

УДК 378::629.7+519.2
DOI 10.20339/AM.07-26.060

В.Т. Калугин,
д-р техн. наук, профессор,
руководитель НУК СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

А.Ю. Луценко,
канд. техн. наук, доцент,
первый заместитель декана факультета СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

И.К. Романова-Большакова*,
д-р техн. наук, доцент,
заместитель декана по магистратуре факультета СМ
e-mail: irina.romanova@bmstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5757-350X>
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ, ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

Рассмотрены новые запросы на формирование компетенций специалистов авиационной и ракетно-космической техники (АиРКТ), связанных с активным использованием методов вероятностного анализа и статистической обработки данных, статистической динамики функционирования ракетно-космических систем. Это важно для решения задач, связанных с разработкой, проектированием и эксплуатацией ракет и ракетно-космических комплексов — например, для оценки надежности изделий, вероятностной оценки динамических свойств конструкции при совместном действии на ее элементы внешних (аддитивных) и параметрических (мультипликативных) вибраций, проведения статистических испытаний. Предложены направления переподготовки специалистов 24 УГСН для углубленного изучения математических методов и использования их в практике разработки и эксплуатации сложных технических объектов АиРКТ.

Ключевые слова: авиационная и ракетно-космическая техника, методы теории вероятности и математической статистики в жизненном цикле изделий АиРКТ, надежность, риски, статистическое моделирование.

TRAINING OF AVIATION AND ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY SPECIALISTS IN THE PRACTICAL USE OF MATHEMATICAL STATISTICS, PROBABILITY THEORY, AND STATISTICAL DYNAMICS

Vladimir T. Kalugin, D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the NUC SM Bauman Moscow State Technical University
Alexander Yu. Lutsenko, Cand. Sci. (Engineering), Docent, First Deputy Dean of the Faculty of SM Bauman Moscow State Technical University
Irina K. Romanova-Bolshakova*, D.Sc. (Engineering), Docent, Deputy Dean for Master's Degree of the Faculty of SM Bauman Moscow State Technical University, e-mail: irina.romanova@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5757-350X>

New requests for the formation of competencies of aviation and rocket and space technology (A&RST) specialists related to the active use of methods of probabilistic analysis and statistical data processing, statistical dynamics of the functioning of rocket and space systems are considered. This is important for solving problems related to the development, design and operation of rockets and rocket and space complexes, for example, to assess the reliability of products, analyze the dynamics of structures under random loads. It is important for solving problems related to the development, design and operation of rockets and rocket and space complexes, for example, to assess the reliability of products, probabilistic assessment of the dynamic properties of a structure under the combined action of external (additive) and parametric (multiplicative) vibrations on its elements, conducting statistical tests, the study of such special phenomena peculiar to aircraft as aeroelasticity. The directions of retraining specialists at 24 UGSN are proposed for in-depth study of mathematical methods and their use in the practice of developing and operating complex technical facilities of A&RST.

Keywords: Aviation and rocket and space technology, methods of probability theory and mathematical statistics in the life cycle of A&RST products, reliability, risks, statistical modeling

Введение

Специалисты в области авиационной и ракетно-космической техники (АиРКТ) находятся на переднем крае науки и техники, призваны решать сложнейшие

задачи в области жизненного цикла изделий, оптимального проектирования, надежности, диагностики и других разделов, которые во многом опираются на интегрированные компетенции как один из главных трендов современной подготовки специалистов [1].

Методы машинного обучения, интеллектуального анализа данных, объяснимого искусственного интеллекта стали неотъемлемой частью современных методов проектирования и эксплуатации сложных технических комплексов в условиях Индустрии 4.0 [2]

В работах авторов настоящей статьи подробно исследованы теоретические и практические аспекты перечисленных направлений и особенности формирования соответствующих компетенций. Анализ показал, что, несмотря на разнообразие методов, подходов, практик, налицо потребность в дальнейшем углублении фундаментальной подготовки специалистов по целому классу математических дисциплин — математической статистике, теории вероятности и статистическое динамике.

Для исследований был выбран цикл проектирования и эксплуатации сложных технических систем, связанный с требованиями обеспечения их надежности [3].

Основная часть

Главные направления исследований о применении математических методов теории вероятности и математической статистики в задачах проектирования

Были выбраны следующие направления исследований, в которых прослеживается устойчивая связь между методами проектирования в авиационной и ракетно-космической отрасли и математическими дисциплинами теории вероятностей и статистики.

1. Оценка надежности компонентов и систем

Инженеры используют статистический анализ для оценки надежности отдельных элементов ракеты и всей системы в целом. Это позволяет предсказывать вероятность отказов оборудования и определять наиболее уязвимые компоненты. Надежность является критически важным фактором в космической технике, поскольку неисправности могут привести к катастрофическим последствиям.

2. Анализ рисков миссии

Статистическое моделирование помогает оценить риски, связанные с различными аспектами космического полета, такими как запуск, полет, стыковка и посадка. Инженеры рассчитывают вероятность успешного завершения каждого этапа миссии и принимают меры для минимизации возможных угроз.

3. Обработка данных телеметрии

Во время запуска и полета ракета передает огромное количество данных, включая показания датчиков температуры, давления, скорости и ускорения. Статистика используется для анализа этих данных, выявления аномалий и принятия решений в режиме реального времени.

4. Оптимизация конструкции

Теория вероятностей применяется для оптимизации конструкции космических аппаратов путем выбора оптимальных материалов и конструкций, учитывая случайные факторы среды эксплуатации. Например, инженеры могут определить оптимальное распределение массы аппарата, чтобы минимизировать риск повреждения при прохождении атмосферы Земли.

5. Оптимизация систем управления и статистическое моделирование

6. Прогнозирование поведения систем

Модели, основанные на статистике и теории вероятностей, позволяют спрогнозировать поведение сложных технических систем в условиях неопределенности. Такие модели помогают выбрать наилучшие решения перед началом реальных испытаний.

7. Управление качеством производства

Контроль качества продукции требует применения методов статистического контроля процессов. Эти методы позволяют выявлять отклонения от нормальных показателей и предотвращать выпуск бракованной продукции, что особенно важно в аэрокосмическом производстве, где даже незначительные дефекты могут иметь серьезные последствия.

Повышение уровня компетенций в области теории вероятностей, математической статистики, статистического моделирования обеспечивает в результате надежность, безопасность и эффективность ракетно-космической промышленности и космических миссий.

Перечисленные направления в данной статье будут детально проанализированы для определения конкретных разделов углубленной подготовки специалистов в области АиРКТ, в том числе для формирования программ дополнительной подготовки.

Проблемы надежности и диагностики

Надежность в РКТ — сложное понятие, которое включает в себя, в частности, отказоустойчивость, безотказность и долговечность. Диагностика в технике — это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [3].

Вероятностная природа показателей надежности. Общей характеристикой показателей надежности является то, что они имеют вероятностную природу и характеризуют вероятность наступления определенного события или выполнения заданных требований. Возможны оценки надежности средним значением контролируемой случайной величины, дополненным доверительными границами. Оценки надежности дают достаточно полное представление о качестве (эффективности) функционирования технического

объекта (системы) в определенных условиях эксплуатации — нормальных условиях. С понятием «надежность» связаны ресурсные испытания.

Для целей изучения надежности сложных изделий и их показателей потребуются такие **базовые сведения из теории надежности и математической статистики**, как:

- ♦ классификация случайных процессов;
- ♦ функции распределения, плотности вероятности;
- ♦ основные характеристики случайного процесса (среднее значение, средний квадрат, математическое ожидание, дисперсия);
- ♦ основные характеристики дискретных случайных процессов;
- ♦ базовые понятия математической статистики (выборочные значения и оценивание параметров);
- ♦ доверительные интервалы.

Особую роль в решении задач надежности и диагностики играют следующие понятия.

1. События. Свойства случайных событий: Несовместность и совместность случайных событий. Независимость и зависимость случайных событий. Условная вероятность. Теория случайных событий с использованием аппарата действий над вероятностями. Расчеты вероятности событий при основном соединении элементов.
2. Вероятностные модели отказов и безотказной работы. Вероятность безотказной работы (ВБР) объекта. Вероятность отказа. Плотность отказов. Статистическая оценка функции вероятности отказа. Интенсивность отказов. Статистически интенсивность отказов. Математическое ожидание ресурса. Вероятность восстановления.
3. Математические (вероятностные) модели надежности. Модели надежности как основные законы распределения времени безотказной работы. Экспоненциальная модель надежности (ЭМН). Модель надежности Рэлея (МНР). Модель надежности Вейбулла (МНВ). Модели внезапных отказов при случайной нагрузке (например, нормально распределенной). Вероятностные модели деградации.
4. Структурно-логические модели надежности систем. Дерево отказов (неисправностей). Состояния, потоки событий и марковский процесс. Граф состояний и дифференциальные уравнения.
5. Вероятностные расчеты при разных видах резервирования систем. Вероятностные расчеты для систем с восстановлением. Вероятностный подход к расчету надежности. Надежность как вероятность случайного события. Доверительные границы надежности. Доверительные границы надежности для высоконадежных элементов.
6. Надежность как качество, развернутое во времени. Функция надежности. Средняя наработка до отказа. Интенсивность отказов. Связь между показателем надежности и коэффициентом безопасности. Форсированные испытания. Надежность как вероятность невыброса случайного процесса за заданный уровень. Применение теории надежности В.В. Болотина.
7. Марковский метод анализа надежности систем. Марковские процессы, потоки событий. Изучение свойств потока событий: стационарность, отсутствие последствия, ординарность. Случайный процесс с дискретным состоянием. Граф состояний системы. Предельные вероятности состояний. Решения системы уравнений Колмогорова.
8. Статистический анализ показателей надежности элементов и систем и статистическое моделирование.

Методика статистической оценки показателей безотказности невосстанавливаемого объекта по наработке до отказа. Подбор закона распределения наработки объекта до отказа.

Методика статистической оценки показателей безотказности восстанавливаемого объекта по интенсивности отказов. Метод статистических испытаний. Моделирование реализаций случайных величин на ЭВМ. Программная реализация моделирования реализаций случайных величин с нормальным законом распределения.

Статистическая динамика

Предметом исследования статистической динамики является поведение различных систем при случайных воздействиях или случайном изменении свойств системы.

Статистическая динамика и теория надежности тесно связаны между собой. При решении каждой конкретной задачи методы статистической динамики и теории надежности обычно применяют последовательно. Поэтому из методических соображений статистическую динамику целесообразно излагать отдельно [4].

Если входные параметры x ($i = 1, m$) и выходные параметры системы y ($j = 1, n$) являются случайными процессами или случайными величинами, то возникает вопрос о связи между соответствующими вероятностными мерами или некоторыми характеристиками системы. Установление этой связи и является предметом исследования статистической динамики. В зависимости от того, какие параметры являются заданными, а какие искомыми, будем различать четыре типа задач статистической динамики.

Первая (основная) задача статистической динамики состоит в нахождении характеристик выходных параметров. Например, даны законы распределения случайных величин $F(x)$ или плотности распределения $f(x)$ и оператор связи (неслучайный) $y(x)$. Требуется определить законы распределения выходных величин для расчетов в практики баллистического спуска и приземления космических аппаратов.

Можно рассмотреть следующие задачи

Двигательная установка космического аппарата в определенный момент времени выдает тормозной импульс, и спускаемый аппарат осуществляет баллистический спуск с орбиты на поверхность Земли, как это схематично показано на рис. 1. При этом дальность места приземления будет случайной величиной.

Вторая задача статистической динамики является обратной по отношению к первой. Она заключается в нахождении характеристик входных параметров по характеристикам выходных параметров системы. Свойства системы (оператор связи) при этом также предполагаются известными. Решение обратной задачи может существенно осложниться, если имеется несколько входных воздействий и если требуется по поведению системы установить статистические характеристики каждого воздействия в отдельности.

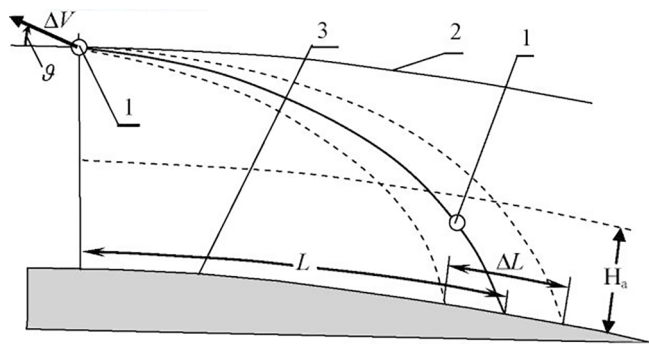


Рис. 1. 1 — спускаемый аппарат; 2 — орбита; 3 — Земная поверхность; L — дальность приземления спускаемого аппарата; ΔL — зона разброса места посадки; ΔV — импульс скорости, необходимый для схода космического аппарата с орбиты; θ — угол наклона вектора скорости тормозного импульса; H_a — высота условной границы атмосферы [4]

Третья задача статистической динамики заключается в определении свойств стохастической (случайной) системы (оператора связи) по известным характеристикам на ее входе и выходе. В самом общем случае может оказаться неизвестной сама структура системы. Изучение свойств неизвестной системы путем сопоставления ее реакций с входными воздействиями составляет так называемую «проблему черного ящика». Однако в столь общей форме задача ставится весьма редко. Обычно известна не только структура системы, но и информация о ее детерминистических свойствах. Тогда целью исследования является получение информации о стохастических свойствах системы. Один из простейших путей для решения третьей задачи состоит в изучении реакций системы на соответствующим образом выбираемые детерминистические воздействия.

Под четвертой задачей статистической динамики понимается отыскание характеристик системы, которая при заданных внешних воздействиях обладает заданными свойствами. Примером может служить задача о синтезе оптимальной системы, т.е. системы, которая обладает наилучшими, в некотором смысле, свойствами. Обычно критерий оптимальности формулируется в виде условия максимума (или минимума) некоторых функционалов от свойств системы и ее реакций на внешние воздействия при дополнительных ограничениях, накладываемых на другие функционалы и параметры. Подчеркнем, что выбор критерия для оптимизации не входит в задачу статистической динамики. Такой критерий выбирается на основе экономических, технологических и тому подобных соображений, и притом может выбираться не единственным образом. Один из путей для выбора критерия оптимальности открывает теория надежности, на основе которой формулируются обобщенные вероятностные критерии — например, обобщенные критерии эффективности космической системы наблюдения.

Если основная (первая) задача статистической динамики решена, то, как правило, результаты могут быть использованы для решения остальных задач. Таким образом, целесообразно сосредоточить внимание на решении основной задачи.

Выбор метода для решения задач статистической динамики в существенной степени зависит от характера системы. Классификацию ее можно провести по различным признакам. Остановимся на некоторых из них.

Методы решения задач статистической динамики

В настоящее время разработано несколько методов решения задач статистической динамики, которые применяют в зависимости от конкретных свойств системы и постановок задач. Ограничимся только перечислением этих методов:

- ◆ метод функций Грина;
- ◆ метод дифференциальных уравнений;
- ◆ метод спектральных представлений;
- ◆ метод, использующий теорию марковских процессов;
- ◆ интерполяционный метод;
- ◆ метод статистических испытаний (метод Монте-Карло);
- ◆ метод статистической линеаризации и др.

Имитационное моделирование

Это метод научного исследования систем, для которого характерно воспроизведение (на ЭВМ) процессов функционирования элементов системы с сохранением их алгоритмов, причинно-следственных связей, последовательности протекания и вероятностного характера.

Так, в процессе имитации с помощью генератора случайных чисел «разыгрываются» моменты наступления и виды отказов некоторых элементов и проверяются условия работоспособности системы в этот момент. Если существующие отказы элементов не нарушают условий работоспособности системы, то разыгрываются очередные отказы. Наряду с моделированием отказов имитируются процессы восстановления отказавших элементов. В процессе имитации отслеживаются и фиксируются определенные события и состояния системы (наработка до отказа, продолжительность восстановления и др.), по которым оцениваются показатели надежности системы.

При создании имитационной модели могут быть учтены:

- ◆ структура исследуемой системы и возможности ее модификации;
- ◆ различные режимы функционирования системы и их характеристики;
- ◆ условия, накладываемые на зависимость отказов элементов.

В имитационной модели могут быть реализованы произвольные вероятностные закономерности: надежностных свойств элементов; воздействий на систему.

Поэтому стандарты определяют имитационное моделирование в качестве наиболее универсального метода исследования надежности систем.

Пример обработки результатов статистического моделирования представлен на рис. 2 и иллюстрирует решение задачи статистического имитационного моделирования поведения летательного аппарата вследствие обледенения [5].

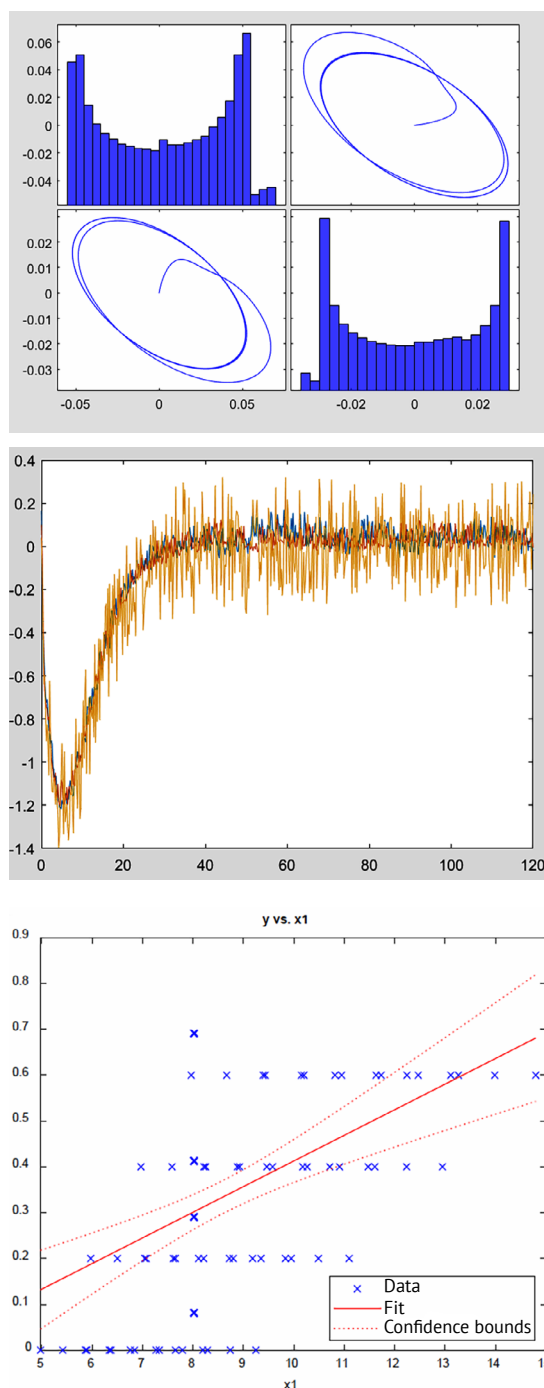


Рис. 2. Примеры статистического имитационного моделирования для диагностики повреждений ЛА

Проблемы оптимального многокритериального проектирования

Проблемы оптимального проектирования сложных технических систем рассмотрены в работе авторов настоящей статьи [6].

Для сложных технических объектов, к которым относятся изделия АиРКТ, характерно наличие факторов неопределенности [7; 8]. Поэтому представляют интерес некоторые общие принципы параметрической оптимизации в условиях неопределенности обстановки. Рассмотрим математическую модель объекта оптимизации:

$$y = F(x, \xi),$$

включающую неопределенный вектор ξ . В этих условиях с методологической точки зрения целесообразно различать три основные ситуации:

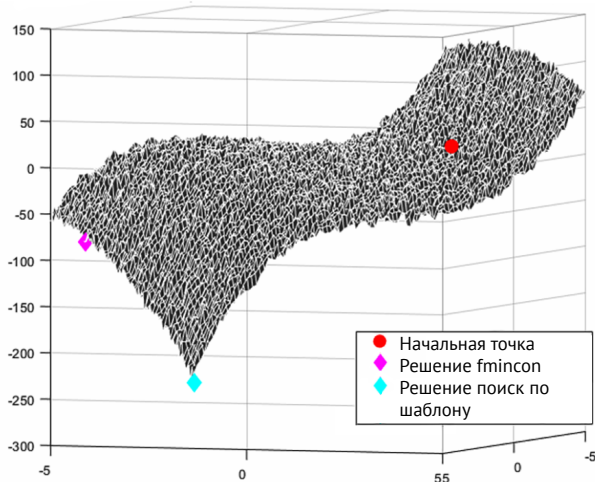
- 1) ξ случайный вектор с известным законом распределения; вектор выходных параметров y реализуется многократно для различных значений вектора;
- 2) вектор y реализуется однократно при заранее неизвестном векторе ξ ;
- 3) выходные параметры реализуются многократно; вектор ξ изменяется неизвестным образом, но не носит случайный характер либо статистические характеристики ξ оказываются неизвестными.

Рассмотрим задачу оптимального проектирования.

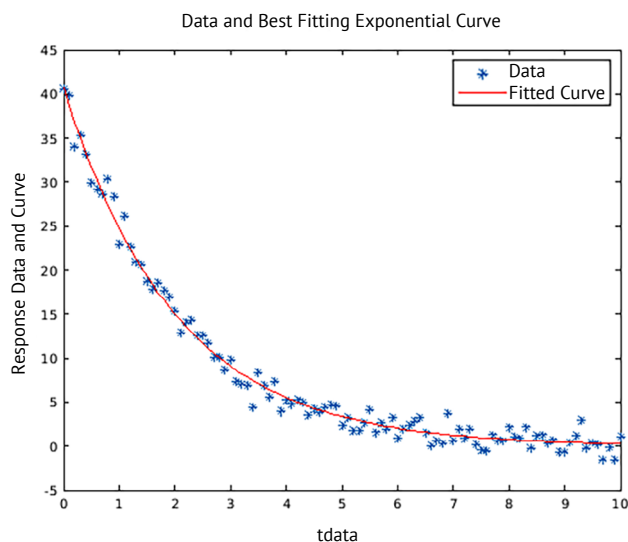
Тогда первый случай характерен для анализа технологического разброса параметров при серийном производстве продукции. Проектирование уникальных изделий приводит ко второму типу неопределенности. Третий вариант возникает при моделировании влияния неконтролируемых параметров внешней среды, определяющих условия эксплуатации объекта. На практике возникают и более сложные ситуации. Например, часть компонент вектора ξ может носить случайный характер с известными законами распределения, а некоторые компоненты могут меняться непредсказуемым образом, но не обладать свойством статистической устойчивости.

Процесс стохастической оптимизации – это процесс решения задач оптимизации, в которых присутствуют элементы случайности или неопределенности. В отличие от детерминированных методов оптимизации, которые предполагают наличие точной информации обо всех параметрах задачи, стохастические методы учитывают вероятностный характер данных или функций. Принцип стохастической оптимизации – использование случайных выборок для оценки функции цели и ограничения. Это позволяет проводить поиск оптимального решения даже в случаях, когда точные значения функции неизвестны или трудновычислимы. Процесс стохастической оптимизации приведен на рис. 3.

Минимум стохастической целевой функции с помощью поиска по шаблону patternsearch

Рис. 3. Процесс стохастической оптимизации (<https://docs.exponenta.ru/gads/noisy-objective-function.html>)

Регулярные, или детерминированные оптимизационные методы спуска неполноценны на неупорядоченном рельефе. Если экстремумов много, то спуск из одного начального приближения может сойтись только к одному из локальных минимумов, необязательно абсолютному. Кроме того, с ростом размерности задач резко снижается эффективность регулярных методов поиска, которые требуют очень больших вычислительных ресурсов. Поэтому иногда для исследования таких сложных задач применяют случайный поиск. Пример приведен на рис. 4.

Рис. 4. Пример применения метода случайного поиска (<https://docs.exponenta.ru/matlab/math/example-curve-fitting-via-optimization.html>)

Проблемы прогнозного обслуживания

Прогнозное обслуживание (предиктивное обслуживание, Predictive Maintenance, PdM) – это подход к техобслуживанию оборудования, который основывается на прогнозировании состояния техники с использованием данных о ее работе. В отличие от традиционных методов, таких как плановое обслуживание или обслуживание по фактическому состоянию, предиктивное техобслуживание стремится предсказать, когда и где произойдет поломка, чтобы предотвратить ее до наступления [2].

Одна из важнейших задач прогнозного обслуживания – прогнозируемый оставшийся срок полезного использования (RUL) – ожидаемый срок службы, или время использования, оставшееся до того момента, когда машина потребует ремонта или замены. Прогнозирование оставшегося срока службы на основе системных данных является основной целью алгоритмов профилактического обслуживания.

Как правило, оценка RUL технической системы выполняется на основе разработанной модели, которая может выполнять оценку на основе изменения во времени или статистических свойств значений индикаторов состояния. Прогнозы, полученные с помощью таких моделей, являются статистическими оценками с соответствующей неопределенностью. Разрабатываемая модель использует изменение значений индикаторов состояния во времени для прогнозирования RUL.

Модели деградации экстраполируют прошлые данные, чтобы предсказать будущее состояние. Этот тип расчета RUL соответствует линейной или экспоненциальной модели профиля деградации индикатора состояния с учетом профилей деградации в вашем наборе данных. Затем он использует профиль деградации тестируемого компонента, чтобы статистически вычислить оставшееся время до достижения индикатором заданного порога. Эти модели наиболее полезны, когда известно значение индикатора состояния, указывающее на отказ. Доступны два типа моделей деградации:

Линейная модель деградации (LinearDegradation-Model) – описывает поведение деградации как линейный стохастический процесс с коэффициентом смещения. Линейные модели деградации полезны, когда ваша система не подвержена кумулятивной деградации.

Экспоненциальная модель деградации (Exponential-DegradationModel) – описывает поведение деградации как экспоненциальный стохастический процесс со смещением. Экспоненциальные модели деградации полезны, когда тестируемый компонент подвергается кумулятивной деградации.

Классификация методов оценки RUL приведена на рис. 5.

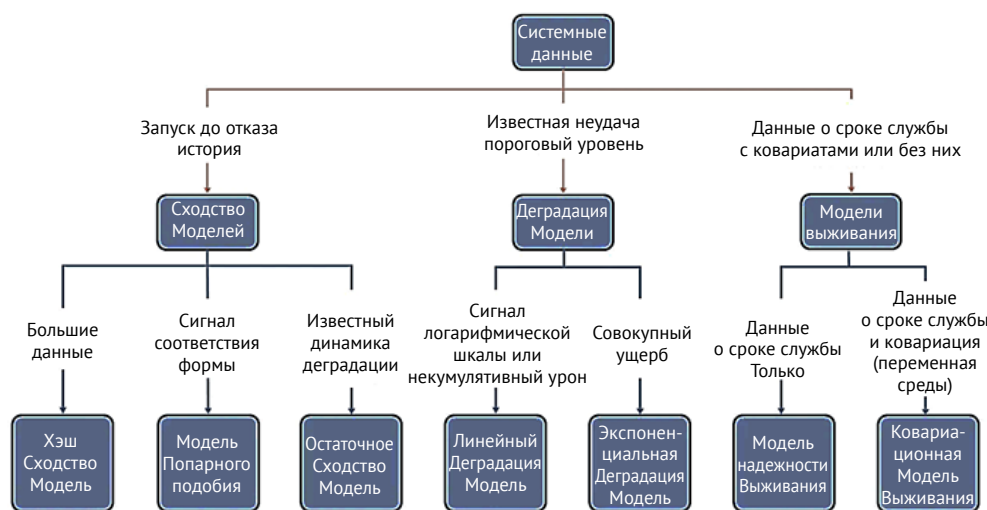


Рис. 5. Классификация методов оценки RUL

После создания объекта модели деградации инициализируйте модель с помощью исторических данных о состоянии здоровья группы аналогичных компонентов, например нескольких машин, изготовленных по одним и тем же спецификациям. Анализ выживаемости — это статистический метод, используемый для моделирования данных о времени до наступления события. Он полезен, когда нет полных данных о времени до отказа.

Индустриальная (промышленная) статистика

Основными разделами промышленной статистики являются:

- ♦ планирование экспериментов (DOE);
- ♦ анализ выживаемости и надежности;
- ♦ статистический контроль процесса.

Планирование экспериментов помогает определить, как определенные факторы влияют на результат (отклик) процесса. Виды планируемых экспериментов:

- ♦ полные и дробные факториальные;
- ♦ D-оптимальные;
- ♦ квазислучайные;
- ♦ поверхностные;
- ♦ визуализация результатов.

Анализ выживаемости изучает время до наступления события. Виды анализа следующие:

- ♦ визуализация;
- ♦ оценивание параметров;
- ♦ расчет функций выживаемости;
- ♦ расчет функций риска;
- ♦ подгонка полупараметрических моделей к цензурированным или нецензурированным данным о продолжительности жизни.

Методы статистического контроля процессов позволяют отслеживать и оценивать качество промышленных процессов. Применяются следующие подходы:

- ♦ измерение характеристик процесса;
- ♦ исследования повторяемости и воспроизводимости измерений
- ♦ отслеживание данные процесса с помощью контрольных карт.

Методы промышленной статистики весьма разнообразны и составляют целую систему подходов, методик, математических основ, алгоритмов и программ, которые находятся

в сложной взаимозависимости и взаимовлиянии, что делает изложение весьма непростым.

Проблемы рисков

Риск — возможная опасность, угроза, вероятность неблагоприятного или неожиданного (в том числе положительного) результата действий или развития событий. Чаще всего риск определяется через вероятность наступления нежелательного события и величину ущерба, например, потерь финансовых ресурсов. Однако его можно описать и как вероятность получить результат, отличный от ожидаемого. Понятие «риски» является частью общей проблемы надежности технических систем и определено в специальном стандарте ГОСТ Р МЭК 31010-2021 — Надежность в технике. Методы оценки риска. Национальный стандарт идентичен международному стандарту МЭК 31010:2019 — Менеджмент риска. Технологии оценки риска (IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques, IDT).

Для расчета рисков используются разнообразные методы, часть которых приведена в таблице.

Проблемы качества

Проблемы качества в промышленном производстве возникают вследствие множества факторов, среди которых выделяют нестабильность производственных процессов, вариабельность исходных материалов, несовершенства технологического оборудования и человеческий фактор. Для эффективного управления качеством широко применяются статистические методы, позволяющие систематизировать и анализировать данные, снижая влияние случайных отклонений и повышая стабильность производственного процесса.

Таблица

**Некоторые вероятностные и статистические методы
расчета рисков**

Байесовский анализ	Способ вывода параметров модели на основе теоремы Байеса, позволяющий использовать эмпирические данные для априорных выводов вероятности
Байесовские сети / диаграммы влияния	Графическая модель переменных и их причинно-следственных связей, выраженная с помощью вероятности. Базовая байесовская сеть имеет переменные, представляющие неопределенность. Расширенная версия, известная как диаграмма влияния, включает переменные, представляющие неопределенность, последствия и действия
Матрица последствий/вероятности	Сопоставление индивидуальных рисков по парам последствие/вероятность и отображение их в матрице с осями «последствие» и «вероятность»
Анализ перекрестных воздействий	Оценка изменений вероятности возникновения заданного набора событий по фактическому возникновению одного из них
Анализ дерева событий (ETA)	Моделирует возможные исходы данного иницирующего события и состояние средств контроля, таким образом анализируя частоту или вероятность различных возможных исходов
F/N-диаграммы	Частный случай количественного графика последствий/вероятности применительно к рассмотрению допустимости риска для жизни человека
Анализ надежности человеческого фактора (HRA)	Набор методов идентификации возможных ошибок человека и оценки вероятности отказа
Марковский анализ	Вычисление вероятности того, что система, которая может находиться в одном из нескольких состояний, будет находиться в определенном состоянии в заданный момент времени t в будущем
Анализ методом Монте-Карло	Вычисление вероятности исходов с помощью моделирования с использованием случайных переменных
Диаграмма Парето	Применение принципа Парето (правило 80-20), утверждающего, что для многих событий 80% последствий являются результатом 20% причин
Индексы риска	Ранжирование оценки значимости риска на основе рангов факторов, которые, как предполагается, влияют на риск

Основные проблемы качества обычной продукции следующие.

1. Нестабильность технологических процессов (производственный процесс подвержен колебаниям из-за изменений окружающей среды, износа оборудования, человеческого фактора и других случайных воздействий).

2. Вариация характеристик сырья и комплектующих.

3. Отсутствие стандартизированных процедур контроля качества.

4. Недостаточная квалификация персонала.

Следует отметить, что в АиПКТ контроль качества строго регламентирован и успешно реализуется.

Для повышения качества используются различные статистические инструменты и подходы

- ♦ Методы статистического контроля качества (Statistical Process Control). Методы SPC включают использование контрольных карт Шухарта, гистограмм, диаграмм Парето и других графических способов визуализации данных. Они позволяют своевременно выявить нарушения стабильности процесса и принять необходимые меры для исправления ситуации.
- ♦ Техники выборочного контроля. Используются для проверки соответствия качества партии продукции установленным требованиям. Выборочный контроль позволяет снизить затраты на проверку всех единиц продукции, сохраняя высокий уровень уверенности в качестве.
- ♦ Регрессия и корреляционный анализ. Эти методы позволяют установить взаимосвязи между факторами, влияющими на качество продукта, и характеристиками изделия. Выявление зависимостей помогает предпринимать целенаправленные меры по улучшению процесса.
- ♦ Планирование экспериментов (Design of Experiments). Методология DOE помогает находить оптимальные условия производственного процесса путем постановки серии контролируемых экспериментов. Это позволяет эффективно повышать качество продукции и уменьшать производственные издержки.
- ♦ Моделирование риска и оценка надежности. Применяются для прогнозирования срока службы деталей и узлов, позволяя планировать профилактику поломок и ремонтов, сокращая расходы на обслуживание и ремонт.

Стандартизация и применение методов теории вероятности и математической статистики

Стандарт ГОСТ Р 58781 – 2019. Ракетно-космическая техника. Система менеджмента качества. Настоящий стандарт предназначен для использования подразделениями организации в рамках управления рисками и обеспечения качества изделий ракетно-космической техники с целью снижения последствий отрицательного воздействия вероятных событий, которые могут явиться причиной изменения качества, затрат, сроков или ухудшения технических свойств.

ГОСТ Р ИСО 11231 Менеджмент риска. Вероятностная оценка риска на примере космических систем. В нем вводятся следующие понятия.

Риск является сочетанием вероятности возникновения и тяжести последствий опасного события (степень вероятности и тяжести последствий).

Индекс риска. Обозначение, характеризующее значимость риска, которое является сочетанием вероятности

возникновения и тяжести последствий опасного события (степень вероятности и тяжести последствий).

Обработка риска. Процесс модификации риска. Изменение правдоподобности/вероятности опасного события;

Снижение риска. Действия, предпринятые для уменьшения вероятности наступления опасных событий, негативных последствий или того и другого вместе, связанных с риском.

Цели внедрения процедуры управления рисками – снижение последствий отрицательного воздействия вероятных событий, которые могут явиться причиной снижения качества, увеличения затрат, сроков или ухудшения технических характеристик изделий РКТ.

Принцип системности и непрерывности. Для неблагоприятных событий оценивают вероятность их возникновения и тяжесть последствий.

Основными группами методов анализа рисков являются:

- ♦ статистические методы;
- ♦ теоретико-вероятностные (логико-вероятностные) методы;
- ♦ оценка последствий реализации риска (возможных ущербов);
- ♦ экспертные методы и др.

Выбор и применение методов оценки рисков осуществляется по ГОСТ Р ИСО / МЭК 31010.

В основе статистических методов лежит оценка вероятности наступления случайного события исходя из относительной частоты появлений данного события в серии наблюдений (за период времени). Данные методы являются наиболее предпочтительными, поскольку они достаточно просты и базируются на фактических данных. Статистические критерии и методы оценки применяются согласно ГОСТ Р 51901.16.

Статистические методы неприменимы там, где нет достаточного объема наблюдений.

В основе теоретико-вероятностных (логико-вероятностных) методов лежит построение математической модели изучаемого объекта, позволяющей проводить оценку риска. К таким методам относятся метод анализа дерева неисправностей, метод структурной схемы надежности и др. Данные методы достаточно трудоемки, но в ряде случаев являются единственным возможным научно обоснованным способом оценки, в соответствии с ГОСТ Р 51901.11, ГОСТ Р 51901.12, ГОСТ Р 51901.14 и др.

Профессиональные стандарты, в которых имеются требования по компетенциям в области теории вероятности, математической статистики и имитационного моделирования

- ♦ Профстандарт: 25.013. Специалист по надежности ракетно-космической техники.

Знания и навыки применения методов математической статистики, теории вероятности должны обеспечивать выполнение следующих трудовых функций: задание требований к надежности изделий РКТ и оценка достигнутых значений надежности изделий РКТ на всех этапах жизненного цикла; разработка методик проектного анализа надежности, обоснования программ обеспечения надежности изделий РКТ; разработка методик планирования и обработки результатов испытаний, контроля надежности изделий РКТ.

- ♦ Специалист по управлению рисками [Профстандарт: специалист по управлению рисками].

Выбор методических подходов к оценке уровня рисков и экономической безопасности в разрезе отдельных видов. Должен также осуществлять оценку вероятности наступления рискованных ситуаций.

- ♦ Специалист по надежности и безопасности пилотируемых космических кораблей, станций и обитаемых сооружений, располагаемых на небесных телах.

Основы теории вероятности и математической статистики требуются для реализации таких трудовых функций, как разработка технической документации на создаваемую и эксплуатируемую пилотируемую и обитаемую РКТ; организация разработки мероприятий по обеспечению надежности и безопасности процесса создания и эксплуатации пилотируемой и обитаемой РКТ.

Анализ программ подготовки

Приведем некоторые дисциплины, связанные с теорией вероятности, математической статистикой и моделированием, которые изучают в рамках программ подготовки специалистов ракетно-космической техники.

- ♦ «Теория вероятностей и математическая статистика». Изучают основные понятия, методы, приемы и средства работы с вероятностными объектами, приобретают навыки получения вероятностных оценок, прогнозирования (Амурский государственный университет).
- ♦ «Математические модели функционирования ракетно-космических систем». Изучают методы математического моделирования и численного анализа, учатся работать с современными программными комплексами для проектирования и анализа ракетно-космических систем (Институт № 6 «Аэрокосмический» МАИ).
- ♦ «Теория вероятности и математическая статистика» в программе подготовки кафедры ИУ-1 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Математическое и программное обеспечение систем управления (ИУ1)».
- ♦ Кафедра СМ-1 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Комплексный анализ и теория вероятностей», «Моделирование технических систем».
- ♦ Кафедра СМ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Комплексный анализ и теория вероятностей», «Проектирование с учетом случайных факторов».
- ♦ Кафедра СМ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Теория вероятностей и математическая статистика», «Математическое моделирование в баллистике».

- ♦ Кафедра СМ-8 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Комплексный анализ и теория вероятностей», «Надежность оборудования комплексов».
- ♦ Кафедра СМ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Основы теории вероятностей и математической статистики», «Аналитическое и численное моделирование технологических процессов».
- ♦ Кафедра СМ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Основы теории вероятностей и математической статистики».

На основе проведенного анализа основных положений теории вероятности, математической статистики и статистического моделирования, а также задач, сформулированных в соответствующих ГОСТах, в том числе по АиРКТ, требований профессиональных стандартов и опыта подготовки специалистов предлагаются следующие темы для организации переподготовки кадров по 24 УГСН.

- ♦ Углубленное изучение основных понятий, методов, приемов и средств работы с вероятностными объектами, включая вероятностное событийное моделирование для получения вероятностных оценок, прогнозирования, отбора оптимальных результатов анализа.
- ♦ Формирование актуальных знаний, умений и навыков для успешного освоения различных технологий, и средств вероятностного анализа и статистической обработки результатов наблюдений процессов и явлений.
- ♦ Изучение передовых методов вероятностного расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов и систем, в том числе задачи и методы статистической динамики, логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем и др.

Литература

1. Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Романова-Большакова И.К. Особенности подготовки специалистов и магистров по направлению ракетно-космической техники в условиях возрастающих потребностей формирования интегрированных компетенций // *Alma mater (Вестник высшей школы)*. 2023. № 6. С. 50–55. <http://doi.org/10.20339/AM.06-23.050>
2. Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Романова-Большакова И.К. Особенности подготовки специалистов по направлению «Авиационная и ракетно-космическая техника» в современных условиях индустрии 4.0. М.: Изд-во МАИ, 2025. С. 100–128.
3. Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Романова-Большакова И.К. Формирование компетенций инженерных кадров ракетно-космической и авиационной отрасли в области обеспечения надежности сложных технических систем // *Alma mater (Вестник высшей школы)*. 2024. № 7. С. 65–75. <http://doi.org/10.20339/AM.07-24.065>
4. Куренков В.И. Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: учеб. пособие / В.И. Куренков, В.А. Капитонов. Самара: Изд-во СГАУ, 2007.
5. Романова-Большакова И.К. Установление причинно-следственных связей в задаче выявления отказов управляемых объектов // *Технологии разработки и отладки сложных технических систем / Всероссийская научно-практическая конференция: сборник трудов конференции*. М., 2024. С. 153–163.

- ♦ Знания и умения в области теории и практики моделирования и изучения вероятностных моделей неопределенностей и их применение в оценках рисков.
- ♦ Интегрированная подготовка специалистов ракетно-космической техники в области практического использования инструментов статистики и теории вероятности, имеющих теоретическую базу передовых математических и алгоритмических методов и способных использовать методы теории надежности при решении инженерных задач.
- ♦ Владение программными средствами практических расчетов и моделирования на основе теории вероятности, математической статистики, статистического моделирования для решения прикладных задач, возникающих на этапах жизненного цикла изделий АиРКТ.
- ♦ Углубленное изучение нормативно-технической документации в области надежности, диагностики и рисков изделий ракетно-космической техники.

Заключение

Анализ основных положений теории вероятности, математической статистики и статистического моделирования, а также задач, сформулированных в соответствующих ГОСТах, в том числе по АиРКТ, требований профессиональных стандартов и опыта подготовки специалистов по 24 УГСН позволил сформировать направления подготовки, которые могут быть предложены для освоения специалистами в рамках переподготовки кадров в новых реалиях усложнения объектов АиРКТ и повышения требований к ним.

References

1. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. Features of training specialists and master's students in the field of rocket and space technology in the context of growing demands for the development of integrated competencies. *Alma mater (Vestnik vysshey shkoly)*. 2023. No. 6. Pp. 50–55. <http://doi.org/10.20339/AM.06-23.050>
2. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. Features of training specialists in the field of 'Aviation and Rocket and Space Engineering' in the modern context of Industry 4.0. Moscow: MAI Publishing House, 2025. Pp. 100–128.
3. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. Developing the competencies of engineering personnel in the rocket, space and aviation industries in the field of ensuring the reliability of complex technical systems. *Alma mater (Vestnik vysshey shkoly)*. 2024. No. 7. Pp. 65–75. <http://doi.org/10.20339/AM.07-24.065>
4. Kurenkov, V.I. Methods for calculating and ensuring the reliability of rocket and space systems: textbook / V.I. Kurenkov, V.A. Kapitonov. Samara: SSAU Publishing House, 2007.
5. Romanova-Bolshakova, I.K. Establishing cause-and-effect relationships in the task of identifying failures in controlled systems. *Technologies for the Development and Debugging of Complex Technical Systems. Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2024. Pp. 153–163.

6. Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Романова-Большакова И.К. Формирование компетенций инженерных кадров ракетно-космической и авиационной отрасли в области оптимального проектирования сложных технических систем // *Аэрокосмическое образование в России. Ответ на вызов времени* / под ред. Д.А. Козореца. М., 2023. С. 136–156.

7. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.

8. Романова-Большакова И.К. Влияние деградации параметров объекта на изменение динамического фронта Парето // *Технологии разработки и отладки сложных технических систем* / Всероссийская научно-практическая конференция. М., 2024. С. 143–152.

6. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. Developing the competencies of engineering personnel in the rocket, space and aviation industries in the field of optimal design of complex technical systems. In: *Aerospace Education in Russia. Responding to the challenges of our time*. D.A. Kozorez (ed). Moscow, 2023. Pp. 136–156.

7. Chernorutskiy, I.G. Optimisation Methods. Computer Technologies. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011.

8. Romanova-Bolshakova, I.K. The Effect of Object Parameter Degradation on Changes in the Pareto Dynamic Front. *Technologies for the Development and Debugging of Complex Technical Systems*. All-Russian Scientific and Practical Conference. Moscow, 2024. Pp. 143–152.

