

УДК 681.518.3

ББК 32.965.07

**КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ И  
ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ  
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

**Павел Михайлович Брусникин**

**аспирант<sup>1</sup>, очное отделение, 3 курс, М70-306А-18,**

**инженер-конструктор 3 категории<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»;**

**<sup>2</sup>Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» «Центр комплексирования»  
Москва, Россия**

**[Pavel.Brusnikin@ic.irkut.com](mailto:Pavel.Brusnikin@ic.irkut.com)**

**Сергей Олегович Дудкин**

**аспирант<sup>1</sup>, очное отделение, 3 курс, М70-304А-18,**

**инженер-конструктор 3 категории<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»;**

**<sup>2</sup>Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» «Центр комплексирования»  
Москва, Россия**

**[sergey.dudkin@ic.irkut.com](mailto:sergey.dudkin@ic.irkut.com)**

**Евгений Сергеевич Неретин<sup>1,2</sup>**

**кандидат технических наук, доцент**

**<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»;**

**<sup>2</sup>Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» «Центр комплексирования»**

**Москва, Россия**

**e.s.neretin@mai.ru**

В работе рассматривается класс аналитических методов прогнозирования, класс вероятностных методов и методы искусственных нейронных сетей для решения задачи прогнозирования состояния сложных систем на борту ЛА, такие как: математическое моделирование, операторный метод, метод прогнозирования одномерных временных рядов, метод потенциальных функций, метод зон и метод обобщенной точки.

**Ключевые слова:** гражданский самолёт, интегрированная модульная авионика, бортовая система технического обслуживания, распределенная архитектура, бортовое радиоэлектронное оборудование, предиктивные модели.

## **RANGING ANALYSIS OF ANALITICAL AND PROBABILISTIC METHODS OF COMPLEX SYSTEM STATE PREDICTION**

**Pavel Mihajlovich Brusnikin**

**3rd year postgraduate student<sup>1</sup>,**

**design engineer<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University);**

**<sup>2</sup> branch of PAO "Korporacija "Irkut" "Centr kompleksirovanija"**

**Moscow, Russia**

**Pavel.Brusnikin@ic.irkut.com**

**Sergej Olegovich Dudkin**  
**3rd year postgraduate student<sup>1</sup>,**  
**design engineer<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University);**

**<sup>2</sup> branch of PAO "Korporacija "Irkut" "Centr kompleksirovanija"**  
**Moscow, Russia**

**sergey.dudkin@ic.irkut.com**

**Evgenij Sergeevich Neretin <sup>1,2</sup>**

**Candidate of Technical Sciences, associate professor**

**<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University);**

**<sup>2</sup> branch of PAO "Korporacija "Irkut" "Centr kompleksirovanija"**  
**Moscow, Russia**

**e.s.neretin@mai.ru**

The paper deals with analytical prediction methods, probabilistic methods and artificial neural network methods used for solving the problem of predicting the state of onboard complex systems, in particular mathematical modelling, operator method, method of predicting an univariate time series, method of potential functions, zone method and integrated-point method.

**Key words:** civil aircraft, integrated module avionics, onboard maintenance system, distributed architecture, onboard radio equipment, predictive models.

## **Введение**

Развитие отечественной и мировой авиационной промышленности охарактеризовано постоянным темпом наращивания количества и сложности функций, выполняемых отдельными системами на борту летательного аппарата. Всё чаще такие системы представляют собой авиационные комплексы, являющиеся сложными системами. Усложнение систем приводит в целом к увеличению сроков обслуживания и требует внедрения предиктивных моделей, позволяющих проводить непрерывный и периодический контроль

состояния систем, формируя прогноз состояния систем на основе параметрической или статистической информации [Дмитриенко, 2013; Брусникин, 2019].

В работе рассматриваются аналитические методы прогнозирования, вероятностные и методы статистической классификации для решения задачи прогнозирования состояния сложных систем на борту ЛА, такие как: математическое моделирование, операторный метод, метод прогнозирования одномерных временных рядов, метод потенциальных функций, метод зон и метод обобщенной точки.

Среди класса аналитических методов прогнозирования состояния сложных систем выделяют ряд методов, которые способны решить задачу определения протекания процесса на протяжении будущего отрезка времени в конкретной размерности. Среди этих методов: математическое моделирование – метод, основанный на машинном эксперименте, позволяющий предсказать ход процессов, установить сроки контроля системы; операторный метод – позволяет описать большой класс процессов, однако имеет ограничения на точность; метод прогнозирования одномерных временных рядов, который имеет возможность наложения дополнительных условий, повышающих точность прогноза, основан на математическом аппарате теории интерполяции.

В целом перечисленные методы направлены на получение аналитического выражения для описания математической модели исследуемого процесса, однако имеют свои недостатки: не учитывают случайную составляющую влияния на работоспособность и требуют объемное количество изначальной информации об изменении параметров.

Рассматривая прогнозирование на основе статистической классификации, следует обратить внимание на метод зон и метод обобщенной точки, которые позволяют быстро осуществить прогнозирование, но мало применимы для сложных систем и не учитывают случайной составляющей. Также существует метод потенциальных функций – метод обучения распознаванию образов,

основанный на аппроксимации решающей функции с помощью разложения ее в ряд по известной системе функций.

Данные методы предоставляют возможность адаптации и самообучения, использования, как вероятностных моделей, так и детерминированных, однако этим методам необходима выборка данных по объекту одного типа с объектом, показатели которого необходимо прогнозировать. В случае, если выбраны методы статистической классификации, задача прогнозирования сводится к методам распознавания объектов и образов и применением нейросетей [Горлов, Строгонов, Арсентьев, 2008].

### **Классификация методов**

#### **Аналитические методы**

Семейство методов математического моделирования основано на создании моделей системы, математических зависимостей, позволяющих рассчитать будущее состояние объекта. К таким методам следует отнести структурные модели, например, классификационные деревья. Одним из условий использования математического моделирования является изначальное наличие математически описанных зависимостей исследуемых параметров рассматриваемой системы. Также можно построить модель старения системы. Если имеется информация о старении системы, можно определить сроки технического обслуживания. При помощи таких методов можно получить высокую точность прогнозирования при достаточном объеме априорных данных о процессах системы. К минусам подобного метода можно отнести немалый объем вычислений и отсутствие возможности учитывать случайных внешних и внутренних эффектов.

В некоторых случаях имеет смысл операторный метод или метод обобщенного параметра, суть которого в том, что ряд наблюдаемых параметров, описывающий систему, сводится к одномерной функции, затем эта функция рассматривается как искусственный параметр, отображающий в целом работоспособность системы. Однако далее необходимо решить две задачи: определение относительных значений априорных параметров и, собственно,

построение математической модели для обобщенного параметра. Все первичные параметры следует сводить к единой системе счисления, т.е. нормировать. Это позволяет получить ряд безразмерных величин, характеризующих состояние системы и верно использовать их в функции обобщенного параметра.

Метод прогнозирования одномерных и многомерных временных рядов. Семейство методов, основным принципом которого является экстраполяция значений какой-либо величины или величин по уже известным данным, то есть вычисление значений функций за границами ряда известных значений. Входными данными тут являются временные ряды параметров системы в динамике – набор наблюдений определённых числовых характеристик во времени за определенный период.

В эту группу входят методы экстраполяции по экспоненциальной средней и по скользящей средней. Такие методы чаще всего используют для краткосрочного прогнозирования.

Метод экспоненциального сглаживания – метод, при котором прогнозирование величин высчитывается путем средних величин текущего периода и среднего значения, наблюдаемого в предыдущий период. Также учитываются веса наблюдений: недавние значения параметров имеют больший вес перед более давними. Однако, модель должна быть расширена двумя компонентами: с устойчивым трендом и с периодической компонентой, например, модель экспоненциального сглаживания Холта с корректировкой тренда – с двойным сглаживанием.

Стоит учитывать, что увеличение времени прогноза увеличивает степень неопределенности процессов работы системы. По этой причине чаще всего используют статистические методы экстраполяции.

Вероятностные методы

Одним из методов вероятностного прогнозирования является метод статистического градиента. В основе данного метода лежит оценка закономерности приближения определенной величины к границам. Функция

состояния здесь – это многомерный вектор. Выбираются значения параметров и соответствующие приращения, затем составляется сумма векторов приращений. Полученное направление – статистическая оценка прогнозирования [Галушкин, 2010].

Прогнозирование с использованием критерия Байеса. Метод основан на использовании формулы Байеса, т.е. в основе метода лежит теория вероятностей, при помощи которой определяется вероятность наступления того или иного события. Чаще всего рассматривается обобщенная формула, и распознавание события происходит исходя из ряда параметров-признаков. Применение метода сводится к выполнению следующих шагов:

- определить ключевые признаки – параметры, влияющие на работоспособность системы;
- определить вероятность нахождения системы в каждом из трех состояний: без питания, в нормальной эксплуатации и с отказом;
- определить вероятность отказа на определенном участке времени при нормальной эксплуатации;
- определить значения признаков – параметров, при достижении которых наступает событие «отказ» и вероятность достижения этих значений. При этом необходимо учитывать комплексное исследование параметров;
- построить диагностическую матрицу, в которой привести разряды признаков при различных случаях. В эту матрицу включаются априорные показатели вероятности;
- при необходимости нужно скорректировать вероятности признаков;
- выбрать решающее правило и принять решение о диагнозе;
- вычислить вероятность ошибочного решения и доверительную вероятность верного решения.

Метод Байеса позволяет достаточно точно определить вероятность события при определенных признаках. Однако использование теории Байеса имеет один важный недостаток для решения задачи прогнозирования отказов на борту самолета: вероятности редко встречающихся событий, таких как отказ

системы или блока КСЕ, имеют высокие погрешности [Науменко, Кудрявцева, Одинец, 2018].

На данный момент существует еще один класс методов – создание искусственных нейронных сетей (ИНС). Данные методы удобны тем, что существует способность к обучению нейросетей распознавать образы и прогнозировать одномерные и многомерные временные ряды. В прогнозировании участвуют как минимум три слоя нейронов: входной, выходной и скрытый – внутренний слой. На данный момент актуальными моделями остаются авторегрессионная модель: ARIMAX – авторегрессии – скользящего среднего, GARCH – авторегрессионная условная гетероскедастичность и ARDLM – модель авторегрессии и распределённого лага [Галушкин, 2010; Науменко, Кудрявцева, Одинец, 2018]

### **Заключение**

Для решения задачи прогнозирования состояния сложных систем каждый из рассматриваемых методов не полностью позволяет покрыть задачу прогнозирования состояния сложных систем. Для всех методов требуется большой объем априорных данных.

Наиболее подходящим путём является использование метода прогнозирования одномерных и многомерных временных рядов с использованием ИНС. Данное направление является достаточно перспективным. Существует ряд положительных качеств использования ИНС, среди которых масштабирование на различные системы и отсутствие потери работоспособности при неполных априорных данных. Из минусов явно можно выделить по-прежнему необходимость в большом объеме изначальной информации.

### **Библиографический список**

1. *Брусникин П. М.* Разработка архитектуры бортовой системы технического обслуживания с применением концепции распределенной ИМА / П. М. Брусникин, Е. С. Неретин, С. О. Дудкин. ISBN978-5-4465-2536-2 – Текст: непосредственный// Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов



«Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. 2019. Вып. 11. С. 158-159.

2. *Галушкин А. И.* Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 496 с.: ил.

3. *Горлов М. И.* Прогнозирование процесса деградации технических характеристик ИС методом окон с использованием нейронных сетей / М. И. Горлов, А. В. Строгонов, А. В. Арсентьев // Успехи современной радио-электроники. 2008. № 12. С. 73-77.

4. *Дмитриенко А. Г.* Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов : учебное пособие / А. Г. Дмитриенко [и др.]; под ред. Д. И. Нефедьева, Б. В. Цыпина. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. 61, [1] с. : ил.; 21 см. ISBN 978-5-94170-635-8. Текст : непосредственный.

5. *Науменко А. П.* Вероятностно-статистические методы принятия решений : теория, примеры, задачи : учебное пособие / А. П. Науменко, И.С. Кудрявцева, А. И. Одинец. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. 108 с.

## References

1. *Brusnikin P. M.* Development of the architecture of an onboard maintenance system using the concept of distributed IMA / P. M. Brusnikin, E. S. Neretin, S. O. Dudkin. ISBN978-5-4465-2536-2 // All-Russian inter-industry competition of youth scientific works and projects «Youth and the future of aviation and cosmonautics». Abstracts of competition works. 2019. Iss. 11. P. 158-159. (in Russian)

2. *Dmitrienko A. G.* Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов : учебное пособие / А. Г. Dmitrienko [et al]; ed. by D. I. Nefed'ev, B. V. Cypin. Penza: PGU, 2013. 61, [1] p. ISBN 978-5-94170-635-8. (in Russian)

3. *Galushkin A. I.* Neural networks: theory fundamentals. M.: Gorjachaja linija – Telecom, 2010. 496 p. (in Russian)

4. *Gorlov M. I.* Prediction of IS performance degradation using the window technique and neural networks / M. I. Gorlov, A. V. Strogonov, A. V. Arsent'ev // Achievements of modern radio electronics. 2008. № 12. P. 73-77. (in Russian)

5. *Naumenko A. P.* Probabilistic and statistic methods of decision-making: theory, examples, problems: text-book / A. P. Naumenko, I.S. Kudrjavceva, A. I. Odinec. Omsk : OSTU, 2018. 108 p. (in Russian)