

УДК 519.8, 658.58

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

©2018 С.Ж. Куртаев, В.Д. Еленев, А.Н. Коптев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 10.12.2018

Проведён анализ состояния теории и практики технического обслуживания и ремонта авиационной техники. По результатам выделено, что слабо исследованным или даже нерешенным являются задачи формализации и построения моделей, учитывающих представление объектов контроля и диагностики в качестве элементов сложной сети в соответствии с их физическими свойствами, назначением и переходными процессами, а также модулей блочного типа, в которых блоки являются конструктивными или функциональными компонентами объекта, что характерно для систем бортового комплекса оборудования воздушных судов. В работе предлагается в качестве концептуальной основы для синтеза образов состояний сложных агрегатов и систем бортового комплекса оборудования воздушных судов использование математического аппарата в рамках точного формализма теории образов У. Гренандера. Определены основные компоненты моделей объектов и систем авиационной техники.

*Ключевые слова:* модель, диагностика, автоматические средства контроля, техническое обслуживание, образ, сеть.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов и средств технического обслуживания (ТО) сложных комплексов и изделий машиностроения, в том числе и авиационной техники (АТ), дальнейшее совершенствование организационных структур эксплуатации на основе широкого внедрения информационных технологий и интеллектуальных систем настоятельно требуют разработки как общих, так и частных представлений об изменениях состояний объектов обслуживания в процессе их технической эксплуатации. Появилась необходимость создания систем управления состоянием сложных объектов технического обслуживания нового типа – систем диагностического управления, которая формирует свои управляющие воздействия на основе контроля текущего состояния и его глубокого анализа на базе математической модели, позволяющей одновременно оценивать изменение структуры и процессов, представленных двойственной сетью [1].

На современном этапе развития систем ТО на основе внедрения диагностического управления состоянием объектов обслуживания и упреждающих технологий не сформировано единых подходов и концепций, позволяющих

решить теоретические и практические вопросы синтеза технологических процессов ТО, предотвращающих авиационные происшествия по организационным причинам. В то же время существует большое количество научных направлений, которые связаны с решением конкретных задач, в том числе и в области ТО.

В указанных направлениях исследований процессов технической эксплуатации ВС ГА следует отметить успешные работы отечественных ученых Смирнова Н.Н., Воробьева В.Г., Барзиловича Е.Ю., Сакача Р.В., Мулкиджанова И.К., Ицковича А.А., Андронина А.М., Чинючина Ю.М., Деркача О.Я., Петрова А.Н., Майорова А.В., Фролова В.П., Степанова С.В., Сенника В.Я., Кирина В.В., Дедкова В.К., Громова М.С., Шапкина В.С., Карасева В.Я., часть наиболее важных работ которых аннотирована в работе [2], а также работ зарубежных ученых, перечень которых представлен в монографии Д. Кокса, В. Смита.

На основе функционального моделирования систем и процессов технической эксплуатации ВС ГА разработаны формализованные методы и практические методики формирования эксплуатационно-технических характеристик изделий АТ и режимов их ТО, сформулированных в монографии С.В. Далецкого [3].

Как показали проведенные исследования, для решения определенного круга задач ТО разработано множество моделей, отражающих отдельные аспекты процессов технического обслуживания, практически не связанных в единую обобщенную модель.

Технология ТО развивалась главным образом на основе обобщения опыта эксплуатации.

*Куртаев С.Ж., аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: Sabit5@mail.ru*

*Еленев Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, директор института авиационной техники.*

*E-mail: astra@ssau.ru*

*Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: eat@ssau.ru*

Технологический анализ изменений конструкций и систем воздушных судов (КСВС) строится на основе принятия специалистом решения, формализация которого представляет одну из сторон научного направления и искусственный интеллект. Результаты этого анализа дают лишь частичное решение задач проектирования оптимальных технологических процессов в отсутствие единого математического аппарата. Анализ точности и устойчивости этих процессов проводится в отдельных случаях. Задачи оптимального синтеза процессов упреждающего обслуживания на базе диагностической информации практически не ставились.

Объективной причиной отставания научного уровня упреждающих технологий является исключительная сложность получения формализованного описания технологических процессов ТО с учетом всех аспектов и реализаций с учетом многообразия разнородных явлений и человеческого фактора.

Наиболее широко в настоящий период используются модели описания и решения задач моделирования технологических процессов ТО – это прежде всего линейные модели. Относительная простота линейных моделей привела к широкому их распространению как для описания стационарных, так и нестационарных объектов и процессов. Однако многомерность технологических процессов, невозможность оценки всех параметров этих процессов ограничивают применение стационарных линейных моделей. Для многомерного случая эта модель применяется, если система полностью управляема и наблюдаема. Описание технологических процессов ТО и управления ими стохастическими моделями с применением полных вероятностных характеристик или моментных характеристик случайных функций используется для теоретических исследований этих процессов в многомерном случае и лишь для одномерного случая имеет практическое значение.

Наряду с аналитическими моделями широко применяются экспериментальные методы построения моделей по входным и выходным сигналам объекта, т.е. методы идентификации. Эти методы находят применение в том случае, когда аналитические методы чрезвычайно сложны. Кроме того, методы и теория идентификации в совокупности с существующими методами линеаризации дают возможность описать реальные технологические процессы линейными стационарными моделями. Для построения описания технологических процессов ТО с помощью линейных моделей применяются дисперсионные методы идентификации, методы представления с помощью разложения в ряд, методы кусочной аппроксимации и ряд других, менее распространенных методов. Предложенные ма-

тематические модели и методы лишь частично решают теоретические вопросы создания современных подходов к синтезу технологических процессов на базе широкого использования информационных технологий. Кроме этого, большинство рассмотренных выше моделей и методов применяются в основном при описании непрерывных технологических процессов.

Теоретические методы построения описания дискретных технологических процессов начали широко разрабатываться лишь в последние десятилетия прошлого века.

В последнее время предпринимались попытки построения общей теории управления технологическими процессами ТО на базе языка теории управления. Однако многомерность, нелинейность, наличие большого количества внутренних обратных связей, отсутствие полной информации о взаимосвязи между переменными в динамике не позволяют получить точное математическое описание реального технологического процесса.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Оценка технического состояния сложных системы бортовых комплексов оборудования воздушных судов при их техническом обслуживании может быть сформулирована как задача распознавания образов. Для получения решения в рамках такого подхода прагматика и семантика этой задачи должна быть представлена в формализованном виде. При этом задача становится одновременно и в более абстрактной, и в более строгой форме, чтобы эти условия были выполнены необходимо, прежде всего, ее сформулировать в замкнутой форме.

В наиболее общем виде условия задачи оценки технического состояния систем бортового комплекса оборудования воздушных судов могут быть сформулированы следующим образом. Найти в заданном множестве элементов  $X$  бортовой системы – элемент или комбинацию  $x$  из них, удовлетворяющую множеству ограничений  $K(x)$ , характеризующих состояние этой системы.

Примером такой постановки может служить сформулированная в неявном виде задача оценки технического состояния: «из множества параметров  $x$  выбрать такие, которые для решения этой задачи требуют применения исчисления высших порядков или модальной логики, что, в свою очередь, требует создания интеллектуальной системы, включающую либо специалиста высокой квалификации, либо специалиста, реализующего заданный алгоритм как последовательность заданных действий, который должен быть определен в рамках разрабатываемого ситуационного исчисления.

Для решения таких задач в работе построена логико-лингвистическая модель, позволяю-

щая использовать отношения между формально построенным ситуационным исчислением и той областью действительности (ТО), которая в ней отражается. Метод, посредством которого в ситуационном исчислении удастся погрузить задачи высших порядков (оценка состояния объекта ТО) в рамки логики первого порядка, состоит во введении функциональных аргументов в предикаты.

Предлагаемые ситуационные исчисления оценки состояния ТО может быть представлено следующим образом:

$$TF = (P, D, C, A, O), \quad (1)$$

где TF – ситуационные исчисления, P – множество предикатов, D – множество операторов, C – множество состояний, A – система аксиом, O – множество объектов ТО.

### РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ И ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ТО

Решение задачи оценки технического состояния систем бортового комплекса оборудования воздушных судов при их техническом обслуживании требует разработки методики построения алгоритма оценки.

Для того, чтобы формулировка задачи была содержательной, она должна включать в себя ее адекватное представление на некотором языке. Тогда конкретную задачу можно поставить, если связанные с ней множества, например, состояния сложной системы, который будут адекватно описаны на определенном языке. Эффективность этого языка при описании определенных множеств, в том числе и состояний, требует точного определения этих множеств. Таким образом, содержательная теория решения задачи определения состояния, как распознавания образов сложной системы или ее компонент, должна включать в себя теорию описаний: точные модели и теории, и в связи с наличием специалиста, принимающим заключительные решения по распознаванию состояний (образов) необходим специфический язык отображения состояний.

В настоящее время большинство различных математических методов решения задач распознавания образов распадается на две группы, одну из которых можно трактовать с позиций теории решений (дискриминантный подход), а другую – в рамках синтаксического (или структурного) подхода. В первом подходе объекты характеризуются наборами чисел – результатов некоторого множества измерений, характеризующих объекты, называемые признаками. Распознавание образов (отнесение каждого объекта к некоторому классу) обычно проводят при помощи разбиения пространства признаков на

области. Развитие исследований по распознаванию образов за последнее десятилетие было большей частью связано с дискриминантным подходом и его применениями, также изучаются задачи распознавания образов, в которых важна информация, описывающая структуру каждого объекта, а от процедуры распознавания требуется, чтобы она давала возможность не только отнести объект к определенному классу (классифицировать его), но и описать те стороны объекта, которые исключают его отнесение к другому классу.

В реальном процессе оценки технического состояния сложных систем бортового комплекса, который, как показано выше, связан с мышлением специалиста, язык оценки включает две составляющие, одна из которых представляет установленные связи между элементами, обнаруженные либо самим специалистом, либо сообщенные ему другим специалистом, т.е. оформленные как знания. Но описание процесса образования связей, процесса обнаружения новых связей, получаемых, например, при оценке состояния с ложной технической системы при ее оперативном обслуживании на языке готовых высказываний существенно затруднено. Поэтому необходима реализация другой составляющей, второй язык, состоящий из элементов, позволяющих устанавливать неизвестные ранее отношения, обнаруживать в элементах обслуживаемой системы некоторые новые отношения. Создание такого языка, описывающего экспериментальные и теоретические знания, позволяет воссоздать процесс выявления свойств и признаков объекта технического обслуживания, в рамках некоторой динамики, т.е. эта составляющая общей теории оценки состояния объекта технического обслуживания.

Типичным примером таких задач служит распознавание состояния сложной системы и, как следствие, ее оценки в рамках выполнения требуемых функций. Рассматриваемые классы объектов, как указано выше, очень сложны, и число рассматриваемых признаков, как правило, велико. Это делает привлекательной идею создания интеллектуальной системы на базе специального грамматически формального языка, учитывающего текущее состояние системы и методики построения заключений.

Для решения задачи создания языка теории технического обслуживания требуется разработка формализованной «плекс-грамматики» [4], включающей подобразы с произвольным числом точек примыкания, в которых их можно соединить с другими подобразами. В рамках общей теории синтеза образов У. Гренандера [5] эти подобразы связаны с понятиями «конфигурация», а наиболее общим языком построения такой конфигурации, описывающей техниче-

ской состояние объекта обслуживания на каждом этапе является построение графа состояний в рамках предикатов первого порядка, осуществляющих символизацию обычного языка путем введения в него переменной состояния:

$$P(x, y, \dots) \rightarrow P(x, y, \dots, S), \quad (2)$$

где в общем случае n-местный предикат в соответствии с предлагаемой методикой заменяем на (n+1)-местный, всегда оставляя последнее место для переменной состояния.

Рассуждая неформально, мы можем считать, что описательный язык состоит из множества начальных предикатов и множества связей, или способов комбинирования предикатов, используя которые можно получить портреты описываемых образов. Класс образов, легко описываемых на некотором описательном языке, зависит от самого описательного языка.

Класс образов, элементы которого должны быть описаны, определяется задачей, которая с неизбежностью влечет за собой распознавание элементов образа из этого класса. Тогда основная задача сводится к следующей: «Дан класс образов; создать описательный язык, который допускает краткие и удобные описания всех образов из этого класса».

Сейчас не существует никакого удовлетворительного метода решения таких задач (на самом деле имеются методы решения лишь для очень небольшого количества задач). Однако изучение формальных аспектов этой задачи обнаруживает необходимость создания универсальной модели описательных языков, в которую укладывались бы различные описательные языки. Это позволило бы заменять один язык другим, что необходимо для постановки основной задачи. Дальше мы определим некоторые основные составные блоки обобщенного описательного языка такого типа.

Прежде всего вводится некоторая структура для предикатов этого языка. Предполагается, что каждый из них определяет результат теста, которому подвергается некоторый элемент из области рассуждений. Каждый тест разделяет эту область на непересекающиеся классы эквивалентности: два элемента из области рассуждений называются эквивалентными, если в этом тесте они дают одинаковые результаты. Элементы этого разбиения взаимно однозначно отображаются на множество результатов. Образ каждого элемента разбиения при этом отображении называется именем этого элемента.

Получение исходных данных для оценки технического состояния реализуется в рамках модели системы управления, которая оперирует на основе некоторой стратегии переработки или точнее экстраполяции, т.е. нахождение по ряду данных значений функции других ее значений, выходящих из этого ряда. Разработка мо-

дели экстраполяции является основой оценки технического состояния объекта технического обслуживания.

Стратегия, формируемая в результате работы модели экстраполяции, представляет собой последовательность трансформационных преобразований исходной базовой сферы знаний в базовую сферу знаний, удовлетворяющую поставленной цели. Рассмотрим средства построения базовой сферы знаний.

Модель системы управления, базирующаяся на трех основных понятиях: «управления», «возмущения», «состояние» («ситуация»), недостаточна для решения сложных задач, так как в ней отсутствует подсистема принятия решений, на базе которой, как правило, осуществляется оценка технического состояния.

В большинстве реальных задач множества ситуаций, управлений и возмущений обладают некоторыми дополнительными свойствами. Во многих задачах множества управлений и возмущений «порождаются» более удобными множествами элементов.

Как показывает опыт решения задач оценивания технического состояния, теоретико-множественные модели описания задачи, т.е. структура абстрактных множеств недостаточно богата для изучения какого-либо конкретного метода решения (распознавания образа), а также отсутствуют в наличии эффективные методы разработки более гибких моделей представления объектов ТО. В качестве такой модели для решения задач оценивания состояния объектов ТО в работе предложена сетевая модель, которая позволяет адекватно описать объект ТО и организационную структуру его обслуживания.

Определение сети как множества графов, соответствующих заданному набору ветвей, а также возможность использования одномерной сети с ее набором ветвей, из которых построены различные замкнутые и разомкнутые цепи, определяющие структуру и процессы ее функционирования. По существу это позволяет использовать новый инвариант, введенный А.Е. Петровым [1], который существует не для одной, а для двух двойственных сетей, в которых каждой замкнутой цепи соответствует разомкнутый путь и наоборот. Инвариант представлен закономерностью, отражающей преобразование структуры и, как следствие, процессы, протекающие в ней.

$${}^m C ({}^m C {}^m C)^{-1} {}^m C_t + {}^i A ({}^i A {}^i A)^{-1} {}^i A_t = I, \quad (3)$$

где С и А – матрицы преобразования. Матрицы преобразования связывают также соотношение ортогональности  $C_t = (A)^{-1}$ . Сетевые модели позволяют представить одновременно как процессы, так и структуру сложных систем; инварианты двойственных сетей обеспечивают расчет изменения процессов при изменении структу-

ры систем.

Введенные понятия и определения являются фундаментом универсальной модели описательных языков, в которую укладывается язык, предложенный Пфальцем и Розенфельдом [6]:

$$G = (V_N, V_T, P, S), \quad (4)$$

где  $V_N$  – множество непосредственных элементов (составляющих),  $V_T$  – множество основных символов структуры,  $S$  – множество начальных вербов (вершин),  $P$  – множество правил подстановки непосредственного элемента.

Предложения, порождаемые этим языком – это ориентированные графы, в частности, класс последовательно-параллельных двухполюсников (путей, цепей), например, на рис. 1.

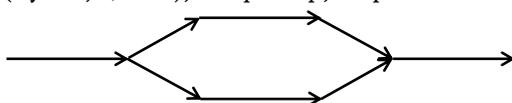


Рис. 1. Двухполюсник или путь (цепь)

Для моделирования изменения в сетях непосредственных составляющих, т.е. погружения новой вершины или присоединения других вершин при изменениях структуры образа объекта, реализуется принцип поиска, использующий дерево решений, который состоит в разбиении начальной задачи  $P_0$  на некоторое число подзадач  $P_1, P_2, \dots, P_k$ . Это разбиение описывается деревом на рис. 2.

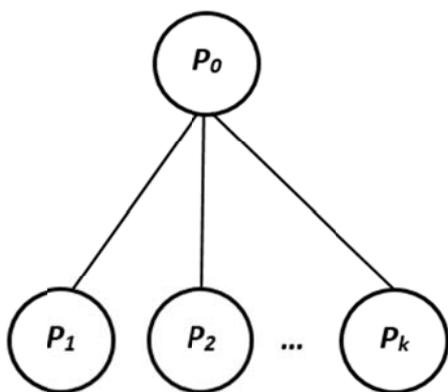


Рис. 2. Дерево решений

На любом этапе распознавание образа (решение задачи  $P_0$ ) представляется множеством подзадач, требующих разрешения или множеством конечных вершин всех цепей, исходящих из корня решений (начальная задача  $P_0$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени основные проблемы построения систем ТО могут считаться достаточно хорошо определенными. Особенно ясно они видны, если исходить из общих возможностей бортовых систем встроенного контроля

и диагностики, а не из того, что представляется желательным разработчике систем ТО. Сказанное отнюдь не означает, что решены все проблемы определения технического состояния ВС. Напротив, сделаны только важные первые шаги как в теории, так и в практике применения этих результатов в авиакомпаниях.

По мнению автором, остаются не исследованными следующие направления создания искусственных языков общения с системами встроенного контроля и диагностики для глубокого понимания процессов, происходящих в бортовых системах с целью прогнозирования их развития. Создаваемые языки должны быть невелики по объему команд и удовлетворять требованиям быстрого освоения.

Должны быть решены теоретические вопросы, связанные с членением предметной области. Создание универсальных средств систем управления состоянием бортовых систем на базе универсальной экспертной системы, функционирующей в рамках универсальной модели описательного языка.

Повышение «интеллектуальности» систем ТО путем применения наиболее сложных математических аппаратов. При этом работа с системой ТО, созданной на этой основе, не должна быть связанной с внутренней сложностью системы.

Данная статья авторов направлена на решение теоретических вопросов повышения «интеллектуальности» систем ТО, в частности, решение задач создания универсальных моделей описательных языков для решения актуального множества задач на базе постановки и решения их в рамках сетевых представлений сложных задач ТО на основе простой модели электрической сети, имеющей двойственный характер.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей. М.: Центр информационных технологий и природопользования, 2007. 496 с.
2. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов. М.: МГТУ ГА, 2015. 579 с.
3. Далецкий С.В. Формирование эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов гражданской авиации. М.: Воздушный Транспорт, 2005. 415 с.
4. Фу К. Структурный метод в распознавании образов. М.: Мир, 1977. 320 с.
5. Гренандер У. Лекции по теории образов. Синтез образов. Том 1. М.: Мир, 1979. 384 с.
6. Кристофидис Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

### REFERENCES

1. Petrov A.E. Tenzornyy metod dvoystvennykh sistem [Tensor method in dual networks]. Moscow: Center

- IT&P, 2007. 496 p.
2. *Smirnov H.H., Chinyuchin Yu.M. Osnovy teorii tekhnicheskoy ekspluatatsii letatel'nykh apparatov [Fundamentals of the theory of aircraft technical maintenance].* Moscow: MGTU GA, 2015. 579 p.
  3. *Daletskiy S.V. Formirovanie ekspluatatsionno-tekhnicheskikh kharakteristik vozdushnykh sudov grazhdanskoj aviatsii [Forming of maintenance-technical features of civil aviation aircrafts]* Moscow: Vozdushnyy transport, 2005. 415 p.
  4. *Fu K.S. Syntactic methods in pattern recognition.* New York and London: Academic Press, 1974. 320 p.
  5. *Grenander U. Pattern synthesis. Lecture in Pattern Theory. V.1.* New-York, Springer-Verlag, 1976. 384 p.
  6. *Nicos Christofides. Graph Theory: An Algorithmic Approach.* Academic Press, Incorporated, 1975. 400 p.

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR EVALUATING THE TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT SERVICE OBJECTS

© 2018 S.Zh. Kurtaev, V.D. Elenev, A.N. Koptev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

In the results highlighted that problems of formalization and modeling which are taking into account presentation of the control and diagnostics objects as complex network elements according to their physical properties, appointments and transients and block type modules, in which blocks are the structural or functional elements of the object, what is typical for aircraft on-board equipment system are poorly researched or unsolved. On the anvil proposed as a conceptual base for the state image synthesis of complex assemblies and systems of aircraft on-board equipment using of mathematical apparatus in frameworks of detailed formalism of the image theory of U.Grenander. The main components of models and objects and aviation equipment systems were determined.

*Keywords:* model, diagnostic control, systems of automatic control, maintenance, pattern, net.

---

*S. Kurtaev, Postgraduate Student of the Department of Aircraft Maintenance. Sabit5@mail.ru*

*Valery Elenev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of Institute of Aeronautical Engineering. E-mail: astra@ssau.ru*

*Anatoly Koptev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Aircraft Maintenance. E-mail: eat@ssau.ru*