{\bar{t}} = \frac{1}{\lambda}.$$

⁹ ГОСТ 8.381-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения. М.: Стандартинформ, 2020. 17 с.

Стохастические величины ПТЭ (среднее время нахождения в состоянии, параметр потока отказов, налет на отказ и повреждение и др.) для случайного ординарного потока без последствия уже не будут распределены по экспоненциальному закону. Вид этого распределения будет зависеть в первую очередь от времени наступления первого события и, во-вторых, от переменной интенсивности потока $\lambda(t)$. При решении узкого круга исследовательских задач (например, при наложении ограничений на объем и периодичность ТО ВС) можно сделать вполне правомерное допущение о сравнительно медленном изменении функции $\lambda(t)$, и тогда можно говорить об экспоненциальной зависимости распределения времени в заданном диапазоне. Отсюда следует, что в этом случае можно говорить о средних значениях интенсивности $\lambda(t)$ на заданном временном интервале [14]. Для определения времени нахождения в состоянии оценки технического состояния ВС, ФС или отдельных элементов предлагается использовать вероятности точности диагностирования объекта [15, 16, 17, 18].

$$M[t_{от}] = \frac{t_{кр}(1-\alpha) \cdot e^{-\omega_0 t_{п}}}{(1-\alpha \cdot e^{-\omega_0 t_{п}})},$$

где $t_{кр}$ – средняя продолжительность контроля работоспособности; α – условная вероятность «необнаружения отказа» при оценке технического состояния ВС, ФС или отдельных элементов ФС; ω_0 – параметр потока отказов; $t_{п}$ – время нахождения в предыдущем состоянии.

Воздействие стохастических входных параметров на функционирование многокомпонентных систем может вызвать отклонение от средних значений параметров функционирования, что в конечном итоге приведет к искажению результатов эксперимента. В связи с этим необходимо постоянно оценивать точность вычислений при проведении исследований сложных систем с учетом новых, ранее неизвестных, случайных факторов [6].

В математическом аппарате имитационного моделирования сложных слабоформализуемых процессов, как правило, используются определяемые и вероятностные параметры исследуемой системы.

К таким параметрам можно отнести количество самолетов авиационного парка компании, среднесуточный налет на одно ВС, среднюю продолжительность типового полета, режимы ТО ВС, квалификацию инженерно-технического персонала, показатели надежности АТ и др.

В этом случае на основе логико-комбинаторного подхода можно осуществить проектирование системы ТО ВС от концепции создания до построения математической модели исследуемой сложной многокомпонентной системы [7].

Основные расчетные зависимости вероятностей и интенсивностей перехода представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Расчетные формулы вероятностей и интенсивностей перехода
Estimated formulas of transition probabilities and intensities

Вероятности перехода	Интенсивности перехода
$p_{2.8} = 1 - e^{-\frac{t_{п}}{t_{п}}}$	$a_{2.8} = \frac{T_{п}}{t_{п} n_{п}}$
$p_{2.9} = 1 - e^{-\omega_{п} t_{п}}$	$a_{2.9} = \frac{1}{t_{п}}$

Продолжение таблицы 1
Continuation of Table 1

$p_{2.10} = 1 - e^{-\omega_{пл}t_{и}}$	$a_{2.10} = \frac{1}{t_{и}}$
$p_{2.11} = 1 - e^{-\omega_{кв}t_{и}}$	$a_{2.11} = \frac{1}{t_{и}}$
$p_{7.13} = 1 - e^{-\frac{1}{t_{срФС}}}$	$a_{7.13} = \frac{t_{рв}}{T_{в} \cdot n_{п}}$
$p_{2.13} = 1 - p_{13.14} - p_{13.15} - p_{13.16} - p_{13.17} - p_{13.1}$	$a_{2.13} = \frac{1}{t_{и}}$
$p_{1.2} = 1$	$a_{1.2} = \frac{T_{пл}^r \cdot N_{вс}}{K_{год} \cdot K_{и} \cdot t_{срс}}$
$p_{5.6} = 1$	$a_{5.6} = \frac{1}{t_{ож}}$
$p_{13.1} = 1 - e^{-\frac{1}{t_{срТО}}}$	$a_{13.1} = \frac{1}{t_{срТО}}$
$p_{13.15} = 1 - e^{-\frac{t_{ТО}}{\tau_{ПТО1}}}$	$a_{13.15} = \frac{1}{t_{срТО}}$
$p_{15.13} = 1 - e^{-\frac{t_{ПТО1}}{\tau_{ПТО1}}}$	$a_{15.13} = \frac{t_{пто1}}{T_{пто1} \cdot n_{пто1}}$
$p_{13.16} = 1 - e^{-\frac{t_{ТО}}{\tau_{ПТО2}}}$	$a_{13.16} = \frac{1}{t_{срТО}}$
$p_{13.17} = 1 - e^{-\frac{t_{ТО}}{\tau_{ПТО3}}}$	$a_{13.17} = \frac{1}{t_{срТО}}$
$p_{13.1} = 1 - p_{13.14} - p_{13.15} - p_{13.16} - p_{13.17} - p_{13.1}$	$a_{13.1} = \frac{1}{t_{срТО}}$
$p_{8.7} = 1 - e^{-\frac{t_{диагн}}{\tau_{диагн}}}$	$a_{8.7} = \frac{1}{t_{срфс}}$
$p_{7.13} = 1 - p_{8.7} - p_{9.7} - p_{10.7} - p_{11.7} - p_{12.7}$	$a_{7.13} = \frac{t_{рв}}{T_{в}}$

В табл. 1 элементы формул означают [18, 19]: $\omega_{фс}$ – параметр потока отказов функциональных систем (планера, шасси и др.); $t_{и}$ – использование ВС по назначению (полет); $T_{н}$ – налет за рассматриваемый период, час; $t_{н}$ – налет на отказ в полете, час; $n_{п}$ – рассматриваемый период, дней. $t_{рв}$ – календарный период рабочего времени; $T_{в}$ – математическое ожидание технологической продолжительности одного восстановления работоспособного состояния изделия ВС после отказа, час; $t_{срФС}$ – среднее время нахождения на оценке технического состояния ФС; $t_{пто}$ – нормативная продолжительность периодического ТО, час; $t_{срТО}$ – среднее время на оперативном ТО; $T_{пто}$ – математическое ожидание технологической продолжительности периодического ТО, час; $n_{пто}$ – календарный период данного вида ТО, дней; $t_{диагн}$ – время нахождения на диагностике, час; $\tau_{диагн}$ – трудозатраты на диагностирование, чел-час.

Для реализации функционирования предложенной имитационной модели системы ТО ВС в качестве источников эксплуатационной информации необходимо использовать статистические данные эксплуатантов авиационной техники, организаций по ТО ВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований:

Предложено оценивать относительную значимость факторов системы ТО ВС по влиянию на результирующий параметр по коэффициенту доминанты.

Представленная в работе концептуальная схема исследуемой системы ТО парка воздушных судов позволяет построить моделирующий алгоритм.

Разработанный граф состояний ВС в процессе технической эксплуатации дает возможность проследить в динамике последовательность и частоту попадания ВС в различные состояния и на его основе создать математическую модель системы ТО ВС.

Для определения времени нахождения в состояниях оценки технического состояния ВС, ФС или отдельных элементов предлагается использовать вероятности точности диагностирования объекта.

Предложены расчетные зависимости вероятностей и интенсивностей при переходе из состояния в состояние для построения математической модели функционирования системы ТО ВС.

Таким образом, предлагаемый подход к имитационному моделированию слабоформализуемых современных систем ТО ВС позволяет создать математическую модель на основе марковских процессов, которая способна давать прогнозную оценку технического состояния ВС и изделий функциональных систем, выявлять наименее надежные элементы функциональных систем, определять режимы ТО, рассчитывать потребную трудоемкость ТО ВС.

Результаты исследования рекомендуется использовать на авиационных предприятиях, в организациях по ТО ВС, разработчикам и изготовителям авиационной техники на этапах проектирования, производства и эксплуатации ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щербатов И.А.** Управление слабоформализуемыми многокомпонентными системами на основе агентных технологий: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Астрахань, 2015. 32 с.
2. **Растринин Л.А.** Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
3. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации бортовых комплексов и функциональных систем авионики // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 132–140.
4. **Герасимова Е.Д., Смирнов Н.Н., Ойдов Н.** Влияние надежности функциональных систем на эффективность технической эксплуатации воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 45–52.
5. **Киселев Д.Ю., Киселев Ю.В.** Комплексный подход к моделированию процессов технического обслуживания авиационной техники // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 33–40.
6. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
7. **Ицкович А.А., Алексанян А.Р., Файнбург И.А.** Построение математической модели процессов технической эксплуатации авиационной техники как замкнутой системы массового обслуживания // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 46–52.
8. **Ицкович А.А., Кабков М.А.** Вероятностно-статистические модели: учеб. пособие. Ч. 2. М.: МГТУ ГА, 2005. 118 с.
9. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 343 с.
10. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
11. **Емелин Н.М.** Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 128 с.
12. **Акоф Р., Сасиени М.** Основы исследования операций. М.: Мир, 1971. 534 с.

13. Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1978. 112 с.
14. Лычкина Н.Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах // Новые информационные технологии: тезисы XIV Международной школы-семинара, 2006. Т. 1. С. 64–73.
15. Мачалин И.А., Конахович Г.Ф., Ткалич О.П. Аппроксимация одного класса случайных процессов в задачах контроля радиоэлектронных систем // Материалы IV международной научно-технической конференции «АВИА-2002». Киев, 2002. С. 67–69.
16. Бронников А.М., Морозов Д.В. Динамика технического состояния необслуживаемой в межрегламентный период бортовой системы летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 152–158.
17. Мачалин И.А. Математические модели стратегий технического обслуживания современной авионики // Математические машины и системы. 2005. № 2. С. 130–139.
18. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет. В.С. Авдусевский (пред.) и др. Т. 3: Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
19. Фадеев Ю.М., Дондорев М.С. Математическое моделирование процессов технической эксплуатации летательных аппаратов в подготовительной фазе их эксплуатации при боевой подготовке и длительном ведении боевых действий // Отчет о НИР ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1997. С. 27–66.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самуленков Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, yu.samulenkov@mstuca.aero.

Филатова Яна Александровна, студентка 3 курса МГТУ ГА, yanafilatova787@yandex.ru.

Грузд Антон Дмитриевич, ассистент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, a.gryzd@mstuca.aero.

AIRCRAFT MAINTENANCE SYSTEM SIMULATION MATHEMATICAL MODEL CONSTRUCTION

Yuri I. Samulenkov¹, Yana A. Filatova¹, Anton D. Gryzd¹
¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Moscow, Russia*

ABSTRACT

The development of the aviation transport system is characterized by sophistication of interacting objects, the multi-criteria nature of the tasks to be solved and difficulties in making management decisions. For example, modern medium haul aircraft are fitted with up to 25,000 sensors to monitor the performance capabilities of functional systems components. Numerous ground-based instrumental methods and means of diagnosing the technical condition are used. This requires the development of methods and algorithms for determining and monitoring the criteria of limiting state of the monitored components and functional systems of aeronautical equipment. In this regard, analytical models of predictive estimate for the technical condition of aeronautical equipment, determination of aircraft maintenance modes and provision of spare parts and materials become essential. The paper proposes a scheme of the aircraft fleet maintenance system modeling algorithm and deducing the mathematical model of the optimal number of aircraft states in order to exclude secondary and subjective factors. The method of statistical modeling based on

Markov processes with discrete states and continuous time is the basis of the proposed analytical model. The proposed method is reduced to the synthesis of some modeling algorithm of the investigated process that simulates the complex system components behavior and interaction as well as random perturbing factors. A distinctive feature of the presented algorithm is determination of the predominant estimated dependences of transition probabilities and intensities taking into account the requirements of the modern regulatory framework in terms of reliability of equipment and diagnosing the technical condition. The analysis of the predominant estimated dependencies study results in the conditions of operation of the aircraft maintenance system confirmed a high degree of correlation of the time duration effect on the particular states in order to diagnose the technical condition depending on the diagnostic concept. The proposed simulation model can be used for the aircraft technical condition predictive estimate, aircraft gas turbine engines and functional systems.

Key words: aircraft maintenance, simulation mathematical modeling, weakly formalized multicomponent systems, minimum permissible diagnostic accuracy, technical condition, aircraft maintenance concept, Markov and semi-Markov processes.

REFERENCES

1. **Shcherbatov, I.A.** (2015). *Upravleniye slaboformalizuyemyimi mnogokomponentnymi sistemami na osnove agentnykh tekhnologiy: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Weak-focusing multi-component systems management based on agent technologies Doctor of Technical Sciences Dissertation Abstract]. Astrakhan, 32 p. (in Russian)
2. **Rastrigin, L.A.** (1981). *Adaptatsiya slozhnykh sistem* [Complex systems adaptation]. Riga: Zinatne, 375 p. (in Russian)
3. **Kuznetsov, S.V.** (2017). *Mathematical models of processes and systems of technical operation for onboard complexes and functional systems of avionics*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 132–140. (in Russian)
4. **Gerasimova, E.D., Smirnov, N.N. and Oidov, N.** (2017). *The effect of reliability of functional systems on the efficiency of the technical operation of the aircraft*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 45–52. (in Russian)
5. **Kiselev, D.Yu. and Kiselev, Yu.V.** (2015). *An integrated approach for modelling of aircraft maintenance processes*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 219 (9), pp. 33–40. (in Russian)
6. **Buslenko, N.P.** (1968). *Modelirovaniye slozhnykh sistem* [Complex systems modeling]. Moscow: Nauka, 356 p. (in Russian)
7. **Itskovich, A.A., Aleksanyan, A.R. and Feinburg, I.A.** (2015). *The construction of mathematical model of processes of maintenance of aircraft engineering as a closed service system*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 219 (9), pp. 46–52. (in Russian)
8. **Itskovich, A.A. and Kabkov, M.A.** (2005). *Veroyatnostno-statisticheskiye modeli: uchebnoye posobiye. Chast 2* [Probability and statistical models. Training manual. Part 2]. Moscow: MSTU GA, 118 p. (in Russian)
9. **Sovetov, B.Ya. and Yakovlev, S.A.** (2001). *Modelirovaniye system: uchebnyk dlya VUZ* [Modeling of systems: Textbook for Universities]. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow: Vysshaya shkola, 343 p. (in Russian)
10. **Wentzel, E.S.** (1972). *Issledovaniye operatsiy* [Operation research]. Moscow: Sovetskoye radio, 552 p. (in Russian)
11. **Emelin, N.M.** (1995). *Otrabotka sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya letatelnykh apparatov* [Development of aircraft maintenance systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 128 p. (in Russian)
12. **Akof, R. and Sasieni, M.** (1971). *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of operations research]. Moscow: Mir, 534 p. (in Russian)
13. **Gorsky, V.G., Adler, Yu.P. and Talalay, A.M.** (1978). *Planirovaniye promyshlennykh eksperimentov* [Industrial experiments planning]. Moscow: Metallurgiya, 112 p. (in Russian)
14. **Lychkina, N.N.** (2006). *Sovremennyye tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya i ikh primeneniye v informatsionnykh biznes-sistemakh* [Modern technologies of simulation modeling and

their application in information business systems]. *Novyye informatsionnyye tekhnologii: tezisy XIV Mezhdunarodnoy shkoly-seminara* [New Information Technologies: Abstracts of the XIV International School-Seminar], vol. 1, pp. 64–73. (in Russian)

15. Machalin, I.A., Konakhovich, G.F. and Tklich, O.P. (2002). *Approksimatsiya odnogo klassa sluchaynykh protsessov v zadachakh kontrolya radioelektronnykh sistem* [Approximation of one class random processes in the problems of radio-electronic systems control]. *Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «AVIA-2002»* [Proceedings of the IV international scientific and technical conference "AVIA-2002"]. Kiev, pp. 67–69. (in Russian)

16. Bronnikov, A.M. and Morozov, D.V. (2017). *Process of changes of maintenance-free onboard system operational status between scheduled maintenances*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 152–158. (in Russian)

17. Machalin, I.A. (2005). *Matematicheskiye modeli strategiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya sovremennoy avioniki* [Mathematical models of maintenance strategies for modern avionics]. *Matematicheskiye mashiny i sistemy*, no. 2, pp. 130–139. (in Russian)

18. Avduevsky, V.S. and others. (Eds.). (1988). *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik v 10 tomakh* [Reliability and efficiency in engineering]. T. 3: *Effektivnost tekhnicheskikh system* [Vol. 3: The effectiveness of technical systems], in Utkin V.F., Kryuchkov Yu.V. (eds.), 328 p. (in Russian)

19. Fadeev, Yu.M. and Dondorev, M.S. (1997). *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov tekhnicheskoy ekspluatatsii letatelnykh apparatov v podgotovitelnoy faze ikh ekspluatatsii pri boyevoy podgotovke i dlitelnom vedenii boyevykh deystviy* [Mathematical modeling of the aircraft maintenance during preparation phase of their operation during combat training and long military operations]. *Otchet o NIR VVIA im. N.E. Zhukovskogo*, pp. 27–66. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri I. Samulenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft and Aircraft Engines Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.samulenkov@mstuca.aero.

Yana A. Filatova, 3rd year student of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, yanafilatova787@yandex.ru.

Anton D. Gruzd, Assistant, the Aircraft and Aircraft Engines Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.gryzd@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 30.03.2021
Принята в печать 22.07.2021

Received 30.03.2021
Accepted for publication 22.07.2021