

УДК 378::629.7-057.4
DOI 10.20339/AM.07-26.120

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

ОСОБЕННОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ, ДИАГНОСТИКИ И РИСКОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Проанализированы особенности подготовки специалистов ракетно-космической техники в области прогнозного обслуживания, диагностики и рисков сложных систем на основе комплексного междисциплинарного подхода, направленного на формирование компетенций, связанных разными этапами жизни изделий авиационной и ракетно-космической техники. Выделены актуальные для современного специалиста компетенции, такие как оценка и прогнозирование технического состояния агрегатов и систем стартовых комплексов, наземных комплексов отладки, систем связи с бортовыми вычислительными средствами, системами моделирования в реальном времени и других технических объектов, выявление возможных неисправностей, анализ причин их появления и принятие решения по их устранению, математическое моделирование эксплуатации оборудования стартового комплекса, обоснование объема и времени проведения регламентных и ремонтно-восстановительных работ, анализ рисков эксплуатации потенциально опасных объектов ракетно-космической техники, разработка мероприятий по их управлению, использование методов неразрушающего контроля технического состояния космической техники. Проанализирован имеющий опыт подготовки специалистов в данном направлении в МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению 24 УГСН и предложены меры по совершенствованию комплексного междисциплинарного подхода.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, надежность изделий РКТ и их основных компонент, мероприятия по обеспечению надежности, диагностика, прогнозное обслуживание, риски, машинное обучение, подготовка инженерных кадров РКТ, интегрированные компетенции.

FEATURES OF ADDITIONAL TRAINING OF AVIATION AND ROCKET SPACE TECHNOLOGY SPECIALISTS IN THE FIELD OF FORECASTING, DIAGNOSTICS, AND RISKS OF COMPLEX SYSTEMS

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>

The article analyzes the features of training rocket and space technology specialists in the field of predictive maintenance, diagnostics and risks of complex systems based on an integrated interdisciplinary approach aimed at developing competencies related to different life stages of aviation and rocket and space technology products. Relevant competencies for a modern specialist are highlighted, such as assessing and predicting the technical condition of units and systems of launch complexes, ground-based debugging systems, communication systems with on-board computing facilities, real-time modeling systems, and other technical facilities, identifying possible malfunctions, analyzing the causes of their occurrence and making decisions to eliminate them, and mathematical modeling of operation launch complex equipment, justification of the scope and time of routine maintenance and repair work, analysis of the risks of operating potentially dangerous objects of rocket and space technology, development of measures for their management, use of methods of non-destructive testing of the technical condition of space technology. The experience of training specialists in this field at the Bauman Moscow State Technical University in the field of 24 UCSN is analyzed and measures are proposed to improve an integrated interdisciplinary approach.

Keywords: rocket and space technology, reliability of RCT products and their main components, measures to ensure reliability, diagnostics, predictive maintenance, risks, machine learning, training of RCT engineering personnel, integrated competencies

Введение

Изделия авиационной и ракетно-космической техники (А и РКТ) относятся к классу сложных технических систем. Помимо общих требований к сложным системам, к ним также предъявляются специальные, связанные с решаемыми задачами, условиями проектирования, изготовления и эксплуатации:

- ◆ Требования высокой надежности и безопасности, безотказной работы в течение длительного времени при сохранении живучести экипажа и системы в условиях сбоев и отказов.
- ◆ Экстремальные условия эксплуатации в части температурных режимов, высоких перегрузках, вибрациях, в вакууме и под воздействием космической радиации.
- ◆ Сложность конструкции, которая является не просто большой системой с тысячами узлов и агрегатов (двигатели, системы управления, авионика), но и со взаимозависимостью и разнообразием таких агрегатов, так что можно говорить об интеграции всех бортовых систем.
- ◆ Использование уникальных материалов для специфических условий эксплуатации — например, легкие и прочные сплавы, композиты, специальные покрытия для эксплуатации в условиях высоких нагрузок.
- ◆ Высокая стоимость на всех этапах разработки, производства, испытаний и эксплуатации, включая регламентные и аварийные работы.
- ◆ Специальные методы сертификации и контроль качества на всех этапах производства.

Методологической основой, объединяющей все перечисленные аспекты, является понятие жизненного цикла изделий, подробно описанное в статье авторов [1].

Важнейшие требования по надежности сложных технических систем [2] предлагается рассмотреть через ряд ее важных составляющих, а именно диагностика, прогнозное обслуживание и риски.

Глубокая внутренняя связь между этими понятиями в соответствии с универсальным системным подходом позволит не только выявить современные тренды, но и сформулировать новые интегрированные компетенции специалистов, которые уже получили определенную базовую подготовку по отдельным направлениям, но готовы в рамках дополнительной переподготовки перейти на качественно новый уровень, соответствующий новым вызовам, в частности Индустрии 4.0 [3].

Основные понятия, определения и междисциплинарные связи проблемной области

Проведенный анализ (см. статью авторов в данном выпуске С. 60–70) показывает, что надежность, диагностика, прогнозное обслуживание и риски связаны между собой, т.к. представляют собой характеристики единой комплексной оценки процесса функционирования технической системы и важны для обеспечения безопасного и эффективного функционирования технических систем, а также для минимизации возможных рисков.

Между диагностикой, прогнозным обслуживанием и управлением рисками существует тесная причинно-следственная связь: эти процессы образуют единую цепочку превентивного управления системами для минимизации негативных последствий.

Первичной в этом едином процессе является диагностика как основа для всех последующих действий через выявление текущих состояний, отклонений, скрытых дефектов с помощью мониторинга, измерений, анализа данных. Она дает следующий вклад в управление рисками:

- ◆ идентифицирует уже существующие угрозы (износ, утечки, перегрузки);
- ◆ дает фактические данные для оценки вероятности отказов;
- ◆ позволяет ранжировать составляющие системы по критичности состояния.

Прогнозное обслуживание (predictive maintenance) — как переход от факта к прогнозу, основанному на использовании данных диагностики + моделей прогнозирования для предсказания момента отказа. Оно вносит свой вклад в управление рисками через оценку будущей вероятности события, например времени достижения узлом системы критического уровня, и расчет ожидаемых последствий (простой, ущерб, затраты на ремонт), а также определяет оптимальное время вмешательства для снижения риска.

После получения результатов диагностики и прогнозов можно переходить к этапу принятия решений по управлению рисками через анализ сочетаний «вероятность × последствия» и выбор мер снижения риска. Вклад диагностики и прогнозного обслуживания в принятие решений по управлению рисками состоит в обеспечении объективных входных данных и сравнении сценариев профилактического и прогностического обслуживания — например, отложить ремонт, если имеется приемлемый риск.

Цепочка связи между тремя технологиями: Диагностика → Данные о состоянии; Данные + Модели → Прогнозное

обслуживание → Прогноз отказа; Прогноз + Анализ последствий → Оценка риска → Решения по снижению риска.

Динамика развития трех процессов во времени такова: диагностика дает «картину сейчас», прогнозное обслуживание – «картину завтра», а управление рисками переводит обе в практические действия для обеспечения надежности и эффективности систем.

Прогнозное обслуживание

Прогноз представляет собой оценку времени до отказа и вероятности единичного или множественного отказа вследствие неисправностей (повреждений), имеющих место в настоящий момент или ожидаемых в будущем. Прогноз основывается на подтвержденных опытом знаниях о процессах развития неисправностей разного вида. Задача прогноза – дать пользователю возможность оценить остаточный ресурс машины с достаточной степенью достоверности. Эффективность прогноза зависит от того, насколько хорошо известны и описаны моделью виды неисправностей и отказов для машин данного вида, как они зависят от срока службы и конструктивного исполнения конкретной машины, каким образом они развиваются во времени.

Появление такого мощного инструмента, как интеллектуальный анализ данных, позволило перевести решение проблемы на качественно иной уровень.

Для изучения методов и алгоритмов прогнозного обслуживания, включая объекты авиационной и ракетно-космической техники, имеются обширные наборы экспериментальных данных в открытом доступе, например, набор данных для прогностического обслуживания турбореактивных двигателей NASA (<https://data.nasa.gov/Aeospace/CMAPSS-Jet-Engine-Simulated-Data/ff5v-kuh6>).

Навыки, которыми должен обладать специалист по прогнозному обслуживанию, следуют из перечня, определенного стандартом ГОСТ Р ИСО 13381-1–2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния».

Общее понятие о контроле состояния машин, формирующее основу для процедур прогнозирования и определяющее необходимые исходные данные для этой процедуры, дано в ИСО 17359. Для прогнозирования необходимы в первую очередь навыки и умения сбора документированных данных, включающих: общей перечень агрегатов, машин и узлов, подлежащих контролю для данного изделия, с технической документацией на них; все параметры, подлежащие контролю; установленные базовые уровни и критерии приемки, записи эксплуатационных параметров, данных технического обслуживания, а также записи об имевших место отказах; текущие и планируемые усло-

вия работы и технического обслуживания контролируемых машин.

Специалист должен уметь устанавливать первоначальный диагноз, включая идентификацию всех развивающихся неисправностей.

Один из важнейших навыков во всех разделах надежности – это умение создавать модели объектов и процессов и, в частности, модели отказов (единичных и множественных), которые могут включать в себя статистические характеристики, влияющие факторы, критерии зарождения неисправностей и точки отказов для всех контролируемых параметров.

Специалист также должен владеть навыками обработки данных как на основе описательной статистики, так и с помощью технологий интеллектуального анализа данных, например, регрессионного метода, методов обработки кривых (подгонка, проектирование, наложение).

Для конкретной системы необходимы знания об уровнях предупреждения, останова, пороговых значениях других показателей, связанных с техническим состоянием машины.

Владение навыками обработки результатов расследований отказов предполагает умение рассчитать параметры надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности, оценить данные о зарождающихся и прогрессирующих неисправностях.

Риски

Понятие риска рассматривается совместно с понятием «опасность».

Под *опасностью* подразумевается источник потенциального вреда или ситуация с потенциальной опасностью. *Опасным* называется такое событие, которое может нанести вред.

Риск определяется как сочетание частоты (вероятности) события и его последствий. Термин «риск» применяется в случаях, когда возникает возможность отрицательных последствий.

Для понятия риска создан специальный национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 31010–2021 «Надежность в технике. Методы оценки риска». Он идентичен международному стандарту МЭК 31010:2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» (IEC 31010:2019 Risk management – Risk assessment techniques, IDT).

В стандарте приведено руководство по выбору и применению различных методов, способствующих пониманию риска и учету соответствующей неопределенности, в том числе:

- ♦ в ситуациях, где необходимо более глубокое понимание существующего или другого конкретного риска;

- ♦ при принятии решения по результатам сопоставления вариантов, каждому из которых соответствует свой риск, или оптимизации риска;
- ♦ в процессе менеджмента риска при выполнении действий по обработке риска.

Эти методы используют на этапах оценки риска, связанных с идентификацией, анализом и сравнительной оценкой риска в соответствии с ИСО 31000, и в более общем случае для понимания неопределенности и ее последствий.

Стандарт в области рисков БАС — вследствие широкой распространенности БАС (беспилотных авиационных систем) вышел специальный ГОСТ Р 71996–2025 Беспилотные авиационные системы. Оценка рисков, связанных с эксплуатацией беспилотных авиационных систем специальной категории. Общие требования к проведению. Российский институт стандартизации 2025 [17]. Методика оценки рисков, установленная в указанном стандарте, позволяет на этапе эксплуатации БАС специальной категории проверить выполнение требований к обеспечению безопасности полета беспилотного воздушного судна (БВС), входящего в состав указанной БАС, с точки зрения вероятности нанесения ущерба людям и инфраструктуре, находящимся в зоне полета, при возможном падении БВС на землю/поверхность, возникшем вследствие отказного состояния (отказа) БАС.

Совместное использование изделий ракетно-космической техники (РКТ) и беспилотных авиационных систем (БАС) возможно в рамках интеграции технологий, цифровых инструментов и стандартов, которые повышают эффективность разработки, испытаний и эксплуатации обеих категорий техники, в том числе:

- ♦ цифровые технологии и моделирование;
- ♦ стандартизация и сертификация;
- ♦ использование специализированной электронной компонентной базы (ЭКБ);
- ♦ испытательные полигоны и инфраструктура;
- ♦ образовательные и научные проекты.

Среди научных проектов следует упомянуть разработку междисциплинарных проектов, например, использование БПЛА для поддержки космических миссий (доставка грузов, мониторинг наземных объектов в рамках космических программ).

Применение методов машинного обучения в задачах прогнозирования, диагностики, рисков

Интеллектуальные системы мониторинга и адаптации маршрута летательных аппаратов строятся на основе нейро-

сетевого анализа объектов риска. Используются алгоритмы автономной навигации, обеспечивающие анализ внешней среды и оперативную корректировку траектории полета с учетом потенциальных угроз. Используются возможности применения машинного зрения, нейросетевых алгоритмов, методов предобработки данных, детектирования объектов, семантической сегментации, алгоритмов траекторного планирования, предиктивного управления и адаптивной оптимизации маршрутов для идентификации препятствий, движущихся объектов и зон ограничения полетов. Роль интеллектуальных систем управления в архитектуре ЛА состоит в повышении автономности, устойчивости и эффективности выполнения задач в динамически изменяющихся условиях. Предлагаемые решения ориентированы на снижение рисков, связанных с нештатными ситуациями, за счет внедрения адаптивных стратегий управления полетом.

Для сложных машин возникновение непредвиденных отказов компонентов резко увеличивает затраты на техническое обслуживание, связанные с задачами по исправлению, не только в отношении прямых затрат на исправление (запасные части, рабочее время), но и за затраты на недоступность системы. Для решения задачи прогнозирования отказа оборудования в рамках технического обслуживания могут быть использованы методы нечеткой логики.

Кроме того, машинное обучение также используется для диагностики сложных технических систем. Надо отметить, что анализ рисков информационной безопасности в рамках применения технологий интернета играет важную роль в предотвращении рисков. **Нейросетевая система контроля и диагностики**, разработанная применительно к подсистемам малого космического аппарата (КА), включает контроль системы энергообеспечения, терморегуляции, управления движением и ориентации, радиоконтекста и др.

Диагностика

Основные определения диагностики технических систем являются предметом стандартизации и определены в ГОСТ 20911-89. Согласно этому стандарту, техническая диагностика — это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Техническое состояние объекта — это состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект. Задачами технического диагностирования являются: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния.

Компетенции специалиста в области диагностики, прогнозного обслуживания и рисков технических систем

На основе анализа соответствующих стандартов, регламентирующих указанные виды работ, был собран список компетенций. Также использован перечень профессиональных стандартов, в том числе профессиональный стандарт «Специалист по надежности ракетно-космической техники». Профстандарт 25.013 *Обоснование, планирование и сопровождение работ по обеспечению надежности изделий РКТ в организациях ракетно-космической промышленности.*

Стандартом предусмотрены знания, умения и навыки в таких областях, как разработка методики для проведения анализа вида, последствий и критичности отказа (АВПКО) и проведения работ с критичными элементами и критичными технологическими процессами на всех этапах жизненного цикла изделий РКТ; задание требований к надежности изделий РКТ и оценка достигнутых значений надежности изделий РКТ на всех этапах жизненного цикла; проведение классификации типовых причин отказов изделий РКТ и нештатных ситуаций; разработка комплексных программ экспериментальной отработки изделий РКТ; определение параметров отказов и уровней критичности отказов изделия РКТ и его составных частей (СЧ) с применением прикладных и специальных компьютерных программ; определение элементов изделий РКТ, требующих принятия дополнительных мер повышения надежности, с применением прикладных и специальных компьютерных программ; моделирование сценариев развития нештатной ситуации и определение допустимого времени потери функции критичного элемента изделия РКТ, в течение которого возможен выход из нештатной ситуации, с применением прикладных и специальных компьютерных программ; разработка методик планирования и обработки результатов испытаний, контроля надежности изделий РКТ.

Имеется также профессиональный стандарт 08.018 *Специалист по управлению рисками* 2025 г. Им предусмотрены такие знания, умения и навыки, как определение ситуации (контекста) и идентификация рисков в деятельности организации; сбор и обработка релевантной аналитической информации для анализа и оценки рисков; определение комплекса аналитических процедур и методов анализа и оценки рисков с позиции их идентификации по функциональным областям; анализ рисков, в том числе в зависимости от целей организации, вероятности и объема экономических потерь, вероятности стабилизации прибыли, роста стоимости активов, уровня экономической безопасности в разрезе отдельных видов риска на основе установленных методических принципов и подходов.

В космической отрасли также имеется Профстандарт 25.061 *Специалист по организации и оперативному управлению производством в ракетно-космической промышленности.* В нем отмечены такие навыки, как сопоставление оперативных данных с плановыми, выявление имеющихся и прогнозирование возможных отклонений и доклад о выявленных отклонениях по инстанции для принятия мер.

Требования к специалистам в области диагностики изложены в профессиональных стандартах по соответствующим отраслям деятельности, утверждаемых приказами Минтруда России. Профессиональные стандарты 25-й группы «Ракетно-космическая промышленность» включают более 60 стандартов. При этом специального стандарта для специалистов в области диагностики в РКТ, в отличие от других отраслей народного хозяйства, нет. И это вполне объяснимо вследствие огромного разнообразия видов проектируемых и эксплуатируемых изделий РКТ.

В ПС 25.001 *Специалист по проектированию и конструированию космических аппаратов и систем* выделена трудовая функция «Сопровождение процесса изготовления космических аппаратов, космических систем и их составных частей», включающая трудовые действия: «Исследование и анализ дефектов изготовленных космических аппаратов». Трудовая функция «Сопровождение процесса подготовки и проведения испытаний космических аппаратов, космических систем и их составных частей в наземных условиях, анализ результатов испытаний» включает трудовые действия: «Разрабатывать программы и методики проведения испытаний составных частей космических аппаратов и космических систем с учетом сертификационных требований космических систем и их составных частей на несоответствия конструкторской документации».

Трудовая функция «Анализ и оценка работы космических аппаратов, космических систем и их составных частей при подготовке к запуску и в процессе эксплуатации» включает трудовые действия «Анализ и систематизация результатов летных испытаний и значений эксплуатационно-технических характеристик составных частей космических аппаратов и космических систем».

ПС 25.006 *Специалист по надежности и безопасности пилотируемых космических кораблей, станций и обитаемых сооружений, располагаемых на небесных телах* включает такие трудовые функции, как «Моделирование решений по снижению риска возникновения типичных причин отказа и нештатных ситуаций в процессе создания и эксплуатации пилотируемой и обитаемой РКТ», «Анализ поступающей информации о процессах эксплуатации пилотируемой и обитаемой РКТ».

ПС 25013 *Специалист по надежности ракетно-космической техники* определяет основной вид профессиональной деятельности как «Обоснование, планирование и сопровождение работ по обеспечению надежности изделий РКТ в организациях ракетно-космической промышленности». Трудовые функции «Анализ видов последствий и критичности отказов РКТ и проведение работ с критичными элементами и критичными технологическими процессами на всех этапах жизненного цикла изделий РКТ», «Разработка методик планирования и обработки результатов испытаний, контроля надежности изделий РКТ» предполагают решение задач диагностики. Однако в перечисленных стандартах нет прямого указания на формирование компетенций в области диагностики в соответствии с ГОСТ 20911-89.

Напрямую трудовые функции в области диагностики определены в ПС 25014 *Специалист по дефектации изделий ракетно-космической техники*, где определена основная цель профессиональной деятельности «Проверка технического состояния изделий РКТ с оценкой их работоспособности, степени износа, процента израсходованного гарантийного ресурса, укомплектованности; определение пригодности к дальнейшему использованию изделий РКТ и их агрегатов, сборочных единиц, узлов, деталей». Однако стандарт дает описание функций и действий применительно к уровням квалификации 3 и 4. Более высокие уровни квалификации соответствуют трудовой функции «Анализ и обработка результатов выявленных дефектов дефектируемого изделия РКТ».

Опыт МГТУ им. Н.Э. Баумана

Для формирования компетенций также был проанализирован имеющийся опыт подготовки специалистов в данном направлении в МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению 24 УГСН.

Были определены следующие интегрированные компетенции в области диагностики, прогнозирования и рисков, которые с учетом имеющегося уровня подготовки могут послужить основой для формирования программ дополнительного образования.

Знания:

- ◆ основные модели типа «человек — машина — среда»;
- ◆ основные показатели надежности и методы их определения;
- ◆ современные аспекты техногенного риска;
- ◆ алгоритмы исследования опасностей;
- ◆ теории и модели происхождения и развития чрезвычайных ситуаций;

- ◆ методы качественного анализа надежности и риска;
- ◆ основные представления по вопросам организации испытаний технических систем.

Умения:

- ◆ оценивать безопасные параметры эксплуатации технических систем;
- ◆ анализировать современные системы на всех стадиях их жизненного цикла и идентифицировать опасности;
- ◆ рассчитывать основные показатели надежности систем;
- ◆ рассчитывать риски и разрабатывать мероприятия по поддержанию их допустимых величин;
- ◆ разрабатывать и реализовывать систему мониторинга потенциальных опасностей;
- ◆ определять стандартные статистические характеристики чрезвычайных ситуаций (аварий, несчастных случаев и др.);
- ◆ использовать методики оценки техногенного риска при эксплуатации оборудования;
- ◆ понимать принципы формирования обобщенного и индивидуального риска для промышленного объекта.

Навыки и (или) опыт деятельности:

- ◆ оптимальные методы решения задач надежности и безопасности;
- ◆ проблемные методы повышения надежности и безопасности;
- ◆ методы анализа сложных систем при нестационарных потоках отказов и восстановлений;
- ◆ применение методик качественного анализа опасностей сложных технических систем типа «человек — машина — среда»;
- ◆ применение количественных методов анализа опасностей и оценки риска;
- ◆ решение задач организационного обеспечения надежности технических систем;
- ◆ организация накопления, хранения и использования информации по свойствам технических систем.

Заключение

Были рассмотрены основные положения диагностики, прогнозирования и рисков как составляющих надежности сложных технических систем на основе анализов соответствующих стандартов и обзоров конкретных методов исследования. С учетом выявленных потребностей в знаниях и навыках для решения таких задач, а также анализов профессиональных стандартов был определен перечень знаний, умений и навыков, которые могут быть включены в программу дополнительной подготовки специалистов в области АиРКТ.

Литература

1. Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Романова-Большакова И.К. Развитие цифровых технологий в подготовке специалистов по проблемам жизненного цикла систем авиационной и ракетно-космической техники // *Аэрокосмическое образование в России: ответ на вызов времени* / под ред. Д.А. Козорез. М., 2023. Гл. 9. С. 157–176.
2. 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. Козорез. М., 2023. Гл. 8. С. 136–156.
3. 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 / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). М., 2025. С. 100–128.
4. ГОСТ Р 71996-2025 Беспилотные авиационные системы. Оценка рисков, связанных с эксплуатацией беспилотных авиационных систем специальной категории. Общие требования к проведению. М.: Российский институт стандартизации, 2025.
5. Сергеев Д.А., Родионов Д.Г., Поляков П.А., Голиков Г.И., Старченкова О.Д., Дмитриев Н.Д., Конников Е.А. Интеллектуальная система мониторинга и адаптации маршрута беспилотных летательных аппаратов на основе нейросетевого анализа объектов риска // *Программные системы и вычислительные методы*. 2025. № 1. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2025.1.73255> EDN: UZVYID. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73255
6. Sudarsanam S.K. Fuzzy logic based predictive maintenance of complex equipments, December 2014. Conference: ICBAIAT: I.I.Sc. Bangalore.
7. Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М., Шишкин О.Г. Высокопроизводительная нейросетевая система мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным // *Программные системы: теория и приложения*. 2017. № 3 (34). С. 109–131.

References

1. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. The development of digital technologies in the training of specialists on the problems of the life cycle of aviation and rocket and space technology systems. In: *Aerospace education in Russia: the answer to the challenge of time*. D.A. Kozorez (ed). Moscow, 2023. Ch. 9. Pp. 157–176.
2. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. Formation of 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: the answer to the challenge of time*. D.A. Kozorez (ed). Moscow, 2023. Ch. 8. Pp. 136–156.
3. Kalugin, V.T., Lutsenko, A.Yu., Romanova-Bolshakova, I.K. Features of training specialists in the field of Aviation and rocket and space technology in modern conditions of industry 4.0. Moscow: Moscow Aviation Institute (National Research University) Press, 2025. Pp. 100–128.
4. GOST R 71996-2025 Unmanned aircraft systems. Assessment of risks associated with the operation of unmanned aircraft systems of a special category. General requirements for conducting. Moscow, Russian Institute of Standardization Press, 2025.
5. Sergeev, D.A., Rodionov, D.G., Polyakov, P.A., Golikov, G.I., Starchenkova, O.D., Dmitriev, N.D., Konnikov, E.A. An intelligent system for monitoring and adapting the route of unmanned aerial vehicles based on neural network analysis of risk objects. *Software systems and computational methods*. 2025. No. 1. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2025.1.73255>. EDN: UZVYID. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73255
6. Sudarsanam, S.K. Fuzzy logic based predictive maintenance of complex equipments. December 2014. Conference: ICBAIAT: I.I.Sc. Bangalore.
7. Abramov, N.S., Talalaev, A.A., Fralenko, V.P., Khachumov, V.M., Shishkin, O.G. High-performance neural network system for monitoring the status and behavior of spacecraft subsystems based on telemetry data. *Software Systems: Theory and Applications*. 2017. No. 3 (34). Pp. 109–131.