

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Шубинский Игорь Борисович – доктор технических наук, профессор, эксперт Научного совета при Совете Безопасности РФ, генеральный директор ООО «ИБТранс» (Москва, РФ)

Заместители главного редактора:

Вэй Куо – ректор и заслуженный профессор, профессор электротехники, компьютерного анализа данных, ядерной техники, городской университет Гонконга, Член Национальной инженерной академии США (Гонконг, Китай)

Шебе Хендрик – доктор естественных наук, главный эксперт по надежности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности, TÜV Rheinland InterTraffic (Кёльн, Германия)

Ястребенецкий Михаил Анисимович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела Национальной академии наук Украины «Государственный научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности» (Харьков, Украина)

Ответственный секретарь:

Замышляев Алексей Михайлович – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИАС» (Москва, РФ)

Технический редактор:

Новожилов Евгений Олегович – кандидат технических наук, начальник отдела АО «НИИАС» (Москва, РФ)

Председатель редакционного совета:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель АО «НИИАС» (Москва, РФ)

Сопредседатель редакционного совета:

Махутов Николай Андреевич – доктор технических наук, профессор, член – корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова, председатель Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности (Москва, РФ)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Аврамович Зоран Ж. – доктор технических наук, профессор, профессор Института транспорта Университета г. Белград (Белград, Сербия)

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управления и защиты информации» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, РФ)

Бочков Александр Владимирович – доктор технических наук, начальник отдела анализа и ранжирования объектов контроля Администрации ООО «Газпром газнадзор» (Москва, РФ)

Бочков Константин Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель – заведующий НИЛ «Безопасность и ЭМС технических средств (БЭМС ТС), УО «Белорусский государственный университет транспорта» (Гомель, Белоруссия)

Боян Димитров – профессор, доктор математических наук, профессор теории вероятности и статистики, университет Кеттеринга, Флинт (Мичиган, США)

Гапанович Валентин Александрович – кандидат технических наук, президент НП «Объединение производителей железнодорожной техники» (Москва, РФ)

Каштанов Виктор Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор департамента прикладной математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Москва, РФ)

Климов Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник управления 4 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны РФ (Москва, РФ)

Кофанов Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Москва, РФ)

Кришнамурти Ачътха – доктор физико-математических наук, профессор, почетный профессор Департамента математики Университета науки и технологий (Кочин, Индия)

Лецкий Эдуард Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, РФ)

Манджей Рам – профессор, доктор, отделение математики, вычислительной техники и технических наук, Университет Graphic Era, (Дехрадун, Индия)

Нетес Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) (Москва, РФ)

Папич Любиша – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надежностью (DQM), (Приевор, Сербия)

Поляк Роман А. – доктор физико-математических наук, профессор, приглашенный профессор Школы математических наук технологического Университета Технион (Хайфа, Израиль)

Соколов Борис Владимирович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), (Санкт-Петербург, РФ)

Уткин Лев Владимирович – директор высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, РФ)

Юркевич Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, Главный научный сотрудник лаборатории Технической диагностики и отказоустойчивости ИПУ РАН. (Москва, РФ)

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Журнал «Надежность»

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9782 от 11 сентября 2001 года.

Официальный печатный орган Российской академии надежности

Издатель журнала

ООО «Журнал «Надежность»

Генеральный директор

Дубровская А.З.

Адрес: 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, оф. 209

ООО «Журнал «Надежность»

www.dependability.ru

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140, г. Москва, Верхняя Красносельская, 2/1, стр. 2, этаж 2, пом II, ком. 2А, 2Б

Подписано в печать 18.12.2020

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60x90/8, Бумага глянцев

Журнал издается ежеквартально с 2001 года, стоимость одного экземпляра 1045 руб., годовой подписки 4180 руб., телефон редакции 8 (495) 967-77-05, e-mail: dependability@bk.ru

Статьи рецензируются.
Статьи опубликованы в авторской редакции.

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ» (АО «НИИАС»)

СОДЕРЖАНИЕ

Структурная надежность. Теория и практика

Зеленцов Б.П. Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле 3

Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора 13

Дискуссия по терминологии надежности

Плотников Н.И. Разработка автомата надежности техники (обоснование регулирования стандартизации) 21

Безопасность. Теория и практика

Брабанд Й., Шебе Х. Оценка безопасности искусственного интеллекта 25

Антонов С.Г., Анциферов И.И., Климов С.М. Методика инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при информационно-технических воздействиях 35

Управление рисками. Теория и практика

Кузьмина Н.М., Ридли А.Н. Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами 42

Функциональная надежность. Теория и практика

Крянев А.В., Семенов С.С., Калдаева А.Э. Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов 50

Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В., Медведев В.И. Повышение надежности прогноза стрессоустойчивости при профессиональном психологическом отборе летных специалистов 61

Гнеденко – Форум 67

Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле

Борис П. Зеленцов, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, Новосибирск
zelentsov@mail.ru



Борис П.
Зеленцов

Резюме. Цель. Проведенное исследование направлено на составление аналитической модели надежности объекта в условиях мониторинга технического состояния с постоянным периодом между проверками и с учетом недостоверного контроля и отказов разного вида. Основное назначение модели – расчет и прогнозирование показателей надежности, зависящих от заданных условий. **Методы.** Модель основана на теории марковских процессов. Применены модели двух типов: модель дискретного процесса в непрерывном времени и полумарковская модель. Математические операции по реализации модели выполнены в матричном виде. Эксплуатация объекта представлена в виде повторяющихся циклов, отделенных друг от друга состоянием восстановления. Модель в непрерывном времени позволяет получить вероятности состояний на периоде между проверками, средние времена нахождения в состояниях и вероятности состояний в конце периода. Вероятности попадания в состояния в конце периода являются исходными для полумарковской модели, с помощью которой получены средние числа попаданий в состояния на одном цикле. **Результаты.** Расчет среднего времени работоспособного и неработоспособного состояний на одном цикле произведен с использованием среднего числа попадания в состояния и среднего времени нахождения в состояниях. На основе этих параметров получены формулы для расчета коэффициента готовности и коэффициента неготовности. Из приведенной модели следует, что показатели надежности зависят от интенсивностей явных и скрытых отказов, периодичности проверок и ошибок контроля. Приведены результаты расчетов для среднего времени цикла и коэффициента неготовности при разных интенсивностях отказов и для разных вероятностей ошибок контроля. Показано, что среднее время цикла существенно зависит от вероятности ошибки контроля I рода и практически не зависит от вероятности ошибки контроля II рода. Однако коэффициент неготовности практически не зависит от вероятности ошибки контроля I рода, однако имеется существенная зависимость от вероятности ошибки контроля II рода. **Выводы.** Представленная модель позволяет рассчитать и спрогнозировать показатели надежности с учетом наличия явных и скрытых отказов и параметров системы мониторинга. При проектировании новых и совершенствовании обслуживания существующих систем следует учитывать влияние различных факторов на уровень надежности.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния объекта, явные и скрытые отказы, периодичность проверок, ошибки контроля.

Для цитирования: Зеленцов Б.П. Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле // Надежность. 2020. №4. С. 3-12. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-3-12>

Поступила 29.09.2020 г. / После доработки 08.10.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение

Известно, что надежность объекта зависит не только от видов и параметров отказов, но и от системы технического обслуживания, составной частью которой является мониторинг технического состояния, который заключается в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Ввиду этого исследования надежности объектов с учетом мониторинга технического состояния остаются актуальными.

Во время эксплуатации объект может находиться в разных состояниях при использовании по назначению, подвергаться разным видам технического обслуживания, в том числе проверкам технического состояния. С этой точки зрения эксплуатацию объекта можно представить в виде трех фаз: использование по назначению (функционирование), контроль технического состояния и восстановление.

При использовании объекта по назначению производится мониторинг его технического состояния – процесс наблюдения за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг реализуется в виде операций контроля технического состояния, которые проводятся непрерывно или периодически. Рассматривается два варианта технического состояния, связанного с отказами: отказ обнаруживается или не обнаруживается в момент его возникновения. С этой точки зрения говорят о явных и скрытых отказах. Назначение системы мониторинга заключается в том, что периодически проводятся проверки, контроль функционирования, измерения параметров и на основании этого устанавливается факт наличия скрытого отказа.

Обзор источников

Мониторинг технического состояния применяется в разных областях техники с учетом специфических особенностей. Так, в области энергетики одной из основных проблем является релейная защита энергосистем, где требуется контролировать такие события, как ложное срабатывание системы мониторинга, отказ в функционировании, внутренние и внешние короткие замыкания [22, 23]. Аналитическая модель функционирования релейной защиты энергосистем, в которой учтены три вида отказов и система контроля работоспособности системы, рассмотрена в [19]. Модель позволила получить частоты отказов и спрогнозировать уровень готовности системы и установить необходимую частоту проверок технического состояния системы релейной защиты.

Оборудование телекоммуникационных сетей относится к системам длительного использования, в которых проводится непрерывный и периодический мониторинг различных участков сети, что позволяет установить необходимый уровень готовности сети с учетом резервирования оборудования и характеристик восстановления [2].

Моделирование мониторинга позволяет решать проблемы исследования, проектирования и совершенствования технических систем. Для этих целей используют теорию дискретных марковских процессов в непрерывном и дискретном времени. Как в нашей стране, так и за рубежом проводятся разнообразные исследования в этой области.

Во многих исследованиях переходы между состояниями рассматриваются в непрерывном времени. Эти переходы описаны системой дифференциальных уравнений. Этот подход использован в [13, 15, 17] при составлении моделей надежности сложных систем. В [11] на основе системы дифференциальных уравнений описаны различные технические системы.

Системы со встроенным контролем изучались многими авторами. Так, в [16] исследован контроль правильности выполнения функции в системах с восстановлением. Модель основана на теории марковских процессов в непрерывном времени, при этом переходы между состояниями описаны с помощью системы дифференциальных уравнений.

В исследованиях широко используются модели на основе полумарковских процессов [12, 18]. В [10] приведены теория и примеры применения полумарковских процессов. Применен метод вложенных цепей Маркова, на основе которого исследованы характеристики процессов в нестационарном режиме, в частности, временные характеристики в системах массового обслуживания.

В работе [13] исследовано влияние полноты, глубины и безотказности контроля при моделировании надежности резервированных систем. Разработаны модели типовых структур надежности. Результаты моделирования позволяют обоснованно выдвигать требования к характеристиками систем контроля.

В [21] на основе аналитических методов мониторинга составлены модели обнаружения и диагностики отказов и повреждений в сложных системах. Конкретные исследования, связанные с периодичностью профилактических мероприятий, приведены в [15].

С системой мониторинга тесно связаны задачи по эксплуатационным испытаниям, которые являются достоверным источником получения информации об исходных характеристиках надежности [3, 14, 20]. Эти характеристики используются при построении различных моделей, реально отражающих процессы в технических системах. От рациональной организации эксплуатационных испытаний зависит достоверность получаемой информации и стоимость системы мониторинга.

Концептуальная модель

Во время функционирования объект может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. В неработоспособное состояние объект переходит при наступлении скрытого отказа, который не обнаруживается в момент его возникновения. Такие

отказы обнаруживаются при проверках технического состояния в рамках проведения контрольных операций.

Таким образом, с точки зрения мониторинга технического состояния отказы объекта делятся на два типа: скрытые и явные.

Объект функционирует и периодически подвергается проверкам. Между проверками может произойти отказ объекта, в результате чего он переходит из работоспособного состояния в неработоспособное. Объект используется по назначению как в работоспособном, так и в неработоспособном состоянии. Если проверке подвергается работоспособный объект, то после проверки он возвращается на функционирование. Если же проверке подвергается неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого он возвращается на функционирование.

Наблюдение за объектом во время эксплуатации с целью получения информации о его техническом состоянии производится в следующих случаях:

1) при наступлении скрытого отказа объект переходит в неработоспособное состояние, которое обнаруживается при проведении очередной проверки;

2) при наступлении явного отказа он обнаруживается системой непрерывного мониторинга, после чего объект направляется на восстановление.

Явные отказы обнаруживаются системой непрерывного мониторинга в момент их возникновения, а скрытые отказы обнаруживаются при периодических проверках. Поэтому продолжительность периода между проверками может быть:

- 1) установленной, если явный отказ не произошел;
- 2) меньше установленной, если происходит явный отказ.

В данной модели приняты следующие условия и допущения:

1) при функционировании объекта могут произойти скрытые и/или явные отказы;

2) скрытые и явные отказы происходят с постоянными интенсивностями, то есть отказы наступают в случайный момент времени, а время до отказа распределено по показательному закону;

3) контроль состояния объекта производится с постоянным периодом, при этом начало каждого периода отсчитывается от начала функционирования после восстановления или очередной проверки;

4) при обнаружении отказа объект поступает на восстановление, после которого начинается функционирование в работоспособном состоянии;

5) при проведении периодической проверки возможны ошибки контроля I и II рода;

6) продолжительности проведения проверок и восстановления приняты пренебрежимо малыми.

Последнее допущение принято для упрощения модели. Такое допущение позволяет оценить влияние различных факторов в «чистом виде». В частности, в соответствии с установленными нормами коэффициент готовности является вероятностью работоспособного

состояния без учета планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусмотрено. В случае необходимости учесть конечное время нахождения в состояниях контроля и восстановления в рамках данной модели не составляет затруднений.

Целью статьи является составление модели надежности объекта с постоянным периодом между проверками с учетом приведенных условий и ограничений.

Методы

Модели, приведенные в данной статье, основаны на теории марковских процессов. Применяются модели двух типов: модель дискретного процесса в непрерывном времени и полумарковская модель.

С помощью марковской модели в непрерывном времени находят вероятности состояний. Исходными являются интенсивности переходов между состояниями λ_{ij} , представленные в виде матрицы интенсивностей

$\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$ на некотором множестве состояний. По матрице Λ находится изображение вероятностей состояний в матричном виде:

$$P(s) = (sE - \Lambda)^{-1} \quad (1)$$

где s – комплексная переменная преобразования Лапласа; E – единичная матрица.

С помощью обратного преобразования Лапласа находится матрица вероятностей состояний $P(t) = P(s)$, где

матрица $P(t) = \|p_{ij}(t)\|$, элемент $p_{ij}(t)$ этой матрицы – вероятность того, что в момент времени t процесс находится в j -м состоянии при условии, что i -е состояние является начальным. Если известно начальное распределение вероятностей состояний $p(0)$, то вероятности состояний можно представить в виде строки [4, 5]:

$$p(t) = p(0) \times P(t). \quad (2)$$

Замечание. Для нахождения вероятностей состояний не требуется составлять и решать систему дифференциальных уравнений. Вероятности состояний находятся с помощью стандартных операций с использованием компьютерной математики.

Далее в данной модели использован метод относительных частот, основанный на теории полумарковских процессов [4, 6]. Исходными параметрами при этом являются вероятности прохождений. Вероятность прохождения q_{ij} – это вероятность перехода из i -го состояния в j -е состояние при условии, что происходит выход из i -го состояния.

Пусть U – некоторое множество несущественных состояний. В матрице вероятностей прохождений на множестве U , Q_{UU} , отображены переходы только между состояниями множества U . По матрице Q_{UU} находится матрица относительных частот N_U на множестве U :

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - Q_{UU})^{-1}, \quad (3)$$

где $n_U(i, j)$ – среднее число вхождений (попаданий) в j -е состояние до выхода из множества U при условии,

что i -е состояние является начальным при вхождении в множество U . Элементы матрицы относительных частот названы относительными частотами состояний.

Если известно начальное распределение вероятностей состояний $q(0)$, то относительные частоты состояний можно представить в виде строки

$$n_U = \|n_U(j)\| = q(0) \cdot N_U. \quad (4)$$

По относительным частотам состояний и вероятностям состояний в непрерывном времени находятся показатели надежности объекта. В рамках приведенной модели будут вычислены :

- средняя продолжительность работоспособного и неработоспособного состояния;
- средняя периодичность восстановления;
- коэффициент готовности и коэффициент неготовности.

Операции, выполняемые при построении модели, могут быть реализованы вручную или в какой-либо системе компьютерной математики.

Вероятности состояний на одном периоде

На одном периоде могут произойти как скрытые, так и явные отказы, при этом явный отказ может произойти как в работоспособном состоянии, так и в неработоспособном состоянии. Следует иметь в виду, что явный отказ может произойти после скрытого отказа, однако скрытый отказ после явного произойти не может, так как явный отказ обнаруживается системой мониторинга в момент его возникновения и объект направляется на восстановление. Как скрытые, так и явные отказы происходят в течение периода в непрерывном времени.

Пусть работоспособное состояние является начальным на периоде. Диаграмма состояний в непрерывном времени на одном периоде приведена на рис. 1, где обозначено: 1Р – работоспособное состояние; 2С – неработоспособное состояние со скрытым отказом; 3СЯ – состояние с двумя типами отказов; 4Я – состояние только с явным отказом. Переходы между состояниями происходят в результате скрытого и явного отказов в случайное время в течение периода с интенсивностями λ_c и λ_y .

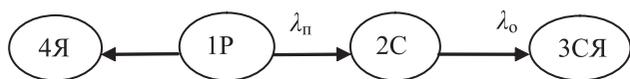


Рис. 1. Диаграмма состояний в непрерывном времени на одном периоде

Исходная матрица интенсивностей переходов на одном периоде:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda_c - \lambda_y & \lambda_c & 0 & \lambda_y \\ 0 & -\lambda_y & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Выполнив необходимые преобразования (1) и (2), получим вероятности состояний на одном периоде при начальном состоянии 1, которые являются элементами первой строки матрицы $P(t)$:

$$p_{11}(t) = \exp(-\lambda \cdot t); \quad p_{12}(t) = \exp(-\lambda_y \cdot t) - \exp(-\lambda \cdot t);$$

$$p_{13}(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda} + \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot t) - \exp(-\lambda_y \cdot t);$$

$$p_{14}(t) = \frac{\lambda_y}{\lambda} - \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (5)$$

где $\lambda = \lambda_c + \lambda_y$ – суммарная интенсивность отказов.

Видно, что $p_{11}(t) + p_{12}(t) + p_{13}(t) + p_{14}(t) = 1$. Вероятность наступления явного отказа равна сумме вероятностей состояний 3 и 4:

$$p_y(t) = p_{13}(t) + p_{14}(t) = 1 - \exp(-\lambda_y \cdot t). \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что состояния 1 и 2 фиксируются системой мониторинга в конце интервала между проверками, а состояния 3 и 4 – в момент наступления явного отказа.

Если состояние 2 является начальным, то

$$p_{21}(t) = p_{24}(t) = 0; \quad p_{22}(t) = \exp(-\lambda_y \cdot t);$$

$$p_{24}(t) = 1 - \exp(-\lambda_y \cdot t). \quad (7)$$

Введем параметр, который назовем приведенной интенсивностью отказов:

$\rho_c = \lambda_c \cdot T$, $\rho_y = \lambda_y \cdot T$, $\rho = \lambda \cdot T$. Приведенная интенсивность отказов – это среднее число отказов в течение периода T : ρ_c и ρ_y – приведенные интенсивности скрытых и явных отказов, ρ – приведенная суммарная интенсивность скрытых и явных отказов. Использование одного параметра вместо двух позволяет упростить формулы и расчеты.

Вероятности состояний в конце периода выразим через приведенные интенсивности. При начальном состоянии 1:

$$p_{11}(T) = \exp(-\lambda \cdot T) = \exp(-\rho);$$

$$p_{12}(T) = \exp(-\lambda_y \cdot T) - \exp(-\lambda \cdot T) = \exp(-\rho_y) - \exp(-\rho) = \exp(-\rho_y) \cdot (1 - \exp(-\rho_c));$$

$$p_{13}(T) = \frac{\lambda_c}{\lambda} + \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot T) - \exp(-\lambda_y \cdot T) = \frac{\rho_c}{\rho} + \frac{\rho_y}{\rho} \cdot \exp(-\rho) - \exp(-\rho_y);$$

$$p_{14}(T) = \frac{\lambda_y}{\lambda} - \frac{\lambda_y}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda \cdot T) = \frac{\rho_y}{\rho} + \frac{\rho_y}{\rho} \cdot \exp(-\rho) = \frac{\rho_y}{\rho} \cdot (1 - \exp(-\rho)). \quad (8)$$

Табл. 1. Виды периодов между последовательными проверками

Вид периода	Начальное состояние	События на периоде	Конечное состояние	Обозначение периода	Вероятность периода
1. Работоспособный период	P	–	P	PP	$p_{pp}=p_{11}(T)$
2. Период со СО	P	СО	C	PC	$p_{pc}=p_{12}(T)$
3. Период с ЯО и СО	P	СО и ЯО	CЯ	PCЯ	$p_{pcя}=p_{13}(T)$
4. Период с ЯО	P	ЯО	Я	PЯ	$p_{pя}=p_{14}(T)$
5. Неработоспособный период	H	–	H	HH	$p_{hh}=p_{22}(T)$
6. Неработоспособный период с ЯО	H	ЯО	Я	HЯ	$p_{hy}=p_{23}(T)$

При начальном состоянии 2:

$$\begin{aligned}
 p_{21}(T) &= p_{24}(T) = 0; \\
 p_{22}(T) &= \exp(-\lambda_{я} \cdot T) = \exp(-\rho_{я}); \\
 p_{23}(T) &= 1 - \exp(-\lambda_{я} \cdot T) = 1 - \exp(-\rho_{я}). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Период может начинаться с работоспособного или неработоспособного состояния, а заканчиваться может любым состоянием. Поэтому период можно характеризоваться начальным и конечным состоянием. В рассматриваемой модели могут иметь место 6 видов периодов, которые приведены в табл. 1. В табл. 1 обозначено: P и H – работоспособное и неработоспособное состояние объекта, СО и ЯО – скрытый и явный отказ.

Продолжительности состояний на одном периоде

Пусть известен вид периода по начальному и конечному состоянию. Это означает, что переходы между состояниями внутри периода прошли по заданному варианту в соответствии с концептуальной моделью. Переходы между состояниями и вероятности состояний, в которых объект является работоспособным или неработоспособным, приведены в табл. 2.

Пояснение. В работоспособном состоянии отказов нет, в неработоспособном состоянии имеется только скрытый отказ.

Для периода вида РСЯ вероятности состояний

$$p_{11}(t) = \exp(-\lambda_c \cdot t);$$

$$\begin{aligned}
 p_{12}(t) &= \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_{я}} \cdot (\exp(-\lambda_{я} \cdot t) - \exp(-\lambda_c \cdot t)); \\
 p_{13}(t) &= 1 - \frac{\lambda_c \cdot \exp(-\lambda_{я} \cdot t) - \lambda_{я} \cdot \exp(-\lambda_c \cdot t)}{\lambda_c - \lambda_{я}}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Проверка показывает, что $p_{11}(t) + p_{12}(t) + p_{13}(t) = 1$, при этом с вероятностью $p_{13}(t)$ в момент времени t период будет прерван, поскольку явный отказ обнаруживается в момент его возникновения, а вероятность того, что в момент времени t период будет продолжаться, составит

$$p_{11}(t) + p_{12}(t) = \frac{\lambda_c \cdot \exp(-\lambda_{я} \cdot t) - \lambda_{я} \cdot \exp(-\lambda_c \cdot t)}{\lambda_c - \lambda_{я}}. \quad (11)$$

Очевидно, что продолжительности состояний, а также продолжительность периода зависят от вида периода. Явный отказ обнаруживается системой непрерывного контроля в момент его возникновения, после чего объект направляется на восстановление. Ввиду этого явные отказы уменьшают продолжительность периода, однако скрытые отказы не уменьшают его.

Среднее время нахождения объекта в j -м состоянии при начальном i -м состоянии на одном периоде вычисляется по формуле:

$$\theta_{ij} = \int_0^T p_{ij}(t) dt. \quad (12)$$

Среднее время работоспособного состояния (θ_p) и неработоспособного (θ_n) состояния на периоде каждого вида, а также средние продолжительности периодов вычислены путем интегрирования соответствующих вероятностей. Эти продолжительности приведены в табл. 3.

Табл. 2. Вероятности работоспособного и неработоспособного состояний на периодах различного вида ($t \in [0; T]$)

Вид периода	Переходы между состояниями	Вероятности состояний	
		работоспособного	неработоспособного
1. PP	P→P	$p_p(t)=1$	$p_n(t)=0$
2. PC	P→C	$p_p(t)=\exp(-\lambda_c \times t)$	$p_n(t)=1-\exp(-\lambda_c \times t)$
3. PCЯ	P→C→Я	$p_p(t)=\exp(-\lambda_c \times t)$	$p_n(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_{я}} \cdot (\exp(-\lambda_{я} \cdot t) - \exp(-\lambda_c \cdot t))$
4. PЯ	P→Я	$p_p(t)=\exp(-\lambda_{я} \times t)$	$p_n(t)=0$
5. HH	H→C	$p_p(t)=0$	$p_n(t)=1$
6. HЯ	H→Я	$p_p(t)=0$	$p_n(t)=\exp(-\lambda_{я} \times t)$

Табл. 3. Средние времена нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на периодах разного вида

Вид периода	θ_p	θ_n	Сред. продолжительность периода
1. РР	T	0	$T_{pp} = T$
2. РС	$\frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} \cdot T$	$\frac{\rho_c - (1 - \exp(-\rho_c))}{\rho_c} \cdot T$	$T_{pc} = T$
3. РСЯ	$\frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} \cdot T$	$\frac{\rho_c(1 - \exp(-\rho_{я})) - \rho_{я}(1 - \exp(-\rho_c))}{(\rho_c - \rho_{я}) \cdot \rho_{я}} \cdot T$	$T_{pcя} = \theta_c + \theta_n$
4. РЯ	$\frac{1 - \exp(-\rho_{я})}{\rho_{я}} \cdot T$	0	$T_{pя} = \frac{1 - \exp(-\rho_{я})}{\rho_{я}} \cdot T$
5. НН	0	T	$T_{nn} = T$
6. НЯ	0	$\frac{1 - \exp(-\rho_{я})}{\rho_{я}} \cdot T$	$T_{ня} = \frac{1 - \exp(-\rho_{я})}{\rho_{я}} \cdot T$

Сумма времен θ_p и θ_n является средним временем периода. Средние времена θ_p и θ_n получены путем интегрирования вероятностей работоспособного и неработоспособного состояния на соответствующем периоде. Средняя продолжительность периода вида РСЯ:

$$T_{pcя} = \theta_c + \theta_n = \frac{\rho_c^2 \cdot (1 - \exp(-\rho_{я})) - \rho_{я}^2 \cdot (1 - \exp(-\rho_c))}{(\rho_c - \rho_{я}) \cdot \rho_c \cdot \rho_{я}} \cdot T.$$

Диаграмма состояний

В соответствии с концептуальной моделью, время эксплуатации объекта состоит из периодов между проверками, самих проверок и восстановления. Диаграмма состояний эксплуатации приведена на рис. 2. Состояния пронумерованы и обозначены смысловыми индексами: 1Р – работоспособное состояние объекта в начале периода; 2РР – работоспособное состояние объекта в конце периода; 3РС – состояние объекта в конце периода со скрытым отказом; 4РСЯ – состояние объекта со скрытым и явным отказом; 5РЯ – состояние объекта с явным отказом; 6Н – неработоспособное состояние объекта в начале периода в результате ошибки контроля II рода; 7НН – неработоспособное состояние объекта в конце периода; 8НЯ – неработоспособное состояние объекта с явным отказом; 9ПР и 10ПН – проверка работоспособного и неработоспособного объекта в конце периода; 11ПЯ – проверка объекта с явным отказом (обнаружение явного отказа); 12В – восстановление объекта.

Из приведенной диаграммы видно, что работоспособное состояние является начальным после восстановления или очередной проверки работоспособного объекта. Следующий за этим период может быть работоспособным (переход 1→2), со скрытым отказом (переход 1→3) или с явным отказом (переходы 1→4 и 1→5). Таким образом, работоспособное состояние 2 и неработоспособное состояние 3 – это состояния в конце периода, а состояния 4 и 5 – состояния, продолжительность которых меньше периода.

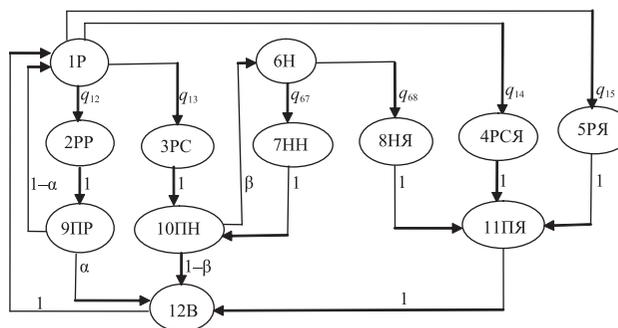


Рис. 2. Диаграмма состояний эксплуатации объекта

На диаграмме показаны переходы между состояниями в результате ошибок контроля: переход 9→12 в результате ошибки контроля I рода с вероятностью α и переход 10→6 в результате ошибки контроля II рода с вероятностью β . Переходы, обозначенные вероятностью 1, происходят достоверно.

После состояний 2 и 3, в рамках контроля технического состояния, производится проверка соответствия работоспособного и неработоспособного объекта. Если объект является работоспособным, то после проверки он возвращается на функционирование с вероятностью $1 - \alpha$, а если он является неработоспособным, то направляется на восстановление с вероятностью $1 - \beta$. После восстановления объект направляется на функционирование в работоспособном состоянии.

На диаграмме приведены переходы между состояниями и соответствующие вероятности прохождений. Вероятность прохождения является характеристикой соответствующего периода:

$$q_{12} = p_{pp}; q_{13} = p_{pc}; q_{14} = p_{pcя}; q_{15} = p_{pя}; q_{67} = p_{nc}; q_{68} = p_{ня}. \quad (14)$$

Переходы между состояниями описываются с помощью матрицы вероятностей прохождений. Матрица

вероятностей прохождений на всем множестве состояний имеет вид:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{67} & q_{68} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Относительные частоты состояний

Разобьем множество состояний на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$, $V = \{12\}$. В результате такого разбиения эксплуатацию объекта можно представить в виде последовательных переходов между этими подмножествами: $U \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow V \dots$. Будем называть циклом нахождение объекта в состояниях подмножества U и следующее за ним нахождение в состояниях подмножества V . Из диаграммы рис. 1 следует, что подмножество U всегда начинается с состояния 1.

Матрица вероятностей прохождений на подмножестве U , Q_{UU} , получается путем удаления 12-й строки и 12-го столбца из матрицы Q . По матрице Q_{UU} вычисляется матрица относительных частот N_U по формуле (3). Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \rightarrow U$, то будем вычислять только первую строку матрицы N_U . Вычислить элементы обратной матрицы N_U можно несколькими способами (рекомендуется с применением систем компьютерной математики).

Выразим вероятности прохождений через приведенные интенсивности:

$$\begin{aligned} q_{12} &= p_{pp} = \exp(-\rho); \quad q_{13} = p_{pc} = \exp(-\rho_y) - \exp(-\rho); \\ q_{14} &= p_{pca} = \frac{\rho_c \cdot (1 - \exp(-\rho_y)) - \rho_y \cdot (\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho))}{\rho} = \\ &= \frac{\rho_c + \rho_y \cdot \exp(-\rho) - \rho \cdot \exp(-\rho_y)}{\rho}; \\ q_{15} &= p_{py} = \frac{\rho_y \cdot (1 - \exp(-\rho))}{\rho}; \\ q_{67} &= p_{nn} = \exp(-\rho_y); \quad q_{68} = p_{nc} = 1 - \exp(-\rho_y). \end{aligned} \quad (15)$$

Приведем элементы первой строки матрицы N_U , выразив их через вероятности прохождений и через приведенные интенсивности:

$$\begin{aligned} n(1,1) &= \frac{1}{\Delta 1}; \quad n(1,2) = \frac{q_{12}}{\Delta 1} = \frac{\exp(-\rho)}{\Delta 1}; \\ n(1,3) &= \frac{q_{13}}{\Delta 1} = \frac{\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho)}{\Delta 1}; \\ n(1,4) &= \frac{q_{14}}{\Delta 1} = \frac{\rho_c \cdot (1 - \exp(-\rho_y)) - \rho_y \cdot (\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho))}{\rho \cdot \Delta 1}; \\ n(1,5) &= \frac{q_{15}}{\Delta 1} = \frac{\rho_y \cdot (1 - \exp(-\rho))}{\rho \cdot \Delta 1}; \\ n(1,6) &= \frac{\beta \cdot q_{13}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\beta \cdot (\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho))}{\Delta 1 \cdot \Delta 2}; \\ n(1,7) &= \frac{\beta \cdot q_{13} \cdot q_{67}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\beta \cdot (\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho)) \cdot \exp(-\rho_y)}{\Delta 1 \cdot \Delta 2}; \\ n(1,8) &= \frac{\beta \cdot q_{13} \cdot q_{68}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\beta \cdot (\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho)) \cdot (1 - \exp(-\rho_y))}{\Delta 1 \cdot \Delta 2}; \\ n(1,9) &= \frac{q_{12}}{\Delta 1} = \frac{\exp(-\rho)}{\Delta 1}; \\ n(1,10) &= \frac{q_{13}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{\exp(-\rho_y) - \exp(-\rho)}{\Delta 1 \cdot \Delta 2}; \\ n(1,11) &= \frac{q_{14} + q_{15}}{\Delta 1} + \frac{\beta \cdot q_{13} \cdot q_{68}}{\Delta 1 \cdot \Delta 2} = \frac{1 - \exp(-\rho_y)}{\Delta 1} + \\ &+ \frac{\beta \cdot (1 - \exp(-\rho_c)) \cdot (1 - \exp(-\rho_y)) \cdot \exp(-\rho_y)}{\Delta 1 \cdot \Delta 2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\Delta 1 = 1 - (1 - \alpha) \cdot q_{12} = 1 - (1 - \alpha) \cdot \exp(-\rho)$; $\Delta 2 = 1 - \beta \cdot q_{67} = 1 - \beta \cdot \exp(-\rho_y)$.

Для лучшего понимания полученных результатов приведем некоторые соотношения, подтверждающие правильность приведенных результатов:

1) произведение первой строки матрицы N_U на матрицу $(E - Q_{UU})$ равно строке, первый элемент которой равен 1, остальные элементы равны 0;

2) попадания в состояние 1 распределяются между состояниями 2, 3, 4, 5:

$$n(1,2) + n(1,3) + n(1,4) + n(1,5) = n(1,1);$$

3) состояние с явным отказом на одном цикле формируется из состояний 4, 5, 8: $n(1,4) + n(1,5) + n(1,8) = n(1,11)$.

Показатели надежности объекта

Перейдем к вычислению показателей надежности с учетом принятых условий и допущений. В соот-

ветствии с концептуальной моделью среднее время работоспособного и неработоспособного состояний на одном цикле определяется этими временами в состояниях 2, 3, 4, 5, 7, 8.

Среднее время работоспособного состояния на одном цикле:

$$t_p = \left[\frac{n(1,2) + n(1,3) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c} + n(1,4) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_c)}{\rho_c}}{\rho_c} + n(1,5) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_a)}{\rho_a} \right] \cdot T. \quad (17)$$

Среднее время неработоспособного состояния на одном цикле

$$t_n = \left[\frac{n(1,3) \cdot \frac{\rho_c - (1 - \exp(-\rho_c))}{\rho_c} + n(1,4) \cdot \frac{\rho_c - (1 - \exp(-\rho_c))}{\rho_c}}{(\rho_c - \rho_a) \cdot \rho_a} + n(1,7) + n(1,8) \cdot \frac{1 - \exp(-\rho_a)}{\rho_a} \right] \cdot T. \quad (18)$$

Средняя продолжительность цикла:

$$t_{\Sigma} = t_p + t_n. \quad (19)$$

Коэффициент готовности K_r и коэффициент неготовности K_n :

$$K_r = t_p / t_{\Sigma}; K_n = t_n / t_{\Sigma}. \quad (20)$$

Результаты

Расчеты проведены для среднего времени цикла и коэффициента неготовности при разных приведенных интенсивностях отказов и для разных вероятностей ошибок контроля. Эти расчеты представлены в виде таблиц с конкретными числовыми значениями. В таблицах видны закономерности изменения показателей надежности и прогнозируемые значения показателей надежности.

В табл. 4 приведены расчетные значения этих показателей при разных значениях вероятностей ошибок контроля и при приведенных интенсивностях $\rho_c = 0,005$ и $\rho_a = 0,05$ и при периодичности контроля $T = 1$ час., а в табл. 5 приведены аналогичные расчеты при $\rho_c = 0,05$; $\rho_a = 0,005$; $T = 1$ час.

Из проведенных расчетов видно, что среднее времени цикла существенно зависит от вероятности ошибки контроля I рода, поскольку эта вероятность определяет среднее число работоспособных периодов: чем больше вероятность ошибки контроля I рода, тем меньше среднее число периодов на одном цикле. Из расчетов видно, что среднее времени цикла изменяется на порядок при изменении вероятности ошибки I рода. Видно также, что среднее времени цикла практически не зависит от вероятности ошибки II рода, так как вклад в неработоспособные состояния за счет этой ошибки является пренебрежимо малым по сравнению с временем цикла. Этому фактору имеется простое объяснение: неработоспособные состояния в результате ошибки контроля II рода могут произойти только после скрытого отказа, а вероятность скрытого отказа на одном периоде является достаточно

Табл. 4. Значения коэффициента неготовности при $\rho_c = 0,005$; $\rho_a = 0,05$; $T = 10$ час.

α	β	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
		t_{Σ}	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7
0	K_n	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	16,0	16,0
0,01	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	10,0	10,0
0,05	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	6,7	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8
0,1	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
0,2	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
0,3	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
0,4	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	t_{Σ}	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
0,5	K_n	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$

Табл. 5. Значения коэффициента неготовности при $\rho_c = 0,05$; $\rho_n = 0,005$; $T = 10$ час.

α	β	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
		$t_{ц}$	18,7	18,7	18,7	18,9	19,1	19,5	20,0
0	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	15,9	15,9	15,9	16,0	16,3	16,5	16,9	17,4
0,01	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	9,9	9,9	9,9	10,0	10,2	10,3	10,6	10,9
0,05	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	6,7	6,8	6,8	6,8	6,9	7,0	7,2	7,4
0,1	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5
0,2	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2
0,3	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5
0,4	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	$t_{ц}$	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1
0,5	K_n	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$

малой величиной. Следует отметить, что среднее время цикла определяет частоту восстановления, которая может послужить основой для расчета объемов ремонтно-восстановительных работ. Возможно также установить частоту или долю ложных восстановлений в общем объеме ремонтно-восстановительных работ.

Из приведенной модели следует, что коэффициент неготовности практически не зависит от вероятности ошибки I рода, поскольку средние относительные частоты всех состояний одинаково пропорциональны параметру, зависящему от вероятности ошибки I рода (этот параметр обозначен $\Delta 1$). Однако коэффициент неготовности существенно зависит от вероятности ошибки контроля II рода. Этот показатель может изменяться в разы и даже на 2 – 3 порядка при соответствующих изменениях вероятности ошибки II рода. Это обстоятельство объясняется тем, что продолжительность неработоспособных состояний может существенно изменяться при изменении вероятности ошибки II рода, хотя эти значения составляют незначительную часть среднего времени цикла.

Уровень надежности зависит также от соотношения между скрытыми и явными отказами: чем больше доля скрытых отказов в общем потоке отказов, тем больше коэффициент неготовности, который может увеличиваться на 1 – 2 порядка от этого фактора. Таким образом, увеличение доли скрытых отказов может существенно снизить уровень надежности.

Обсуждение

Особенность данной модели заключается в том, что периодичность проверок технического состояния в рамках системы мониторинга проводится с постоянным

периодом. В аналитических моделях, применяемых для описания мониторинга технических систем, зачастую используют случайный период между проверками. Использование в моделях разных способов задания периодичности проверок может существенно изменить расчетные значения показателей надежности. В частности, в [8] показано, что различие между коэффициентом неготовности при разных способах задания периодичности проверок может составлять несколько порядков при разных значениях интенсивности отказов.

Другая особенность приведенной модели заключается в том, что отсчет времени начинается от наблюдаемых событий, к которым относятся явные отказы, проверки технического состояния, завершение восстановления. Следует отметить, что в системе мониторинга отсчет времени от скрытого отказа быть не может, так как это событие не является наблюдаемым. В исследованиях на основе марковской модели принято, что продолжительность состояний является случайной и распределена по показательному закону с постоянной интенсивностью. При этом обоснование такого выбора, как правило, не приводится. Смысл параметра «интенсивность завершения состояния» также, как правило, не поясняется.

Достоинством модели является возможность ее реализации средствами компьютерного моделирования, например, в системах Mathcad и Matlab. Применение матричных методов обеспечивает простые алгоритмы расчетов в этих системах.

Заключение

При проектировании и совершенствовании обслуживания сложных систем следует принимать во внимание явные и скрытые отказы, периодичность проверок,

ошибки контроля. При этом необходимо прогнозировать и рассчитывать не только коэффициенты готовности или неготовности, но и временные характеристики, связанные с надежностью. В реальных системах мониторинга имеет место большое разнообразие в состояниях, переходах между состояниями и в числовых значениях исходных данных. Представленная модель позволяет рассчитать и спрогнозировать такие показатели с учетом влияющих факторов. Например, модель позволяет анализировать среднее время неработоспособного состояния на одном цикле и составляющие этого показателя, зависящие от скрытых отказов и вероятности ошибки контроля II рода. Возможно также учесть влияние явных отказов на среднее время неработоспособного состояния на одном цикле.

Использование приведенной модели позволяет обоснованно прогнозировать уровень надежности с учетом требований к системе мониторинга.

Библиографический список

1. Викторов В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: Ленанд, 2014. 256 с.
2. Егунов М.М., Шувалов В.П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях // Вестник СибГУТИ. 2012. № 2. С. 3-9.
3. Зверев Г.Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации. М.: URSS, 2010. 96 с.
4. Зеленцов Б.П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.
5. Зеленцов Б.П. Матричные модели функционирования оборудования систем связи // Вестник СибГУТИ. 2015. № 4. С. 62-73.
6. Зеленцов Б.П. Метод относительных частот моделирования вероятностных систем // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2. С. 51-63.
7. Зеленцов Б.П. Циклическое функционирование систем длительного использования // Вестник СибГУТИ. 2017. № 4. С. 3-14.
8. Зеленцов Б.П., Трофимов А.С. Исследование моделей расчета надежности при разных способах задания периодичности проверок // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 35-44.
9. Зубилевич А.Л., Сиднев С.А., Царенко В.А. Определение эффективности применения прогнозирующей стратегии технического обслуживания ВОЛС // XIII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества»: Сборник трудов. Том 1. М.: ИД Медиа Паблишер, 2019. С. 31-33.
10. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. М.: Высшая школа, 2012. 304 с.
11. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов. М.: МЦНМО, 2009. 588 с.
12. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.
13. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ, 2016. Выпуск 85. С. 1-27.
14. Махитко В.П., Засканов М.В., Савин М.В. Методы оценки показателей надежности изделий по результатам испытаний и эксплуатации // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. С. 293-299.
15. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
16. Половко А.М., Гуров С.М. Основы теории надежности. ВНУ-Санкт-Петербург, 2006. 560 с.
17. Рахман П.А. Показатели надежности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 146-153.
18. Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний. М.: Сов радио, 1980. 272 с.
19. Трофимов А.С. Модель функционирования релейной защиты энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 6. С. 110-114.
20. Чекмарев Ю.В. Надежность информационных систем. М.: Дик Пресс, 2012. 64 с.
21. Шайхутдинов Д.В. Методы мониторинга и диагностики сложных технических систем на базе имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (часть 1). С. 146-153.
22. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 114 с.
23. Шнеерзон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.

Сведения об авторе

Зеленцов Борис Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, Новосибирск, e-mail: zelentsov@mail.ru

Вклад автора в статью

Зеленцов Б.П. разработал аналитическую модель надежности объекта на основе матричных методов в условиях мониторинга технического состояния при постоянном периоде проверками с учетом недостоверного контроля и отказов разного вида по признаку их обнаружения.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Надежность: взгляд конструктора

Юрий П. Похабов, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»),
Российская Федерация, Красноярский край, Железногорск
pokhabov_yury@mail.ru



Юрий П. Похабов

Резюме. Цель. Предложить читателю взглянуть на надежность глазами конструктора, который обязан разработать изделие с заданными требованиями надежности. Результат такой работы – это еще не надежность как свойство, но способность, присущая конструкции, без которой требуемая надежность проявиться не может. Для проектирования высоконадежных изделий необходимо использовать формализованные практики с четким алгоритмом действий, которые, с одной стороны, не расходятся с положениями теории надежности, а, с другой стороны, должны быть полезными, понятными и доступными каждому конструктору для обеспечения требуемой надежности. **Методы.** В статье рассмотрены основные подходы, позволяющие конструктору, не нарушая существующих смысловых понятий и сложившейся терминологии надежности, решать задачи надежности технических объектов при проектировании и конструировании на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения надежности изделий, начиная с самых ранних стадий жизненного цикла. С использованием таких подходов к надежности, для предупреждения отказов вполне достаточно применять принципы физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) порождающих их причин. **Результаты.** Приведены простые математические модели, с помощью которых составлена обобщенная параметрическая модель функционирования сложных технических систем. Исходя из приведенных моделей следует, что подход к расчету надежности по известным показателям надежности компонентов и элементов может быть заменен на оценку надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций. Данный вывод не только не нарушает положений теории надежности, но и делает надежность действенным инструментом конструктора для достижения заданной надежности. Решение обобщенной параметрической модели функционирования производится с использованием методики конструкторско-технологического анализа надежности, разработанного для анализа и оценки конструкторских решений при проектировании высоконадежных изделий. **Заключение.** Предлагаемые в статье понятия, подходы, модели и методы, позволяют конструктору относиться к надежности как к работоспособности, развернутой во времени. Такая надежность всегда конкретна и учитывает все специфические особенности изделия. В этом случае процесс конструирования и обеспечение надежности становится единой и неделимой частью работы при создании изделий независимо от их уникальности, серийности изготовления, наличия или отсутствия показателей надежности компонентов и элементов. Но, самое главное, такой подход к надежности, с одной стороны, не противоречит основам современной теории надежности, а, с другой стороны, снимает у конструктора восприятие надежности, как нечто инородное, не связанное с реальной конструкцией.

Ключевые слова: теория надежности, проектирование высоконадежных систем, расчет надежности, уникальная высокоответственная система, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

Для цитирования: Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. №4. С. 13-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-13-20>

Поступила 20.07.2020 г. / После доработки 31.08.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение. Требования надежности должны быть заданы в техническом задании на разработку, как того требует, например, ГОСТ 15.016–2016. Для количественной оценки надежности принято использовать показатели, которые определяют исходя из статистических испытаний (эксплуатации) изделий либо их компонентов (элементов) ([1], Приложение (справочное). Пояснения к терминам, приведенным в стандарте). Однако прежде, чем возникнет сама возможность проведения таких статистических испытаний, на стадии выпуска рабочей конструкторской документации необходимо обосновать способность используемых инженерных решений обеспечить заданные требования надежности (обычно для этих целей принято проводить расчеты надежности по ГОСТ 27.301–95). Поскольку под надежностью чаще понимают безотказность, имеет смысл рассмотреть, что именно конструктор должен предпринять для обеспечения надежности, если она (для упрощения) задана вероятностью безотказной работы¹.

Чтобы выполнить требование технического задания по обеспечению заданной вероятности безотказной работы, конструктор, согласно современным представлениям о надежности, обязан разработать структуру изделия (как совокупность элементов и отношений между ними) с известными данными по надежности его компонентов и элементов в заданных режимах и условиях применения. Со стороны это может выглядеть как сборка LEGO для составления конструкции заданной надежности из компонентов и элементов с известными данными по надежности. Причем, если такие данные отсутствуют, то по канонам современной теории надежности их следует получить экспериментально [2–4]. На практике примерно так и поступают при проектировании радиоэлектронных средств с заданной надежностью на основе электро-радиоизделий с известными показателями надежности [5]. Электро-радиоизделия изготавливают массово, и они, как правило, достаточно компактны, чтобы иметь возможность лабораторно наработать статистические данные о надежности при заданных режимах применения в условиях предельных температур, термоциклирования, вакуума, радиации, агрессивных сред и т. п.

Для сложных технических систем (изделий), состоящих из разнотипных компонентов с различными принципами действия: корпусных деталей, механизмов, электромеханических устройств, радиоэлектронных сборок, пиротехнических средств и т. п., составление надежности по принципу LEGO может стать проблематичным. Нарботка статистических данных о надежности полноразмерных компонентов габаритных изделий (в первую очередь развертываемых крупногабаритных структур, сложных механических и электромеханических устройств, протяженных конструкций из композиционных материалов и проч.) в уникальных условиях

применения, отличных от нормальной земной среды (глубоко под водой или под землей, при повышенной радиации, в космическом пространстве и т. п.), скорее всего, будет невыполнима по технико-экономическим соображениям [6]. Можно, конечно, использовать данные о надежности объектов-аналогов, работающих в несколько иных режимах и условиях применения, например, для конструкций космических аппаратов, которые должны быть однократно развернуты на околоземной орбите, брать статистические данные при наземных срабатываниях (если бюджет финансирования позволяет провести требуемое число однородных независимых испытаний для подтверждения заданной надежности). Однако как в этом случае относиться к достоверности расчетов надежности – непонятно (ведь наземные условия испытаний отличны от условий штатного срабатывания в космосе). Еще хуже, когда изделие единичное (тем более уникальное), и данных о надежности объектов-аналогов просто не существует, например, если это десантный модуль межпланетного космического аппарата для полета на планету с венерианским типом атмосферы.

Более проблематичными могут оказаться случаи, когда безотказность задается не менее чем тремя девятками после запятой (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности). Формально это не исключает возможности отказов, тем не менее в каждом конкретном случае потеря функциональности недопустима, поскольку может привести к несоизмеримо большим потерям, чем финансовые затраты на разработку и изготовление отказавшего изделия. Характерный пример – это раскрытие конструкций автоматических космических аппаратов на околоземной орбите. Отказ любого из механизмов раскрытия может привести к гибели спутника. Например, из-за нераскрытия солнечных батарей в 2006 г. был утрачен спутник связи «Sinosat-2» стоимостью \$190 млн., а в 2019 г. – «Chinasat-18» – \$250 млн. Подобного рода инциденты, помимо прямых убытков из-за гибели космического аппарата, приводят к затратам на повторное изготовление замещающего спутника и финансовым потерям в результате репутационных издержек. Кроме того, в мирное время гибель телекоммуникационного спутника может привести к сбоям в глобальной системе связи с множеством рисков потерь из-за нарушений в передаче мобильной информации, а в военное – к критическому снижению (и даже утрате) государственной безопасности.

Если не существует возможности следовать правилам статистической теории надежности, конструктор вынужден решать проблемы обеспечения заданной надежности неформализованными эвристическими методами, которые либо не предполагают оценок надежности, либо допускают проведение расчетов надежности без учета специфики конструктивных особенностей изделий, но в любом случае они не позволяют получить ответа на вопрос, как именно достичь надежности, при которой отказы по тем или иным причинам недопустимы [7]. В этом случае остается уповать на случай или использо-

¹ Согласно ГОСТ Р 50779.10–2000 вероятность определяют действительным числом в интервале от 0 до 1, призванным отражать относительную частоту в серии наблюдений, либо степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет.

вать такую методику конструирования, которая даже без достоверных статистических данных о надежности может быть полезна, понятна и доступна каждому конструктору при обеспечении требуемой надежности.

Почему делать и считать надежность – не одно и то же. Любой расчет параметров работоспособности направлен на обоснование решений конструктора по выбору материалов, заготовок, термообработки, покрытий, размеров, допусков и т. д. В основе таких расчетов лежит принцип избыточности для исключения (или снижения) факторов неопределенности между «необходимой» структурой изделия и «случайностью» внешних факторов среды. Степень такой избыточности определяет допустимое соотношение между заданной надежностью и возможной ненадежностью [8]. Яркий пример тому – это расчет на прочность. Избыточность природной прочности выбранных конструкционных материалов и назначаемых размеров конструкций, воспринимающих внешние нагрузки, определяет требуемый запас прочности и тем самым обуславливает выбор конструкторских решений (каким быть материалам, габаритам, массе, принципам действия, технологиям изготовления и прочим особенностям конструкции). Любой конструктор, знающий, что его конструкция имеет недостаточный запас прочности (например, 0,9), обладает необходимыми знаниями из курса сопротивления материалов, которые позволяют конструктивными методами довести прочность до требуемого уровня. С надежностью все совершенно не так. Ни один конструктор, зная, что безотказность функционирования его конструкции составляет, например 0,998, не способен обосновать, как поднять надежность, положим, до 0,999. Мало того, по внешним признакам практически невозможно отличить изделия одинакового назначения с безотказностью, допустим 0,9 и 0,(9) (т. е. ноль и девять в периоде). В то же время экспертное заключение по прочности способен дать любой квалифицированный инженер даже без проведения расчетов (хотя бы в категориях «крепкий – хлипкий»).

Такая неопределенность с надежностью объясняется тем, что она призвана интегрально характеризовать буквально все свойства изделия, способные повлиять на его безотказное функционирование, один только перечень которых не так-то просто выявить. Если взять, например, прочность, то она характеризует способность конструкционного материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих от внешних сил, и одновременно является одним из свойств, которое составляет надежность. Причем, наряду с остальными составными свойствами надежности, прочность при оценке надежности необходимо рассматривать с позиции сохранения во времени (формально надежность – это свойство, характеризующее проявление свойств во времени). Поскольку сложные технические системы наделены суммой мультидисциплинарных свойств (вещественных, пространственных, временных, тепловых, электрических, механических и т. д.), каждое из которых изучают с помощью различных технических дисциплин,

то существует два возможных подхода к исследованию надежности:

- выявлять и учитывать при оценке надежности каждое из составных свойств изделия;
- не выделять по отдельности каждое из свойств изделия, а характеризовать его функционирование некими обобщенными показателями.

Следствием этих подходов в отечественной школе надежности стало (как минимум с 1989 г., как максимум с 1983 г.) единство и противоположность двух вариантов определения термина «надежность» – функционального и параметрического [9], приоритетность которых время от времени изменяется в терминообразующем стандарте надежности ГОСТ 27.002.

На практике оба подхода к надежности без каких-либо ограничений используют при расчетах на прочность с помощью модели отказов по схеме «нагрузка – прочность (сопротивление)». В этом случае считается, что вероятность безотказной работы (обобщенный показатель прочности) совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значение, которое принимает параметр прочности (конкретные параметры, влияющие на прочность) ([1], Приложение (справочное). Пояснения к терминам, приведенным в стандарте). Причем степень избыточной прочности, соответствующая заданной вероятности безотказной работы, на практике обычно нормируют установленными коэффициентами безопасности и запасами прочности [10]. Однако такая модель отказов справедлива только для случаев, когда надежность определяется исключительно прочностью или преимущественно прочностью, если требуемая надежность не слишком высокая.

Если на надежность, помимо прочности, в равной степени влияет какой-либо другой фактор, например, при функционировании подвижных механических узлов – это избыточность движущего момента, то надежность с учетом обоих факторов определяют методом фиктивных элементов [11]. Тем не менее и у такого подхода существуют ограничения. Он применим для обеспечения проектной надежности при обосновании принципиальных конструкторских решений по выбору проектных параметров конструкции. В рассматриваемом случае – это прочность конструкции и энергодостаточность приводов раскрытия, установленных в конструкцию, при условии, что она обладает требуемой прочностью [12]. При разработке рабочей конструкторской документации помимо обеспечения прочности и энергодостаточности приводов всегда требуется детально прорабатывать конструкцию с учетом технологических возможностей производства, в связи с чем появляется необходимость дополнительно рассматривать множество конструктивных и технологических факторов, влияющих на надежность [12]. Статистические методы расчета надежности в этом случае не подходят, поскольку не позволяют выявлять достаточные факторы для характеристики надежности с учетом конструктивных особенностей изделия и обосновать их количественно для подтверждения требуемых показателей надежности.

Основное противоречие между конструированием и исследованием надежности заключается в том, что согласно представлениям современной теории надежности, показатели надежности изделия характеризуют следствия, как результат конструирования без учета порождающих их причин, в то время как конструктор вынужден «конструировать» (принимать во внимание буквально все) причины для получения требуемого следствия – заданной надежности [13]. Иными словами, конструктор обязан оценивать и предупреждать практически все возможные причины отказов, а исследователю (расчетчику) надежности достаточно представить надежность вероятностным показателем, который интегрально характеризует все свойства изделия, позволяющие выполнить требуемые функции (не вдаваясь в причины невыполнения каждой из функций по-отдельности). В практическом плане специалист по надежности видит результат работы конструктора под углом случайности событий и процессов, причины которых не обязательно могут (или должны) быть известны, а для конструктора любая конструкция подчиняется принципу причинности: каждое его решение и действие влечет за собой причины потенциальных событий, способных привести к отказам. Таким образом, конструктор всегда рассматривает изделие в виде детерминированного комплекса причинно-следственных связей, а расчетчик надежности – как некий технический объект без учета генезиса, поведение которого постулируется в форме статистических гипотез. Именно такое различие взглядов конструктора и расчетчика надежности привело к тому, что в ракетно-космической технике бытуют выражения: «считают надежность те, кто ее не умеет делать» и «девятки не летают», которые лишним раз подтверждают отсутствие связи между результатом конструирования конкретного изделия и расчетом надежности на основе статистических данных объектов-аналогов.

Терминологический аспект конструкторского взгляда на надежность. Для обоснования уместности и целесообразности конструкторского взгляда на надежность, обратимся к терминологии надежности. Не вступая в терминологическую дискуссию [9], примем за основу определение термина «надежность» согласно ГОСТ 27.002: «Надежность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования». Несложно заметить, что термин «надежность» построен на основе терминологических элементов, значения которых в указанном же стандарте определены лишь для одного термина – «(технический) объект». Остальные терминологические элементы, имеющие существенное значение для однозначного понимания конструктором смысла надежности, в стандарте по терминологии надежности не определены, в первую очередь, – это такие термины как «свойство», «способность» и «(требуемая) функция». Возможно, таким образом разработчики стандарта сознательно предоставили право всем желающим

самостоятельно (на собственное усмотрение, исходя из конкретной специфики) определиться со значениями понятий, входящих в основной термин надежности. Воспользуемся таким правом с учетом специфики взгляда конструктора на проблемы надежности.

Термин «свойство» многократно определен в отечественных стандартах ГОСТ Р 8.614, ГОСТ Р ИСО 22745-2, ГОСТ Р 54136 и ГОСТ Р ИСО 15531-31, но, применительно к безотказным изделиям (работающим без отказов), автору статьи кажется наиболее подходящим емкое и афористичное понятие свойства, данное в работе [14], как *отношение вещей*. Терминологическое определение этого понятия выглядит следующим образом: «Свойство – философская категория, выражающая такую сторону предмета, которая обуславливает его различие или общность с другими предметами и обнаруживается в его отношении к ним» [15].

Термин «способность» определен в отечественных стандартах ГОСТ 33707 и ГОСТ Р ИСО 15531-1, но, опять же, применительно к безотказным изделиям (за исключением лучшего), автору статьи кажется уместным использовать данное понятие из толкового словаря [16]: «Способность – это качество, свойство, состояние, дающее возможность производить те или иные действия, исполнять ту или иную работу».

С определением термина «(требуемая) функция» по ГОСТ 27.002 дело обстоит сложнее. Во-первых, не очень понятно, чем «(требуемая) функция» отличается от понятий, используемых в других стандартах по надежности, – это «(заданная) функция» по ДСТУ 2860 и «(целевая) функция» из группы стандартов серии «Системы и комплексы космические». Учитывая, что «(требуемая) функция» и «(заданная) функция» безразлично используются в ГОСТ 27.002, то, вероятно, речь идет об эквивалентных понятиях. Во-вторых, учитывая различные омонимические и синонимические особенности понятия «функция», обратимся к определениям синонимического ряда указанного термина, которые ближе всего подходят к характеристике технических объектов (предполагая, что такая функция может безразлично выступать как требуемая, заданная или целевая):

- описание (как правило, вербальное) служебного назначения изделия, т. е. того, что должно делать изделие (составная часть) при его применении (использовании) [ГОСТ Р 53394, статья 3.2.4];
- реализация объектом выходного эффекта¹;
- выполнение в объекте процесса, соответствующего его назначению, проявление заданного условия или свойства объекта согласно требованиям нормативно-технической, и (или) конструкторской (проектной) документации [ДСТУ 2860, статья 3.1.8];
- внешнее проявление свойств какого-либо объекта в данной системе отношений [17].

¹ Определение термина принято согласно вновь разрабатываемому российскому стандарту «Системы и комплексы космические. Анализ видов, последствий и критичности отказов изделий и процессов. Общие требования».

Исходя из того, что требуемая функция – это функция, которая изначально задумана человеком (конструктором) и подлежит исполнению в процессе функционирования объекта для достижения служебного назначения, условимся в дальнейшем для безотказных объектов под **требуемой функцией** понимать *внешнее проявление ожидаемых свойств объекта в заданных режимах и условиях применения (при реализации объектом заданного выходного эффекта), которые установлены и соответствуют требованиям конструкторской документации.*

Отметим, что в рассмотренных понятиях «свойство», «способность», и «(требуемая) функция» в явном виде прослеживается упорядоченная эволюция состояний материи, изменяющейся во времени, в виде **свойств** как определенных отношений объектов в материальной системе, **способности** как состояния, дающего возможность проявления определенных свойств, и **требуемых функций** как реализации объектом предусмотренных способностей. Таким образом, требуемая функция – это результат проявления присущих объекту свойств, которые в свою очередь являются реализованной способностью (потенциальной возможностью) объекта к проявлению все тех же требуемых функций. Отмеченная иерархия понятий дает возможность изначально задумать способность объекта совершать требуемые функции (спроектировать и сконструировать), описать способность количественно как свойство (проанализировать и рассчитать) и реализовать это свойство в виде требуемой функции (изготовить и использовать объект). Если невыполнение любой из требуемых функций считать отказом, то раннее предупреждение возможных отказов становится всего лишь результатом методологического подхода к проектированию (принятию конструкторских решений, их обоснованию, исполнению и контролю). Соответственно и все задачи надежности технических объектов при проектировании и конструировании можно решать на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения надежности изделий, причем на самых ранних стадиях жизненного цикла. Для предупреждения отказов в этом случае достаточно использовать принципы физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) порождающих их причин.

Модели, необходимые конструктору для понимания надежности. Воспользуемся принципами составления простых математических моделей, с помощью которых можно создать модели функционирования самых сложных технических систем [18]:

- чем проще модель, тем меньше возможность ошибочных выводов;
- модель должна быть простой, но не проще, чем это возможно;
- пренебрегать можно чем угодно, нужно только знать, как это повлияет на решение;
- модель должна быть грубой: малые поправки не должны кардинально менять ее поведение;

- модель и расчет не должны быть точнее исходных данных;

- при анализе результатов исследования модели важны не только конкретные численные результаты, но и понимание, почему и как все происходит, и как это зависит от параметров.

На практике конструктор для достижения целей конструирования использует две модели, которые отражают его представление о реальном объекте и внешней среде, в которой этот объект функционирует:

- информационную модель временных факторов и внешних воздействий на объект по интерфейсам в виде режимов и условий эксплуатации, задаваемых в техническом задании на разработку;

- текстографическую (цифровую) модель, соответствующую стационарной стохастической модели объекта в виде конструкторской (чертежно-технической) документации, которую он в конечном итоге разрабатывает.

Информационная модель временных факторов и внешних воздействий определяет допустимый набор и диапазон значений факторов внешней среды, в которых конструкции надлежит сопротивляться возможным отказам. Особенностью этой модели является то, что при итерационных циклах разработки она, как правило, остается неизменной. Если отказы при эксплуатации происходят из-за того, что некие параметры модели не соответствуют реальности, то к надежности это не имеет никакого отношения (надежность, согласно определению термина, – это свойство, которое проявляется исключительно в изначально заданных режимах и условиях применения). Например, первые спускаемые аппараты автоматических межпланетных станций «Венера» были рассчитаны на давление до 20 атм и были попросту раздавлены в атмосфере планеты, не выполнив до конца поставленных задач, поскольку фактическое давление на поверхности Венеры, как выяснилось позже, составляло около 90 атм (возможно при 20 атм спускаемые аппараты были достаточно надежными, проблема в том, что задача для конструирования была поставлено некорректно). Конструктор любые внешние воздействия изначально рассматривает как детерминированные, не важно из каких соображений они таковыми назначены (это одно из конфликтоопасных различий взглядов конструктора, специалиста по надежности и конечного потребителя).

Стационарная стохастическая модель объекта – это абстрактное описание реальных или гипотетических (еще не изготовленных) изделий, которые могут быть получены в результате многократного изготовления при безусловном соблюдении всех требований в конструкторской документации. Данная модель может итерационно уточняться (изменяться) вплоть до ввода изделия в эксплуатацию, соответственно, стохастическая модель объекта на каждом итерационном шаге изменения технической документации рассматривается как стационарная в состоянии «как она есть». Допуски параметров конструкции в пределах каждого итерационного шага являются неизменными (стационарными),

но значения этих параметров могут меняться случайным (стохастическим) образом в пределах заданных допусков при каждом реальном или гипотетически возможном воплощении, а, следовательно, могут быть осуществлены и развернуты во времени. Таким образом, число гипотетических воспроизведений однородных изделий τ (изготовленных по одной документации, на одном оборудовании, одними специалистами), при котором они способны обеспечить безотказность, является случайной величиной, которая по смыслу не может быть ничем иным, как временем безотказной работы изделия t , выраженным в числе реальных воспроизведений. Указанное свойство стационарной стохастической модели объекта соответствует условию обеспечения надежности в виде $R(t) = P(\tau > t)$ на каждом итерационном шаге изменения технической документации в состоянии «как она есть». Примером практического использования стационарной стохастической модели могут служить расчеты размерных цепей по ГОСТ 16320 вероятностным методом исходя из модели, согласно которой допускается выход замыкающих размеров за пределы поля допуска с обоснованным экономическим риском, и методом максимума-минимума исходя из модели, по которой выход замыкающих размеров за пределы поля допуска не допускается для обеспечения полной взаимозаменяемости.

Функционирование объекта с учетом модели временных факторов и внешних воздействий можно представить в виде двух математических моделей, описывающих выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях применения:

- вероятностно-статистической, когда стационарную стохастическую модель объекта рассматривают как информационную модель в виде черного ящика, реализующую выходные эффекты в зависимости от заданных режимов и условий применения (на основе математической обработки статистической информации о поведении реального объекта или его физических моделей без учета законов природы) (аналог расчета размерных цепей вероятностным методом);

- физической (или, скорее всего, квазифизической, поскольку еще не существует реального объекта), когда стационарную стохастическую модель объекта в заданных режимах и условиях применения представляют в виде системы соответствующих математических уравнений, отражающих совокупность знаний, представлений и гипотез при реализации выходных эффектов на базе физических законов природы (аналог расчета размерных цепей методом максимума-минимума).

Указанные математические модели функционирования соответствуют моделям надежности, которые подразумеваются исходя из функционального и параметрического определения надежности [9]:

- функциональной, когда требуемые функции характеризуют вероятностными показателями отказов (статистическими, логическими, байесовскими, субъективными);
- параметрической, когда требуемые функции представляют в виде набора параметров, характеризующих

способность их выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров (параметры являются измеряемыми или расчетными физическими величинами).

При необходимости параметры и вероятностные показатели функционирования объекта могут быть приведены к согласованному безразмерному виду (если параметры можно представить в виде вероятности изменения своих значений в допустимых пределах, по аналогии с пояснениями в ГОСТ 27.002 [1]). Это дает возможность рассматривать функциональную модель надежности как частный случай единой параметрической модели надежности, учитывающей одновременно физическую и статистическую (математическую) природу вещей на основе физической (квазифизической) и вероятностно-статистической моделей [19, 20].

Представленные выше модели позволяют относиться к изделию как к совокупности свойств конструктивных компонентов и элементов, которые должны быть проявлены при выполнении требуемых функций. Такие свойства могут быть задуманы в чертежах отдельно от изделия как способности и реализованы при физическом воплощении изделий с учетом выполнения требуемых функций при изготовлении и применении. Способности и свойства могут быть описаны безразлично как параметрами, так и вероятностными показателями в зависимости от принятых моделей надежности (функциональной или параметрической). Надежность выполнения требуемых функций определяют методом структурной схемы надежности после приведения квазифизической модели функционирования к безразмерному виду, согласованному с вероятностно-статистической моделью. В результате известная модель расчета надежности уникальных и малосерийных объектов по известным показателям надежности компонентов и элементов [1] без потери смыслов заменяется моделью расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций. В этом случае конструктор получает возможность выбирать модель расчета надежности исходя из объективных знаний о природе функционирования изделия (математической или физической), при этом вероятность выполнения изделием любой из своих функций может быть конструктором задумана, реализована и проконтролирована на любой стадии жизненного цикла.

Обобщенная параметрическая модель функционирования изделий. Если изделие рассматривать как структуру, которая в процессе функционирования способна сопротивляться воздействию внешней среды [7], то его можно представить набором выходных параметров (или вероятностных показателей), значения которых определены и ограничены режимами и условиями таких воздействий при заданной наработке. Таким образом, любое изделие можно свести к параметрическому представлению в виде:

- набора выходных параметров, характеризующих требуемые функции для выполнения служебного назначения,

- допустимых значений изменения выходных параметров, определенных режимами и условиями применения;

- наработки, в течение которой значения выходных параметров не будут превышать допустимых ограничений.

Совокупность выходных параметров изделия (или вероятностных показателей), характеризующих наличие и конкретный набор возможностей выполнять требуемые функции, является его **функциональностью**, которую можно выразить в виде

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}, \quad (1)$$

где X – множество выходных параметров X_i , определяющих выполнение требуемых функций.

В качестве выходных могут выступать любые параметры изделия, которые можно соотнести с воздействием внешней среды по критериям «больше-меньше», например:

- прочность как обобщенная характеристика геометрических размеров сечений строительных конструкций и механических свойств конструкционных материалов, противостоящая внешним нагрузкам (несущая способность конструкции должна превышать действующие нагрузки);

- движущий момент на приводе как характеристика энергодостаточности актуатора механизма для преодоления нагрузки в виде момента резистивных сил на пути движения (момент на приводе должен быть выше момента сил сопротивления);

- зазоры в кинематических парах как параметры, противостоящие возможным изменениям во времени размеров сопрягаемых деталей, например, из-за тепловых деформаций (допуски в сопряжении должны быть положительными);

- иные параметры, характеризующие изделие с позиций противостояния заданным внешним нагрузкам и воздействиям (которые могут быть вычислены и измерены).

В процессе функционирования конструкции выходные параметры X_i могут изменять во времени свои значения в допустимых диапазонах, определяемых режимами и условиями применения. Совокупность значений выходных параметров (или вероятностных показателей), при которых изделие способно выполнять требуемые функции, характеризует его **работоспособность** (работоспособное состояние):

$$D_x = \{X_i(t) | \alpha_i \leq X_i(t) \leq \beta_i\}, \quad (2)$$

где D_x – область допустимых значений изменения выходных параметров $X_i(t)$; α_i и β_i – нижняя и верхние границы диапазона изменения значений выходных параметров.

При определении работоспособности (2) производят все необходимые расчеты значений параметров изделия исходя из физических моделей природных явлений и технологических процессов с учетом ограничений, которые накладывают режимы и условия применения.

Вероятность нахождения во времени значений выходных параметров (или вероятностных показателей) конструкции в допустимой области характеризуют **надежностью** – свойством сохранять во времени вы-

полнение требуемых функций в заданных режимах и условиях применения:

$$R = P\{X_i(t) \in D_x, 0 < t < t_k\}, \quad (3)$$

где R – надежность объекта как вероятность P нахождения значений выходных параметров $X_i(t)$ в области допустимых значений D_x за время наработки до отказа t_k .

При определении вероятностей (3) путем оценки нахождения значений параметров в допустимых областях при наработке до отказа могут быть использованы два взаимозаменяемых метода [1, 19, 20]:

- детерминированный (путем задания конструктивных запасов по каждому из параметров таким образом, чтобы с определенным доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области);

- стохастический (например, путем оценки конструкционной индивидуальной надежности, суть которой заключается в вычислении вероятностей нахождения параметров в допустимых областях исходя из индивидуальных характеристик материалов, процессов нагружения/воздействия и технологий изготовления изделий).

Совокупность выражений (1) – (3) представляет собой обобщенную параметрическую модель функционирования изделия [20], в которой критерии требуемых функций (выходные параметры и допустимые диапазоны изменения их значений) взаимосвязаны, взаимообусловлены и подчинены целям достижения заданной работоспособности и надежности объекта при выполнении служебного назначения.

Поскольку в основу представленной модели заложен функциональный подход [21], такая модель дает возможность абстрагироваться от конкретного конструктивного исполнения изделий и может использоваться для описания функционирования технических систем различного назначения, например, строительных сооружений, механизмов однократного и многократного срабатывания, электромеханических устройств, электронных сборок, силовых и прецизионных конструкций и т. п. Использование обобщенной параметрической модели функционирования позволяет снять у конструктора когнитивное искажение смысла надежности, поскольку связывает целесообразность проведения всех необходимых расчетов по выбору параметров конструкции с учетом выполнения критериев требуемых функций для обеспечения заданной работоспособности и надежности. Причем надежность в этом случае выступает как работоспособность, развернутая во времени (3).

Указанные модели могут быть решены с помощью методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) подробно изложенной в работах [19, 20], которую, не вдаваясь в детали, можно укрупненно свести к выполнению трех процедур анализа:

- инициализации в виде параметризации (превращения изделия в набор параметров или вероятностных показателей и допустимых диапазонов их изменения), которая производится для установления условий (1) – (2);

- подсчетов теоретической надежности по параметрам проектирования, выполняемых согласно (3);

• предоставления доказательств того, что анализ (оценка) надежности соответствует действительности (требованиям конструкторской и технологической документации, условиям осуществления производства, методам контроля качества) [19].

Таким образом, КТАН фактически является дорожной картой для проектирования и конструирования изделий с требуемой надежностью, позволяющей на основе параметрического моделирования выбрать параметры конструкции, обеспечивающие безусловное выполнение требуемых функций, которые на этапе изготовления должны быть выполнены и подтверждены.

Заключение. Используя приведенные в статье понятия, подходы, модели и методы, надежность в представлении конструктора становится работоспособностью, развернутой во времени. Такая надежность всегда конкретна и учитывает все специфические особенности изделия.

Процесс конструирования и обеспечения надежности становится единой и неделимой частью работы при создании изделий независимо от их уникальности, серийности изготовления, наличия или отсутствия показателей надежности компонентов и элементов. Но самое главное, такой подход к надежности, с одной стороны, не противоречит основам современной теории надежности, а, с другой стороны, снимает у конструктора восприятие надежности, как нечто инородное, не связанное с реальной конструкцией.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
2. Рябинин И.А. Академик А.И. Берг и проблемы надежности, живучести и безопасности // Академик Аксель Иванович Берг (К столетию со дня рождения): Сборник статей. М. изд-во Гос. политехн. музея, 1993. С. 6–25.
3. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1971. 456 с.
4. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
5. Надежность электрорадиоизделий: справочник. М.: Изд-во 22 ЦНИИМО, 2006. 641 с.
6. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
7. Плахотникова Е.В., Сафонов А.С., Ушаков М.В. Проектирование изделий с учетом требований к показателям надежности // Известия ТулГУ: Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 1. С. 134–139.
8. Веников Г.В. Проектирование и надежность. М.: Знание, 1971. 96 с.
9. Нетес В.А., Тарасев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 3-14.

10. Dhillon B.S., Singh C. Engineering reliability. NJ.: John Wiley & Sons, 1981. 339 p.

11. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.

12. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 338 с.

13. Хубка В. Теория технических систем. М.: Мир, 1987. 208 с.

14. Уемов А.И. Вещи, свойства и отношения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 184 с.

15. Большая Советская Энциклопедия. В 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1970–1978.

16. Толковый словарь русского языка: в 4 т. / под ред. Д. Ушакова. М.: ТЕРРА, 1996.

17. Новейший словарь иностранных слов и выражений. М.: Современный литератор, 2005. 976 с.

18. Неймарк Ю.И. Математические модели в естествознании и технике. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. Н.И. Лобачевского, 2004. 401 с.

19. Похабов Ю.П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надежность. 2018. Т. 18. № 4. С. 28–35.

20. Похабов Ю.П. Проектирование высокоответственных систем с учетом надежности на примере поворотной штанги // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 7. С. 861–883.

21. Щербаков В.А., Приходько Е.А. Основы финансового функционально-стоимостного анализа. Новосибирск: НГТУ, 2003. 164 с.

Сведения об авторе

Похабов Юрий Павлович – кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), начальник центра научно-технических разработок, Российская Федерация, Красноярский край, Железногорск, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Вклад автора в статью

В статье рассмотрены математические модели надежности, которые могут быть решены с применением методики конструкторского-технологического анализа надежности, разработанной автором статьи разработал для анализа и оценки конструкторских решений при проектировании высоконадежных изделий. Статья является развитием идей автора, изложенных в статье «Надежность в цифровых технологиях» (см. журнал «Надежность» №2, 2020).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Разработка автомата надежности техники (обоснование регулирования стандартизации)

Николай И. Плотников, Научно-исследовательский проектный институт гражданской авиации «АвиаМенеджер», Российская федерация, Новосибирск
am@aviat.org



Николай И.
Плотников

Резюме. Цель. В настоящей работе представлена разработка автомата надежности. Разработка является концептуальным описанием автомата как структуры терминов фиксированной сложности, показывающей непротиворечивые взаимосвязи и четкие переходы состояний надежности объекта. Описание структуры состояний автомата предполагает последующую разработку вычислительного устройства наблюдения надежности объектов любой природы. В отличие от стандарта, надежность определяется как совокупность состояний – мера соответствия назначению объекта. Назначение определяется как свойство объекта, обусловленное естественным происхождением существования или создаваемого проектируемого применения. В соответствии с данными определениями разработаны альтернативные определения состояний надежности. Наблюдение состояний надежности объекта возможно описать общим алгоритмом. Для постановки задачи используется теория автоматов. **Методы.** Автоматом надежности будем называть детерминированный, полностью определенный автомат с конечным числом состояний. В теории автоматов свойства объектов рассматривается в пребывании и изменении состояний. Состояния надежности изменяются в мерах нарушения и восстановления назначения объекта. Данные изменения можно представить как ориентированный граф, вершины которого соответствуют состояниям, а дуги соответствуют переходам между состояниями. Поскольку состояния восстановления надежности являются детерминированными, их можно представить как процессы – планируемые, состоящие из работ, мероприятий, процедур, операций. Состояния нарушения надежности являются случайными, поэтому их можно рассматривать как события. Таким образом, наблюдение свойства назначения объекта осуществляется при наблюдении состояний надежности, которые меняются в событиях и процессах. Для описания автомата используются термины и символы стандартов и альтернативные определения состояний, разработанные автором настоящей работы. При соответствующей переработке стандартов должны использоваться другие термины. Работа автомата надежности отображает переходы и варианты переходов. Восстановление проектируется как заверченный и частично незавершенные процессы: а) переход из неработоспособного состояния в работоспособное состояние; б) переход из неработоспособного состояния в неисправное состояние; в) переход из неработоспособного состояния в исправное состояние. Выполненная работа реализована в разработке теоретической и практической надежности организаций, социальных групп и человека. В концепции автомата надежности представлена разработка технического проектирования экспертной системы поддержки принятия решений в летной эксплуатации авиакомпании. **Заключение.** Технические стандарты требуют предварительной гуманитарной проработки: философской, филологической, логической. Результатом исследований должны быть логические доказательства и обоснования совокупности согласованных, непротиворечивых онтологических терминов: свойство, состояние, событие и других. Комплекс данных результатов после того используется в технических стандартах для формирования и обоснования специальных терминов. Теоретически и практически обоснована возможность переноса отдельных положений современной теории надежности техники для разработки теории надежности объектов нечисловой природы.

Ключевые слова: надежность, терминология, стандартизация, регулирование, автомат надежности.

Для цитирования: Плотников Н.И. Разработка автомата надежности и практика (обоснование регулирования стандартизации) // Надежность. 2020. №4. С. 21-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-21-24>

Поступила 25.10.2019 г. / После доработки 20.05.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

1. Введение

В настоящей работе, в отличие от стандарта [1], надежность определяется как совокупность состояний, как мера соответствия назначению объекта. Назначение определяется как свойство объекта, обусловленное естественным происхождением существования или создаваемого проектируемого применения. В соответствии с данными определениями разработаны альтернативные определения состояний надежности.

Наблюдение состояний надежности объекта возможно описать общим алгоритмом. Для постановки задачи используется теория автоматов [2]. Для решения задачи предлагается разработка автомата надежности (АН). Разработка является концептуальным описанием автомата как структуры терминов фиксированной сложности, показывающей непротиворечивые взаимосвязи и четкие переходы состояний надежности объекта. Описание структуры состояний АН предполагает последующую разработку вычислительного устройства наблюдения надежности объектов любой природы.

2. Разработка автомата надежности

Постановка задачи. Автоматом АН, далее обозначаемом как D (dependability), будем называть детерминированный, полностью определенный автомат с конечным числом состояний. АН задан множеством, состоящим из элементов:

$$D = \{X, S, Y, \delta, \lambda, s_0\},$$

где D – АН;

X – входной алфавит автомата (множество входных символов): $X = \{x_1, \dots, x_m\}$;

S – множество состояний автомата: $S = \{s_0, \dots, s_n\}$, s_0 – начальное состояние автомата;

Y – выходной алфавит автомата (множество выходных символов): $Y = \{y_1, \dots, y_p\}$;

δ – заданное отображение состояний на множестве входных сигналов, функция переходов автомата из одного состояния в другое: $s_j = \delta_i(s_i, x_k)$, где s_j – последующее состояние автомата, s_i – текущее состояние автомата; x_k – текущий входной символ;

λ – заданное отображение состояний на множестве выходных сигналов, функция выходов: $y_l = \lambda_i(s_i, x_k)$, где y_l – последующий выходной символ автомата, s_i – текущее состояние автомата; x_k – текущий входной символ.

Условия: множества X, S, Y – конечны; выходной символ ($y_l \in Y$) зависит от входного символа $x_k \in X$ и от текущего состояния автомата ($s_i \in S$); элементы описания автомата заданы в дискретные моменты времени.

Детерминированный автомат: а) из состояния s_i под воздействием сигнала x_k переходит в состояние s_j , при этом на выходе символ y_h изменяется на y_l ; б) для $(x, y) \in (X, Y)$ определены δ и λ .

3. Структура состояний автомата

В теории автоматов свойства объектов рассматриваются в пребывании и изменении состояний. Состояния

надежности изменяются в мерах нарушения и восстановления назначения объекта (рис. 1).



Рис. 1. Наблюдения надежности

Данные изменения можно представить как ориентированный граф, вершины которого соответствуют состояниям, а дуги соответствуют переходам между состояниями. Поскольку состояния *восстановления* надежности являются *детерминированными*, их можно представить как процессы – планируемые, состоящие из работ, мероприятий, процедур, операций. Состояния нарушения надежности являются *случайными*, поэтому их можно рассматривать как события. Таким образом, наблюдение свойства назначения объекта осуществляется при наблюдении *состояний* надежности, которые меняются в *событиях* и *процессах*.

Для описания автомата используются термины и символы стандартов [1], [3] и альтернативные определения состояний, разработанные автором настоящей работы. При соответствующей переработке стандартов должны использоваться другие термины. Например, термин «дефект» явно не соответствует техническому смыслу. В стандарте [1] «дефект» определяется как несоответствие объекта требованиям, установленным документацией. В стандарте [4] дефект определяется как невыполнение требования, связанного с предполагаемым или установленным использованием. Основные состояния в настоящей работе изложены в следующем содержании (табл. 1).

Табл. 1. Состояния автомата надежности

Термины	Состояния	(en)	Ω
Процессы	техническое обслуживание (ТО)	(engineering servicing)	(s_{eng})
	ремонт	(repair)	(s_{rep})
	восстановление	(restoration)	(s_{rest})
Состояния	работоспособное состояние	(up state)	(s_{up})
	исправное состояние	(perfect state)	(s_{per})
	неисправное состояние	(imperfect state)	(s_{imp})
События	неработоспособное состояние	(down state)	(s_{dov})
	отказ	(failure)	(s_{fail})
	дефект	(defect)	(s_{def})
	повреждение	(degraded state)	(s_{deg})

4. Разработка алгоритмов АН

Задача описания работы АН состоит в переводе терминов стандартов в символьные алгоритмы, пригодные для последующей разработки программного обеспече-

ния вычислительного устройства. Вводим следующие символы и составляем алгоритмы работы АН:

- \overline{D} – надежность;
- $\downarrow D$ – нарушения надежности;
- $\uparrow D$ – восстановления надежности;
- $(s_j \rightarrow s_i)$ – переходы из текущего состояния в последующее состояния в событиях нарушения надежности;
- $(s_j \leftarrow s_i)$ – переходы из текущего состояния в последующее состояния в процессах восстановления надежности;
- $\overline{S}: (s_{rest} \subseteq s_{rep} \subseteq s_{eng})$ – подмножества состояний восстановления надежности (процессы);
- $\overline{S}: (s_{fail} \subseteq s_{def} \subseteq s_{deg})$ – подмножества состояний нарушения надежности (события);
- $(s_j \rightarrow s_i) | \overline{S}$ – переходы состояний в условиях событий нарушения надежности;
- $(s_j \leftarrow s_i) | \overline{S}$ – переходы состояний в условиях событий восстановления надежности;

Состояния АН представлено на схеме (рис. 2).

Состояния надежности:

$\overline{D}: s_{up} | (s_{up} \leftarrow s_{eng} (s_{per} \leftarrow s_{rep} (\leftarrow s_{rest})))$ – работоспособное состояние по условию ТО, ремонта, восстановления;

$\overline{D}: s_{per} | (s_{per} \leftarrow s_{rep} (\leftarrow s_{rest}))$ – исправное состояние по условию ремонта, восстановления;

$\overline{D}: s_{imp} | (s_{imp} \leftarrow s_{rest})$ – неисправное состояние по условию восстановления;

$\overline{D}: s_{up} | s_0$ – неработоспособное состояние.

Состояния в событиях нарушения надежности:

$\downarrow D: s_{deg} | s_{eng}$ – повреждение по условию отсутствия ТО;

$\downarrow D: s_{def} | s_{rep}$ – дефект по условию отсутствия ремонта;

$\downarrow D: s_{fail} | s_{rest}$ – отказ по условию отсутствия восстановления.

Состояния в процессах восстановления надежности:

$\uparrow D: s_{eng} | (s_{up} \leftarrow s_{per})$ – ТО для перехода от исправного состояния в работоспособное состояние;

$\uparrow D: s_{rep} | (s_{up} \leftarrow s_{per} (\leftarrow s_{imp}))$ – ремонт для перехода от неисправного состояния в работоспособное (исправное) состояние;

$\uparrow D: s_{rest} | (s_{up} \leftarrow (s_{per} \leftarrow (s_{imp} \leftarrow s_{dw})))$ – восстановление для перехода от неработоспособного состояния в работоспособное (неисправное, исправное) состояние.

Обсуждение. Работа АН отображает переходы и варианты переходов. Восстановление проектируется как завершённый и частично незавершённые процессы: а) переход из неработоспособного состояния в работоспособное состояние; б) переход из неработоспособного состояния в неисправное состояние; в) переход из неработоспособного состояния в исправное состояние. Состояния АН отображают совокупность иерархии ресурсов в терминах: «восстановление» \subseteq «ремонт» \subseteq «ТО». Однако, во всех стандартах надежности техники отсутствуют обоснования иерархии терминов.

5. Теоретическая и практическая реализация АН

Выполненная работа реализована в разработке теоретической и практической надежности организаций, социальных групп и человека (рис. 3) [5].

В концепции АН представлена разработка технического проектирования экспертной системы (ЭС) поддержки принятия решений в летной эксплуатации авиакомпании. ЭС имеет функциональные модули, содержит базу знаний или оболочку ЭС и функциональные блоки с наименованиями: комплекс преобразования информационных ресурсов (КПИР); модуль анализа данных показателей и прогнозирования состояний ресурсов пилота; решатель или модуль подготовки и принятия решений по управлению ресурсами пилота. АН представлен как комплекс ресурсов пилота (КРП), состоящий из трех групп свойств надежности: ресурсов индивидуальной надежности (РИН), ресурсов профессиональной надежности (РПН), ресурсов операционной надежности (РОН). Основанием данного группирования является структурный подход в формировании стандартных терминов в делении абстрактных понятий, на примере категории «надежность».

На основании данного подхода сформирована различная база наблюдения во времени: РИН – время видовой эволюции человека, РПН – время трудовой занятости возраста от 20 до 60 лет, РОН – время от продолжительности одного полета до года. Новая структура КРП

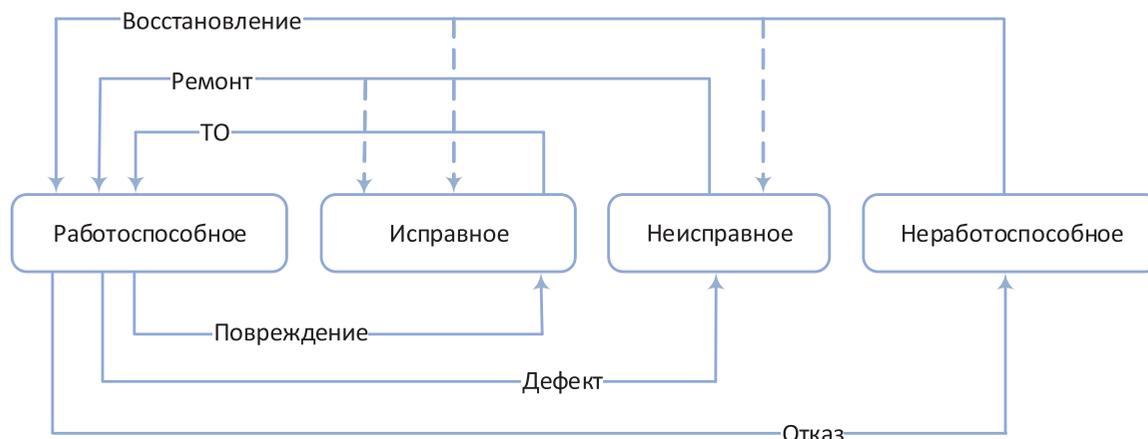


Рис. 2. Концептуальная схема автомата надежности

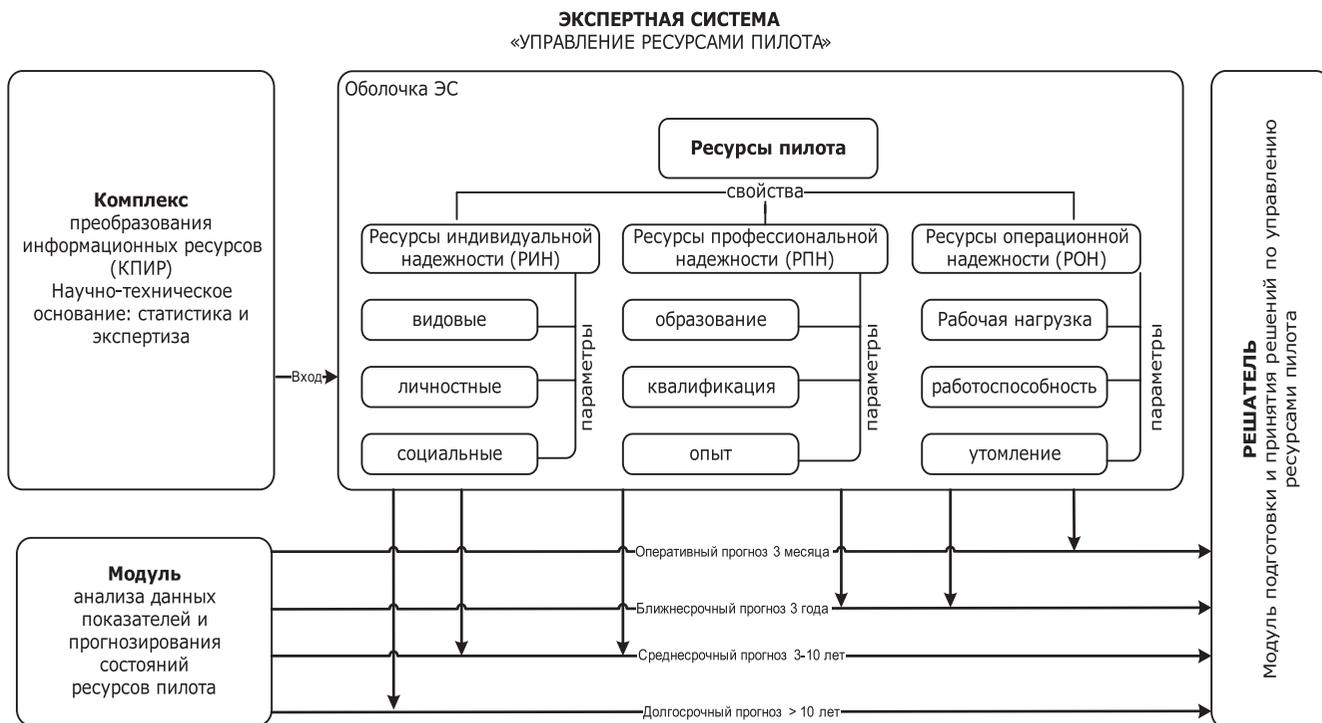


Рис. 3. Автомат надежности индивида (пилота гражданской авиации)

позволяет устанавливать различное нормирование и регламентирование, что повышает контроль эффективности и безопасности полетов [6].

6. Заключение

Технические стандарты требуют предварительной гуманитарной проработки: философской, филологической, логической. Результатом исследований должны быть логические доказательства и обоснования совокупности согласованных, непротиворечивых онтологических терминов: свойство, состояние, событие и других. Комплекс данных результатов после того используется в технических стандартах для формирования и обоснования специальных терминов. Например, почему термин «отказ» по объему и содержанию больше термина «повреждение» в физическом, техническом смысле. Теоретически и практически обоснована возможность переноса отдельных положений современной теории надежности техники для разработки теории надежности объектов нечисловой природы.

Библиографический список

- ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
- Выхованец В.С. Теория автоматов: Учеб. пособие для вузов. Тирасполь, РИО ПГУ, 2001. 87 с.: ил.
- ГОСТ ИЕС 60050-113-2015. Международный электротехнический словарь. Часть 113. Физика в электротехнике. М.: Стандартинформ, 2016. 51 с.
- ГОСТ ISO 9000-2011. Межгосударственный стандарт. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2012. 43 с.

5. Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок. Промежуточный, этап № 4: «Адаптация разработанных алгоритмов и программных средств АС». / Научно-технический отчет, шифр «2010-218-02-068», № госрегистрации 01201150118 от 12.01.2011, Инв. № 194. Ульяновск, 2012. – 1340 с. / Н.И. Плотников. Раздел 3. С. 154-238; Приложения: И, К, Л, М, Н. С. 1048-1258.

6. Плотников Н.И. Ресурсы пилота. Надежность: Монография / Н.И. Плотников. Новосибирск: ЗАО ИПЦ «АвиаМенеджер», 2013. 264 с.

Сведения об авторе

Плотников Николай Иванович – кандидат технических наук, генеральный директор Научно-исследовательского проектного института гражданской авиации «АвиаМенеджер», Российская федерация, Новосибирск, e-mail: am@aviam.org

Вклад автора в статью

Автором выполнен анализ стандартов надежности. Выполнен логический анализ понятия надежности. Автор предлагает разрешение проблемы терминологии надежности в теории автоматов описанием общего алгоритма переходов состояний в процессах восстановления и в событиях нарушения надежности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Оценка безопасности искусственного интеллекта

Йенс Брабанд¹, Хендрик Шебе^{2*}

¹Siemens Mobility GmbH, Брауншвейг, Германия, ²TÜV Rheinland, Кельн, Германия

*schaebe@de.tuv.com



Йенс Брабанд



Хендрик Шебе

Резюме. Цель. В данной статье обсуждается подход к оценке безопасности систем с искусственным интеллектом (ИИ). Это актуально для тех случаев, когда ИИ используется в системах, связанных с обеспечением безопасности, а также применительно к железнодорожным системам автоматизации, в составе которых предполагается применение средств ИИ. **Методы.** Основное внимание в работе уделено не столько самому ИИ, сколько оценке его безопасности. Более пристальное внимание к моделям ИИ показывает, что многие из них, в особенности машинное обучение, являются статистическими. Таким образом, при проведении оценки безопасности, помимо выполнения обычных процедур, необходимо подвергнуть анализу модель, используемую в ИИ. **Результаты.** Часть допустимой интенсивности опасных случайных отказов, предусмотренных для соответствующего уровня полноты безопасности, должна отводиться для вероятностного сбойного поведения системы ИИ. Авторы излагают свои идеи на простых примерах и предлагают тему для научных исследований, разработка которой может сыграть решающую роль при внедрении ИИ в ответственные системы. **Заключение.** Представлен метод экспертизы безопасности систем с искусственным интеллектом.

Ключевые слова: искусственный интеллект, оценка безопасности, функциональная безопасность.

Для цитирования: Брабанд Й, Шебе Х. Оценка безопасности искусственного интеллекта // Надежность. 2020. №4. С. 25-34. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-25-34>

Поступила 20.06.2020 г. / После доработки 05.09.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

1. Введение

В последние годы значительно вырос интерес к искусственному интеллекту (ИИ); сфера его применения также расширилась. К ней относятся, например:

- обработка данных;
- системы поддержки принятия решений;
- распознавание речи;
- распознавание лиц;
- роботы-медсестры;
- системы автономного вождения;
- искусство и т.д.

Некоторые из сфер применения ИИ могут иметь отношение к безопасности. В связи с этим при внедрении ИИ необходимо руководствоваться стандартами функциональной безопасности [8, 9, 10], а также проводить оценку безопасности.

В настоящей статье рассматривается подход к оценке безопасности систем с ИИ. Во втором разделе дается определение термина ИИ. В третьем разделе описывается процесс определения уровня полноты обеспечения безопасности для систем ИИ. В четвертом разделе более детально рассмотрены системы ИИ в целях обеспечения лучшего понимания систем ИИ и определения подхода к обеспечению функциональной безопасности. В пятом разделе описываются требования к обеспечению функциональной безопасности систем ИИ и возможная процедура оценки. В шестом разделе приведен пример проведения оценки безопасности очень простой системы. В последнем разделе подводятся итоги проделанной работы.

2. Что такое искусственный интеллект?

Существует множество публикаций с упоминанием систем, использующих ИИ. Например, Брюнет [3] сделал краткий обзор таких систем. Отправной точкой в развитии возможностей ИИ в 1950-х гг. стал тест Тьюринга, основной целью которого была проверка, может ли машина имитировать интеллектуальное поведение, свойственное человеку. Впоследствии была разработана концепция эволюционных программ. Термин «искусственный интеллект» был впервые использован в Дартмутском колледже в 1956 году. Многими учеными были предложены и другие концепции.

ИИ можно определить как интеллект, демонстрируемый машиной. ИИ имитирует когнитивные функции, обучение, решение проблем и т.д.

Вопрос заключается в следующем: могут ли представленные ниже критерии служить критериями искусственного интеллекта:

- использование речи;
- разум;
- самоанализ.

Несмотря на то, что достижения в области развития ИИ действительно поражают, в статьях и презентациях много «хайпа» вокруг глубокого машинного обучения (см., например, статью Хэтташ и Гайслер, 2019 [7]), а вот публикаций с полноценным обоснованием безопасности применения ИИ, насколько нам известно, до сих пор нет, хотя есть немало исследовательских проектов, направленных на обоснование безопасности ИИ.

В последнее время разработан ряд подходов к обеспечению безопасности, в частности, проект стандарта UL 4600 [15], содержащий требование проведения доказательства безопасности при оценке транспортных средств, в составе технических средств которых могут использоваться алгоритмы ИИ. При этом в проекте стандарта UL 4600 подробно описан обсуждаемый предмет, но не процесс подтверждения соответствия требованиям безопасности. Это четко указано во введении: «Соответствие данному стандарту не является гарантией безопасности автоматизированного транспортного средства». Акцент делается на «воспроизводимой оценке полноты доказательства безопасности». Проект стандарта UL 4600 предполагается использовать в качестве дополнения к стандарту МЭК 61508 [10].

Другие комитеты по стандартизации, например, немецкий DKE, сосредоточили внимание на процессном подходе и концепции жизненного цикла. Путцер [13] продвигает λ_{AI} , критерий, аналогичный интенсивности опасных отказов в функциональной безопасности, но не дает ему четкого определения.

3. Необходим ли SIL применительно к ИИ?

В этом разделе обсуждается вопрос о том, требуется ли определение уровня полноты безопасности применительно к ИИ, и если да, то какой должна быть соответствующая процедура.

Концепция уровня полноты безопасности (SIL) используется во многих стандартах в области функциональной безопасности. Первый среди них – широко известный стандарт МЭК 61508. В статье Шебе [14] дан метод определения SIL.



Рис. 1. Э/Э/ПЭ система управления



Рис. 2. Произвольная система управления (черный ящик)

На рис. 1 показана стандартная электрическая, электронная, программируемая электронная система (система Э/Э/ПЭ). На схеме изображены контролируемое оборудование, информация, поступающая от датчиков в систему управления, а также исполнительные устройства под контролем системы управления. В зависимости от последствий отклонений в работе системы управления, она получает соответствующий уровень полноты обеспечения безопасности (SIL).

В общем, тип системы управления не имеет значения. Применительно к задачам анализа степени риска и определения SIL она в любом случае рассматривается как черный ящик. Это представлено на рис. 2.

В данном случае черный ящик также может быть системой ИИ. Таким образом, может быть необходимо определение уровня полноты безопасности, если система ИИ выполняет задачи, связанные с безопасностью, а SIL может быть определен теми же методами, что и для системы Э/Э/ПЭ. Правила же определения SIL могут различаться в зависимости от типа системы, которая реализует функции черного ящика.

Какого SIL следует ожидать применительно к различным способам использования ИИ? В основном это будет зависеть от последствий отказов и от возможностей использования других мер снижения риска отказов:

- обработка данных (SIL зависит от результатов и их использования);
- системы поддержки принятия решений (обычно SIL не присваивается, если человек имеет возможность отменить решение системы);
- распознавание речи (SIL зависит от того, как используются результаты, и наличия безопасного резервирования);

- распознавание лиц (SIL зависит от того, как используются результаты, т.е. какие функции активированы);
- роботы-медсестры (поскольку такие роботы дают пациентам лекарства, помогают им передвигаться, требуется определение SIL);
- автономные системы транспорта (наличие SIL необходимо ввиду возможных дорожно-транспортных происшествий).

В любом случае должен проводиться анализ опасностей и риска, чтобы определить SIL, или обоснование отсутствия необходимости его определения. Необходимо обеспечить соблюдение положений соответствующего стандарта функциональной безопасности.

4. Искусственный интеллект изнутри

Архитектура ИИ

На рис. 3 изображена упрощенная архитектура системы ИИ. Она в чем-то схожа с архитектурой, предложенной Вангом [16], но не повторяет ее.

Система ИИ основана на использовании модели, которой свойственна гибкость и необходимость в обучении, которое проводится на основе имеющихся данных. Эти данные должны быть репрезентативны, т.е. достоверно отражать будущие события. Важно не допускать ситуаций, подобных изложенной в статье Корни [5], когда система ИИ продемонстрировала расовую дискриминацию по той причине, что в систему был внесен нерепрезентативный набор данных для обучения.

После обучения устанавливаются параметры модели. Позже она используется для создания запросов на получение данных и активации объектов для управления кон-

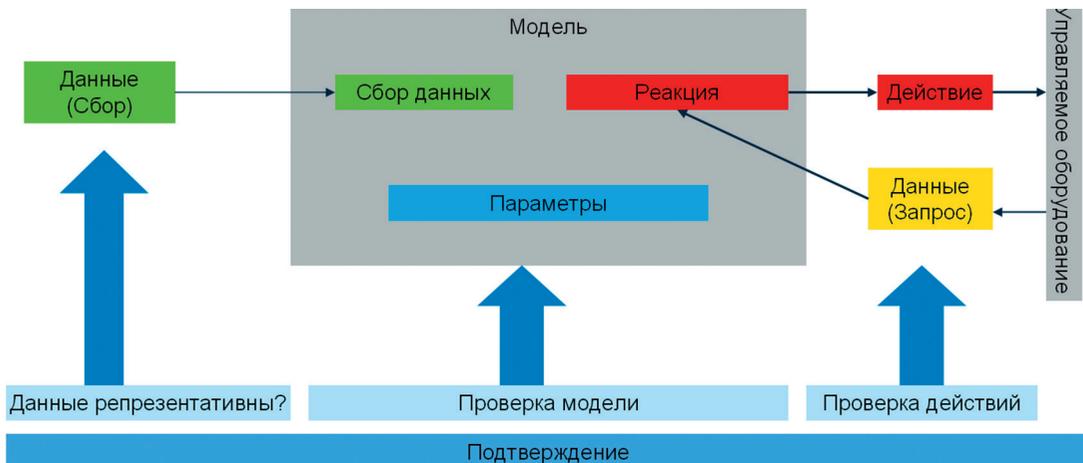


Рис. 3. Архитектура системы ИИ

тролируемым оборудованием. Продолжение обучения возможно даже после ввода системы в эксплуатацию.

Для продолжения обучения важно:

- проверить модель;
- убедиться в репрезентативности данных;
- проверить верификацию цепочки «данные – реакция модели – действия»;

- провести общую валидацию.

При верификации модели используются опытные данные, которые также должны быть репрезентативны и не могут совпадать с данными, используемыми для обучения.

В следующих подразделах мы более подробно рассмотрим несколько типов систем ИИ. Это позволит оптимизировать модельную часть архитектуры, показанной на рис. 3.

Взгляд на ИИ с использованием анализа сходства

Как видно из рис. 3, большинство алгоритмов ИИ основаны на статистике или, по крайней мере, имеют сходство с ней. В качестве первого подхода к определению требований для использования ИИ в ответственных системах может быть использована статистическая процедура. Такой метод можно также назвать анализом сходства. Какие результаты может принести статистическая процедура? Что, если алгоритмы ИИ, например, машинное обучение, интерпретировать как статистическое выравнивание данных, но с очень сложными алгоритмами и большими выборками? Необходимо отметить, что речь идет об упрощенном представлении, которое используется для общего понимания ИИ, что позволит применять методы оценки безопасности.

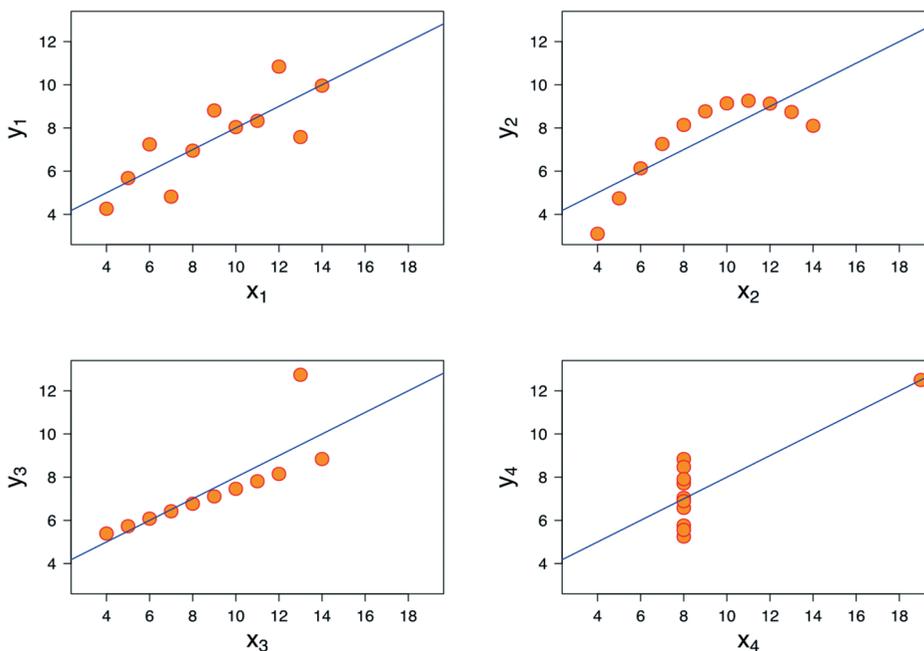


Рис. 4. Примеры – что можно извлечь из линейной регрессии
© Автор: Schutz / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

Чтобы понимать данный пример на интуитивном уровне, рассмотрим одну из самых простых статистических моделей, которая известна каждому инженеру еще со школьных времен – линейная регрессия, т.е. подгонка (прямой) линии к данным. Что мы можем извлечь из этого? Следует обратить внимание на то, что этот результат не новый. Перл и Маккензи уже заявили о том, что нейронные сети «...контролируются посредством проведения исследований и получения результатов, к которым инженеры пытаются подогнать функцию, почти так же, как специалист по статистике пытается подогнать прямую линию к набору точек». Но, насколько известно авторам, это сходство еще исследуется.

Допустим, что некоторое критически важное для безопасности решение будет зависеть от качества кривой, построенной по точкам. Анскомб [1] в своей статье продемонстрировал, что может случиться при построении кривой по точкам. В наборе точек Анскомба все соответствующие статистические показатели имеют, как минимум, два знака после запятой, хотя, очевидно, что наборы отличаются друг от друга (рис. 4).

На рис. 4 приведены примеры верной подгонки данных (набор данных 1); набор данных (2), где, очевидно, используется неправильная модель; набор данных (3), на который влияют выбросы; набор данных (4) с точкой выплеска, которая является результатом совершенно неверной постановки эксперимента. Даже из этого простого примера можно сделать несколько важных выводов:

1. Модель должна быть правильной, иначе мы никогда не сможем должным образом подогнать данные (см. набор данных 2), независимо от того, как долго будет продолжаться обучение или насколько качественными являются данные.

2. Набор данных для обучения должен быть репрезентативным для реальных данных; необходимо убедиться, что выборка является адекватной (см. набор данных 4).

3. Необходимо наличие метода для обнаружения выбросов (или даже для их устранения, см. набор данных 3) или аномалий.

4. Необходимо наличие критерия для определения качества подгонки (как коэффициент детерминации R^2 в нормальной регрессии). Но такой критерий и рассчитанная подгонка данных зависят от функции потерь (см. набор данных 1, где обычная функция потерь с методом наименьших квадратов представлена, как и все другие подгонки, на рисунке 4).

Машинное обучение как задача классификации

Машинное обучение (МО) является наиболее успешным процессом реализации ИИ. С точки зрения статистики, МО можно интерпретировать как задачу классификации, которая обеспечивает другой взгляд на проблему. Все выводы из предыдущего раздела непосредственного относятся к МО. Большинство алгоритмов МО решают задачи классификации, аналогичные кластерному анализу или дискриминантному анализу в статистике. Имеется (как минимум) два класса (больших) данных в многомерном пространстве (см. рис. 5, где изображено двухмерное пространство). В других случаях алгоритмы МО решают задачи регрессии или уменьшают число измерений многомерного пространства. Для понимания этих моделей далее может быть применен статистический подход. В оставшейся части данного раздела будут приведены проблемы классификации.

Оптимальная функция дискриминации полностью разделяет классы для обучающей выборки. Можно

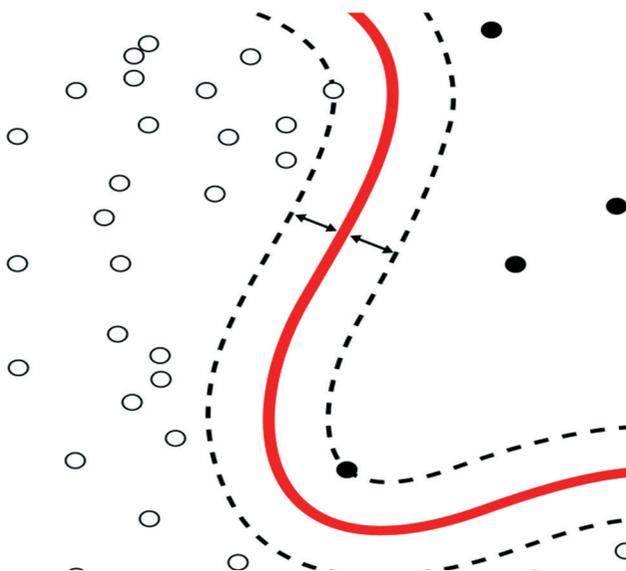


Рис. 5. Дискриминация двух наборов данных при классификации

© Автор: Alisneaky/ Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

предположить, что существует точная («верная») функция дискриминации (красная кривая на рис. 5), но на практике с помощью алгоритмов МО определяется лишь приближение истинной функции. Тем не менее, между двумя классами остается разрыв, и не существует однозначного решения для этой проблемы.

Искусственные нейронные сети и обобщенная теорема аппроксимации

Наиболее популярным и успешным алгоритмом машинного обучения являются искусственные нейронные сети (ИНС) [4, 11]. Каждая ИНС имеет как минимум два слоя, которые соединены между собой связями, имеющими определенные веса. На рис. 6 приведен простой пример ИНС.

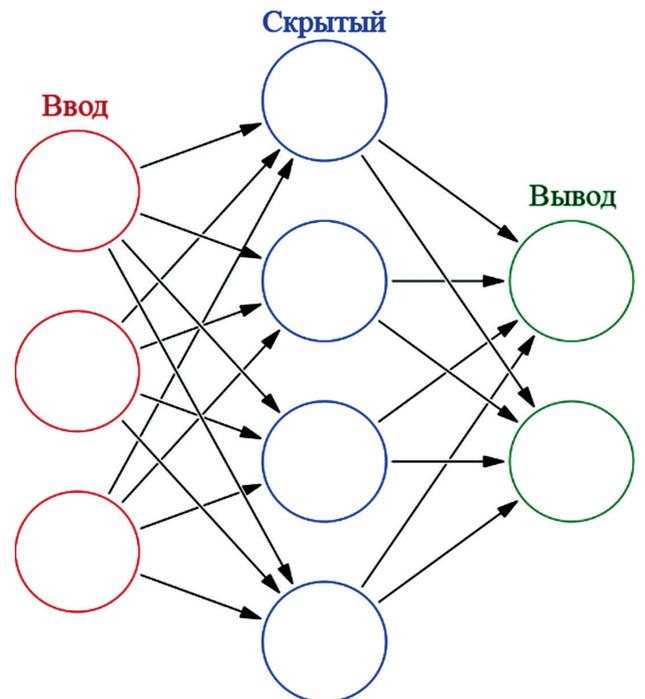


Рис. 6. Искусственная нейронная сеть с двумя слоями
© Автор: Glosser.ca / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

Математическая модель простой ИНС может быть описана следующим образом: вектор входных данных x преобразуется весами v и w , смещениями b и результирующей функцией ϕ (непостоянной, ограниченной и непрерывной) в два выходных класса:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N v_i \phi(w_i^T x + b_i) \quad (1)$$

Оптимальные веса для определенной функции потерь C , которая формулируется как дополнение к (1), определяются итеративно на основе набора данных для обучения и с использованием численного алгоритма.

При построении более сложных ИНС используются дополнительные скрытые слои (часто называемые

глубокими нейронными сетями), но математическое описание и решение аналогичны тем, что используются при построении простых ИНС.

Из вышеуказанного обзора возникают следующие вопросы:

1. Является ли функция F правильной для четкого различения данных?

2. Является ли она максимально приближенной к истинной функции?

3. Необходимо ли большее количество слоев или более сложные функции?

4. Как подтвердить то, что набор данных для обучения является репрезентативным?

5. Как обнаружить выбросы?

6. Как можно обосновать функцию потерь C ?

Если ответы на данные вопросы будут недостаточно всеобъемлющими, то в модели могут возникнуть системные ошибки!

Согласно статье Цибенко [6], для ответа на первый вопрос существует множество так называемых «универсальных теорем приближения», которые демонстрируют сближение функции F с f (истинной функцией), при условии, что f является ограниченной и непрерывной функцией, а f – непрерывной. Необходимо отметить, что сходимость рассматривается как расчетный метод, а не как стохастическая сходимость.

Это довольно хороший результат, и он также связан с ответами на другие вопросы. Наиболее ограничивающим допущением является непрерывность истинной функции f , что означает, что пространство задач должно быть разделимым с помощью непрерывной функции. Функция f также должна быть непрерывной, потому что нельзя использовать скачкообразную функцию для принятия решения.

На первый взгляд этот результат удивителен, поскольку он непосредственно относится к ИНС с одним скрытым слоем, но, с другой стороны, результаты довольно очевидны и имеют простое объяснение:

1) F – это некое общее приближение к f . Но очевидно, что такое линейное приближение для непрерывной функции f возможно только в том случае, если имеется достаточно большое количество узлов N . Как показано на рис. 5 (пример классификации), функция f может быть аппроксимирована ступенчатыми линейными функциями.

2) Глубокая ИНС с несколькими скрытыми слоями может быть представлена с помощью одного слоя (с большим количеством узлов N). Предположим, что истинная функция f может быть функцией, представленной многослойной сетью, которая по теореме аппроксимации может быть аппроксимирована однослойной функцией F .

Для надежного применения метода, при ответе на первый вопрос необходимо соблюдать следующие условия:

1) Выбрать однослойную ИНС с достаточно большим количеством узлов N . Количество узлов N можно определить по критерию сходимости согласно расчетному методу.

2) Наиболее сложное предположение, которое необходимо обосновать, состоит в том, что наборы данных могут быть разделены непрерывной функцией. Этот аргумент будет зависеть от типа системных данных и вряд ли может быть общим.

3) Выбрать подходящую функцию потерь C (с обоснованием).

Данные и точность подгонки

Второй вопрос касается качества набора данных для обучения, а также соответствующего правила остановки: когда обучение закончится?

Обеспечение репрезентативности данных означает, что обучение должно происходить в типичной для этого типа системы среде, а среда должна быть такой, чтобы воздействие было типичным для этого типа использования, включая все изменения в среде. Все копии системы (после обучения) должны работать, как минимум, в аналогичной среде и должны быть одинаковыми (см. статью Брабанда, 2018 [2]). Необходимо также учесть проблему обнаружения аномалий (данная проблема касается вопроса 3). Возможно, необходимо ввести правила, связанные с обеспечением безопасности системы, для среды, в которой в которой будет функционировать система.

Следующий вопрос заключается в точности подгонки данных. Как определить точность подгонки набора данных для обучения? Можно ли допустить ошибку в наборе данных для обучения? Как правило, на практике любая неправильная классификация в наборе данных для обучения может привести к высокой доле ошибок при классификации. В качестве примера рассмотрим черную точку на границе линии на рис. 5. Предположим, что оба набора данных разделены истинной (красной) функцией f , как показано на рис. 5. Если данная черная точка классифицирована неправильно, весь набор находящихся рядом с ней точек также будет неверно классифицирован, что приведет к большому количеству ошибок. С другой стороны, данная точка может быть выброшена.

Это означает, что:

1. Либо имеется 100% правильная классификация набора данных для обучения,
2. Либо можно точно рассчитать вероятность возникновения ошибки.

Проблема состоит в том, что невозможно просто посчитать ошибки классификации. Необходимо присвоить им вес в соответствии с их важностью, что может быть затруднительно в больших пространствах и при наличии больших данных.

Кроме того, обучение происходит с использованием статистического подхода, что означает следующее:

- необходимо учитывать доверительные границы;
- производные параметры – это случайные значения с некоторым разбросом;

- последующие решения ИИ также будут случайными с некоторыми ошибками:

- первый тип ошибки: неверное решение, несмотря на то, что входные данные находятся в «правильном» домене;

- второй тип ошибки: входные данные находятся в «неправильном домене», но решение является «верным».

В результате ИИ обладает вероятностью ошибочного решения. Данный фактор необходимо учитывать при выделении части бюджета допустимой интенсивности опасных случайных отказов ИИ (в данном случае: алгоритм).

5. Стандарты функциональной безопасности искусственного интеллекта и возможная процедура оценки

Если ИИ применяется в приложениях, связанных с безопасностью, в действие вступают стандарты функциональной безопасности. Обратимся к базовому стандарту МЭК 61508 [10]. Он представляет собой пример требований стандартов функциональной безопасности. Основная информация содержится в МЭК 61508-3, таблица А.2:

№ 5 – Исправление ошибок методами искусственного интеллекта SIL 2- SIL 4: NR (см. С.3.12);

№ 6 – Динамическая реконфигурация SIL2 – SIL 4: NR (см. С3.13).

В части МЭК 61508-7 приведено определение искусственного интеллекта в рамках стандарта.

С.3.9 Исправление ошибок методами искусственного интеллекта

Для различных каналов связи системы прогнозирование (вычисление тенденций), исправление ошибок, обслуживание и контролирующие действия могут достаточно эффективно поддерживаться системами, основанными на методах искусственного интеллекта (AI). Правила для таких систем могут быть созданы непосредственно из спецификаций и проверены на соответствие. С помощью методов искусственного интеллекта некоторые ошибки общего характера, попадающие в спецификации, для устранения которых уже существуют некоторые правила проектирования и реализации, могут быть исключены, особенно при представлении комбинаций моделей и методов функциональным или описательным способом. Методы выбираются так, чтобы ошибки могли быть устранены и влияние отказов минимизировано для обеспечения требуемой полноты безопасности.

Фактически, МЭК 61508 рассматривает ИИ как средство исправления ошибок, а динамическую реконфигурацию – как реакцию на ошибку в системе управления. Такое применение сделает систему управления непредсказуемой.

Как выполнить требования МЭК 61508, относящиеся к искусственному интеллекту? Утверждение, приведенное в стандарте, связано с утверждением о динамической реконфигурации, что является нежелательным для SIL 2... SIL 4. Если ИИ применяется в самой системе управления, это не будет реакцией на неисправности системы управления, это будет его свойством.

Стандарт функциональной безопасности требует предсказуемой системы. Предсказуемая система означает, что меры, предусмотренные против систематических отказов, позволяют влиянием этих отказов пренебречь. Вероятность возникновения случайных отказов находится на достаточно низком уровне.

Таким образом, поведение системы с ИИ должно быть предсказуемым в статистическом смысле. Стоит учитывать, что предсказуемое поведение означает не детерминированное поведение, а статистически предсказуемое поведение. Это значит, что система ИИ будет способствовать случайным опасным отказам, вызванным случайным поведением самого программного обеспечения. Это является ключевым отличием от обычных систем Э/Э/ПЭ, где программное обеспечение считается детерминированным, а требования относятся только к систематическим ошибкам, благодаря чему выполнение требований к программному обеспечению стандартов функциональной безопасности позволяет снизить вероятность этих ошибок до приемлемого уровня.

Предлагаемый подход к оценке содержит следующие шаги:

- анализ модели;
- выделение части бюджета допустимой интенсивности опасных случайных отказов в системе ИИ, поскольку она демонстрирует вероятностное поведение;
- рассмотрение системы ИИ в качестве нормальной математической модели, но с случайным поведением.

Затем оценка проводится так же, как и обычная оценка безопасности со сложной математической моделью. Авторы не будут приводить всю процедуру оценки безопасности в данной статье. Подробнее о процессе оценки см. Виггер [17].

Основной частью оценки является проверка модели. Математическую модель необходимо проверить в отношении следующих аспектов:

- правильность модели с точки зрения физических/химических/математических и других научно обоснованных теорий;
- эквивалентность другим математическим моделям, например, моделям кривых торможения, тепловым моделям и т.д.

Это означает, что теория / модель должна быть открыта эксперту-оценщику. Модели могут быть одного из следующих типов (см., например, Ванг, 2017 [16]):

- нейронная сеть;
- долгая краткосрочная память;
- автокодировщик;
- глубокая машина Больцмана;
- генеративно-состязательная сеть;
- долгая краткосрочная память на основе внимания.

Чем более гибкой является модель, тем сложнее будет ее анализ. В следующем разделе приводится пример того, как подобный анализ может быть выполнен для очень простой модели.

Из-за значительных усилий, необходимых для проверки модели, возникает вопрос, могут ли быть использованы проверенные на практике подходы. Согласно Брабанду и др. [2], это будет означать накопление минимального количества часов безотказной работы (здесь: нет опасных отказов) по следующей схеме:

- $3 \cdot 10^6$ часов безотказной работы для SIL 1;
- $3 \cdot 10^8$ часов безотказной работы для SIL 4.

Практический опыт показывает, что такое количество часов безотказной работы трудно накопить. Как следствие, необходимо провести анализ модели, который остается одной из основных частей оценки безопасности.

6. Академический пример

Целью приведенного в данном разделе примера является не представление модели системы ИИ, а общее описание того, как можно проводить оценку безопасности. Предположим, что система классификации распределяет объекты по двум категориям: «левый» и «правый» – на основе одного действительно-значного параметра. Параметр считается нормально распределенным. Следует обратить внимание на то, что статистически модель полностью определяется этим предположением, которое при использовании на практике должно быть обосновано. Его нельзя воспринимать как данность, поэтому мы называем этот пример теоретическим, ведь в нем предполагается, что нам известна истинная модель.

Два полученных подмножества имеют следующие характеристики:

- «левый» характеризуется нормальным распределением со средним значением m_L и стандартным отклонением σ_L ;
- «правый» характеризуется нормальным распределением со средним значением m_R и стандартным отклонением σ_R .

Сначала предположим, что параметры известны.

Затем устанавливается следующее правило классификации:

«левый» если $X \leq z$ и «правый» если $X > z$, где z – «правильно» выбранная константа. Теперь могут быть рассчитаны ошибки первого и второго рода.

$$\alpha = 1 - \Phi(z - m_L/\sigma_L) - \text{ошибка первого рода}; \quad (2)$$

$$\beta = \Phi(z - m_R/\sigma_R) - \text{ошибка второго рода}; \quad (3)$$

$$\Phi(z - m_L/\sigma_L) - \text{вероятность правильного отнесения к категории «левый»}; \quad (4)$$

$$1 - \Phi(z - m_R/\sigma_R) - \text{вероятность правильного отнесения к категории «правый»}; \quad (5)$$

Φ – функция стандартного нормального распределения.

Ошибкой первого рода является вероятность того, что объект будет отнесен к подмножеству «правый», в то время как он принадлежит подмножеству «левый». Ошибкой второго рода является вероятность того, что объект будет отнесен к подмножеству «левый», в то время как он принадлежит подмножеству «правый». Чтобы ошибки были небольшими, параметры σ_R и σ_L должны быть как можно меньше.

Однако существует одна проблема. Параметры m_L , m_R , σ_L и σ_R неизвестны и должны быть получены статистическим образом, т.е. рассчитаны на выборке данных.

Как система обучается? Система обучается на двух выборках для обоих подмножеств: для обучения используются «левая» выборка $XL_i, i = 1, \dots, n_L$ и «правая» выборка $XR_i, i = 1, \dots, n_R$.

На основе выборок можно оценить неизвестные точечные параметры:

$$m_R = \frac{1}{n_R} \sum_i XR_i; \quad (6)$$

$$m_L = \frac{1}{n_L} \sum_i XL_i; \quad (7)$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{(n_R - 1)} \sum_i (XR_i - m_R)^2; \quad (8)$$

$$\sigma_L^2 = \frac{1}{(n_L - 1)} \sum_i (XL_i - m_L)^2. \quad (9)$$

В (6) – (9) суммы рассчитываются по индексу i от 1 до n_L или n_R соответственно.

На следующем шаге вместо точечных оценок, заданных (6) – (9), должны использоваться границы доверительного интервала параметров. Границы доверительного интервала выбираются таким образом, что ошибка, ведущая к неправильной классификации, становится малой, то есть верхние границы для стандартных отклонений и m_R и нижняя граница для m_L . Мы используем однопараметрические границы, а не комбинированные, чтобы упростить вычисления.

Точечные оценки (6) – (9) имеют следующие характеристики:

$(n_L - 1)\sigma_L^2/\hat{\sigma}_L^2$, где $\hat{\sigma}_L^2$ – дисперсия «левой» генеральной совокупности, имеет распределение хи-квадрат с $n_L - 1$ степенями свободы;

$(n_R - 1)\sigma_R^2/\hat{\sigma}_R^2$, где $\hat{\sigma}_R^2$ – дисперсия «правой» генеральной совокупности, имеет распределение хи-квадрат с $n_R - 1$ степенями свободы;

$\sqrt{n_L}(m_L - \hat{m}_L)/\hat{\sigma}_L$, где $\hat{m}_L, \hat{\sigma}_L$ – соответственно среднее и стандартное отклонение «левой» генеральной совокупности, имеет t -распределение с $n_L - 1$ степенями свободы;

$\sqrt{n_R}(m_R - \hat{m}_R)/\hat{\sigma}_R$, где $\hat{m}_R, \hat{\sigma}_R$ – соответственно среднее и стандартное отклонение «правой» генеральной совокупности, имеет t -распределение с $n_R - 1$ степенями свободы.

Наименее благоприятными значениями являются: верхние границы доверительного интервала дисперсий, т.е.

$$\sqrt{(n_R - 1) / \text{Chi2}(n_R - 1; 1 - \gamma)} \cdot \sigma_R \quad (10)$$

$$\sqrt{(n_L - 1) / \text{Chi2}(n_L - 1; 1 - \gamma)} \cdot \sigma_L \quad (11)$$

где $\text{Chi2}(n; 1 - \gamma)$ – квантиль распределения хи-квадрат с обеспеченностью $1 - \gamma$;

нижняя граница доверительного интервала m_L

$$m_L - \frac{t(n_L - 1, \gamma) \cdot \sigma_L}{\sqrt{n_L}} \quad (12)$$

и верхняя граница доверительного интервала m_R

$$m_R + \frac{t(n_R - 1, \gamma) \cdot \sigma_R}{\sqrt{n_R}}, \quad (13)$$

где $t(n; \gamma)$ – квантиль t -распределения с n степенями свободы и обеспеченностью $1 - \gamma$.

Путем подстановки границ доверительных интервалов (10) – (13) в уравнения (2) – (5) получаем вероятности ошибок.

Если неправильная классификация при ошибке первого типа опасна, из (2) с (6) и (8) получаем вероятность опасного отказа. Однако для учета ошибок, возникающих при применении доверительных интервалов, необходимо использовать значение вероятности ошибки $\alpha + 2\gamma$.

Интерпретация γ как вероятности того, что истинное значение лежит за пределами доверительного интервала, является не частотной, а байесовской с использованием соответствующей априорной вероятности.

Для системы с SIL 1 вероятность отказа по требованию не должна превышать 0,1. Данное значение можно рассматривать как бюджет:

Можно выбрать 0,05 в качестве максимального значения для аппаратных сбоев и 0,05 для алгоритма ИИ. Последнее также можно разделить:

$$0,05 = \alpha + 2\gamma,$$

например, следующим образом:

$$\alpha = 0,025, \gamma = 0,0125.$$

Для SIL 4 в МЭК 61508 приведено пороговое значение 0,0001 вероятности отказа по требованию.

Читатель может повторить приведенные расчеты. В качестве дальнейшего упражнения можно рассмотреть условия, при которых значения математических ожиданий и стандартных отклонений удовлетворяют требованиям. Этот простой пример показывает, что следует ожидать сложных вычислений. Даже в этом очень простом примере мы столкнулись со сложной математикой.

Как же выйти из этой сложной ситуации?

Существуют два основных варианта:

1. Система ИИ не нуждается в SIL, поскольку ее поведение не имеет критических для безопасности последствий (травм для людей и т.д.).

2. Система ИИ поддерживается достаточно простой системой Э/Э/ПЭ, имеющей необходимый SIL, которая проверяет все опасные решения в соответствии с более простыми алгоритмами и предотвращает опасные реакции.

Эти варианты должны быть подкреплены анализом рисков (см. МЭК 61508).

7. Дальнейшие исследования

Мы признаем, что приведенный пример является достаточно простым и теоретическим, однако мы считаем, что необходимо понять и решить небольшие проблемы, прежде чем подходить к многомерным задачам.

Для рассмотрения чуть более практического примера, разберем следующую задачу: дано множество из n двумерных точек, которые разделены на два подмножества (как на рис. 5, но точки). Модель неизвестна, но количество точек в определенной степени можно контролировать. Известно только то, что задача связана с безопасностью и имеет SIL x . Можно выбрать свой любимый метод классификации, например, ИНС.

При каких допущениях вы сможете представить доказательство безопасности в соответствии с признанным стандартом безопасности, например, МЭК 61508? Можно ли также предоставить адекватное руководство по практической проверке обоснованности этих допущений?

Это может показаться простой проблемой, но она имеет большое значение: если мы не сможем представить доказательство безопасности (при допущениях, которые можно обоснованно проверить на практике), то алгоритмы ИИ (по крайней мере, некоторые классы) не могут быть использованы для приложений, связанных с безопасностью. Но если мы сможем решить эти проблемы при определенных условиях, то используемый подход, возможно, удастся обобщить для больших размерностей.

8. Заключение

В данной статье описан возможный подход к оценке безопасности систем ИИ, однако некоторые вопросы остаются открытыми и могут быть решены только в контексте конкретного приложения.

Уровень полноты безопасности можно определить как для обычной системы Э/Э/ПЭ. Он также должен быть подтвержден анализом опасности и риска. Это необходимо, даже если система не требует SIL.

ИИ можно легко применять в ситуациях, где не возникает критических для безопасности последствий, что должно быть подтверждено анализом риска. В этом случае не нужно вводить требования к уровню полноты безопасности системы, и оценка безопасности не требуется.

Предложен подход к анализу модели. Проводимый анализ в значительной степени зависит от типа модели. Оценка всегда требует глубокого анализа модели ИИ, что означает, что сам ИИ не может быть проанализирован,

поскольку охватывает множество различных подходов. Чем более гибкой является модель, тем сложнее должен быть ее анализ. При использовании в критичных для безопасности системах удобным подходом может быть ограничение типов моделей для упрощения проектирования и оценки системы ИИ.

Перл и Маккензи [12] подошли к проблеме с той же точки зрения и пришли к выводу, что в ИИ должна быть введена причинно-следственная связь, прежде чем мы сможем полагаться на его выводы. Один из их выводов заключается в том, что необходимо «сформулировать модель процесса, который генерирует данные, или, по крайней мере, некоторые аспекты этого процесса».

Был приведен теоретический пример для демонстрации подхода к анализу конкретного типа модели.

Также представлена задача для дальнейших исследований, решение которой может быть ключевым в использовании алгоритмов ИИ для приложений, связанных с безопасностью. Задача состоит в том, чтобы сформулировать модель процесса генерации данных, которая позволяет проводить анализ безопасности и может быть обоснована для практического применения.

Есть только две возможности использования систем ИИ без необходимости тщательной оценки безопасности: либо иметь систему ИИ, которая не связана с безопасностью, либо иметь другую систему Э/Э/ПЭ, связанную с безопасностью, которая принимает на себя полную ответственность за безопасность.

Библиографический список

1. Anscombe F.J. Graphs in Statistical Analysis // *American Statistician*. 1973. 27(1). P. 17–21.
2. Braband J., Gall H., Schäbe H. Proven in Use for Software: Assigning an SIL Based on Statistics / Mahboob Q., Zio E., editors. *Handbook of RAMS in Railway systems – Theory and Practice*. Boca Raton, Taylor and Francis. 2018.
3. Brunette E.S., Flemmer R.C., Flemmer C.L. A review of artificial intelligence // *Proc. 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*. Feb. Wellington. 2009. P. 385–392.
4. Chen S.H., Jakeman A.J., Norton J.P. Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems // *Mathematics and Simulation*. 2008. Vol. 78. P. 379–400.
5. Corni M. Is Artificial Intelligence Racist? (And Other Concerns). URL : <https://towardsdatascience.com/is-artificial-intelligence-racist-and-other-concerns-817fa60d75e9> [accessed October 25, 2018].
6. Cybenko G. Approximations by superpositions of sigmoidal functions // *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. 1989. № 2(4). P. 303–314.
7. Hättasch N., Geisler N. The Deep Learning Hype: Presentation at 36C3. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FomrN5XHqHY>.
8. EN 50128. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems; 2011.
9. EN 50129. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems; 2018.
10. IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems; 2010.
11. Ivanov A.I., Kuprianov E.N., Tureev S.V. Neural network integration of classical statistical tests for processing small samples of biometrics data // *Dependability*. 2019. № 19(2). P. 22–27.
12. Pearl J., Mackenzie D. *The Book of Why*. Penguin Science, 2018.
13. Putzer H. Ein strukturierter Ansatz für funktional sichere KI. Presentation at DKE Funktionale Sicherheit. Erfurt; 2019. (in Ger.)
14. Schäbe H. SIL Apportionment and SIL Allocation. / Mahboob Q., Zio E., editors. *Handbook of RAMS in Railway systems – Theory and Practice*. Boca Raton, Taylor and Francis. 2018. P. 69–78.
15. Underwriter Laboratories: Standard for Safety for the Evaluation of Autonomous Products. Draft UL 4600; 2019.
16. Wang J., Ma Y., Zhang L., et al. Deep learning for smart manufacturing: Methods and Applications // *Journal of Manufacturing Systems*. 2017. № 48. P. 144–156.
17. Wigger P. Independent Safety Assessment – Process and Methodology / Mahboob Q., Zio E., editors. *Handbook of RAMS in Railway systems – Theory and Practice*. Boca Raton, Taylor and Francis. 2018. P. 475–485.

Сведения об авторах

Йенс Брабанд – доктор естественных наук, главный эксперт по RAMSS at Siemens Mobility GmbH, профессор Технического Университета, Брауншвейг, Германия, e-mail: jens.braband@siemens.com

Шебе Хендрик – доктор физико-математических наук, заведующий отделом анализа рисков и опасностей, TÜV Rheinland InterTraffic, Кельн, Германия, e-mail: schaebe@de.tuv.com

Вклад автора в статью

Вклад авторов заключается в анализе систем с искусственным интеллектом как статистических моделей, анализ подхода к оценке безопасности таких систем и рассмотрении примера. Вклад авторов равный.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Методика инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при информационно-технических воздействиях

Сергей Г. Антонов¹, Иван И. Анциферов¹, Сергей М. Климов^{1*}

¹4 ЦНИИ Минобороны России, Российская Федерация, Королев

*klimov.serg2012@yandex.ru



Сергей Г. Антонов



Иван И. Анциферов



Сергей М. Климов

Резюме. Целью статьи является разработка методики, позволяющей получить количественную оценку показателей устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) при информационно-технических воздействиях (ИТВ) с использованием данных по результатам экспериментальных исследований на стендовом полигоне. К объектам КИИ относятся информационно-телекоммуникационные сети (ИТКС), информационные системы (ИС), автоматизированные системы (АС) и системы электро-связи, которые применяются в компьютеризированных системах транспорта, энергетики, связи, навигации, промышленном производстве и других областях жизнедеятельности. Под устойчивостью функционирования объектов КИИ в статье понимается способность элементов объектов КИИ сохранять значения параметров функционирования в пределах установленных требований на заданном интервале времени при реализации ИТВ нарушителем. В качестве угроз ИТВ нарушителя – компьютерных атак – рассматриваются целенаправленные программно-аппаратные воздействия, приводящие к нарушению (блокированию, искажению) информационно-вычислительных процессов функционирования объектов КИИ на заданном интервале времени. Разработанная методика основана на экспериментальных исследованиях, методах ускоренных испытаний и расчетных методах оценки устойчивости функционирования объектов КИИ, использованных применительно к специфике системного анализа процессов функционирования ИТКС, ИС и АСУ при имитации ИТВ нарушителя. В качестве показателей в методике предложены два основных типа показателей, вероятности возникновения сбоев и дополнительных (искусственных) сбоев при передаче данных между элементами объектов КИИ, вызванных ИТВ, и вероятности сбоев и дополнительных сбоев в результате ИТВ при обработке информации на объектах КИИ. Включение в состав методики показателей для оценки дополнительных сбоев, обусловленных ИТВ, дает возможность априорного анализа редких и внезапных событий нарушения устойчивости функционирования объектов КИИ. По результатам оценки обосновываются организационно-технические меры информационной безопасности для нейтрализации ИТВ на объекты КИИ. Использование методики предполагает наличие стендовых полигонов (опытных районов) для оценки устойчивости и реальной защищенности объектов КИИ, на которых размещены функциональные аналоги объектов КИИ, имитаторы ИТВ, комплексы средств защиты информации (СЗИ) и ликвидации последствий компьютерных инцидентов. Разработанная методика позволяет оценить значения показателей устойчивости – вероятности успешной передачи данных между элементами объекта КИИ и вероятности успешной обработки информации в элементе объекта КИИ в условиях сбоев на основе инструментально-расчетной оценки процессов функционирования элементов системы при имитации ИТВ на стендовом полигоне.

Ключевые слова: информационно-технические воздействия, объекты критической информационной инфраструктуры, сбой, устойчивость.

Формат цитирования: Антонов С.Г., Анциферов И.И., Климов С.М. Методика инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при информационно-технических воздействиях // Надежность. 2020. № 4. С. 35-41. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-35-41>

Поступила 05.08.2020 г. / После доработки 21.08.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение

Развитие объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) характеризуется интенсивным внедрением новых информационных технологий распределенного сбора, обработки, хранения и передачи значительных объемов разнородных данных в интересах эффективного управления промышленными и производственными процессами в различных сферах деятельности человека и государства [13, 14].

Значительный объем сетевых протоколов и данных на объектах КИИ, стандартные настройки параметров средств защиты информации (СЗИ) объективно приводят к внесению в них множества уязвимостей. Множество потенциальных уязвимостей в элементах объектов КИИ включает параметры уязвимостей программного обеспечения, информационного обеспечения, телекоммуникационного оборудования, а также параметры функциональных и сетевых уязвимостей.

Совокупность уязвимостей в элементах объектов КИИ создает предпосылки для реализации потенциальных внутренних и внешних угроз информационно-технических воздействий (ИТВ) нарушителя, которые снижают устойчивость функционирования объектов КИИ [1, 2, 6, 12].

В статье рассматриваются угрозы ИТВ нарушителя, представляющие собой целенаправленные программно-аппаратные воздействия, приводящие к нарушению устойчивости функционирования объектов КИИ. Реализация ИТВ нарушителем осуществляется в форме взаимосвязанных и многошаговых воздействий средствами фаззинга, компьютерных атак «отказ в обслуживании» (DDoS-атак) и информационной нагрузки [7].

Последствия успешной реализации ИТВ нарушителя на объекты КИИ характеризуются следующим:

- несанкционированный доступ к защищаемой информации на объектах КИИ;
- нарушение устойчивости функционирования;
- сбои и отказы в процессах выполнения информационно-расчетных задач;
- замедления при передаче технологической информации о состоянии элементов объектов КИИ;
- блокирование (нарушение) сетевого взаимодействия элементов объектов КИИ;
- возможность искажения информации, критической для применения объектов КИИ;
- инициализация недеklarированных возможностей для запуска массивных ИТВ на элементы объектов КИИ РВСН, сопоставимых по последствиям с техногенными катастрофами.

В соответствии с современными требованиями в области информационной безопасности при обеспечении безопасности информации объектов КИИ необходимо обеспечить устойчивость функционирования при осуществлении в отношении их ИТВ нарушителя [10, 11, 13, 14].

Для повышения устойчивости функционирования объектов КИИ при ИТВ нарушителя необходима заблаговременная и экспериментальная оценка их реальной защищенности и устойчивости на стендах или опытных участках [3, 4, 9].

Проведение стендовых испытаний и оценки реальной защищенности и устойчивости объектов КИИ при ИТВ обеспечат подготовку, выбор обоснованных организационно-технических мер информационной безопасности по устранению уязвимостей и снижению вероятности реализации угроз ИТВ, что позволит повысить устойчивость функционирования элементов объектов КИИ за счет выполнения указанных мер.

Таким образом, разработка методики, позволяющей повысить устойчивость функционирования объектов КИИ при ИТВ нарушителя за счет априорной оценки и многовариантного выбора организационно-технических мер информационной безопасности, устранения уязвимостей, является актуальной и представляет практический интерес.

Постановка задачи

Для обоснования инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов КИИ при ИТВ в условиях сбоев сделаны следующие предположения:

- усложнение структуры, состава, количества решаемых целевых задач, сохранение одновременно работоспособных подсистем различных поколений, организация информационного взаимодействия между удаленными элементами объектов КИИ при ИТВ нарушителя создают предпосылки для возможных сбоев и требуют оценки для поддержания необходимого уровня устойчивости объектов КИИ;
- случайный характер вскрытия уязвимостей нарушителем и проникновения ИТВ на объекты КИИ приводят к необходимости многовариантного имитационного моделирования угроз ИТВ нарушителя;
- выполнение только аналитическими расчетами оценки устойчивости объектов КИИ в условиях сбоев, вызванных ИТВ нарушителя, затруднительно, требуется натурное моделирование значимых элементов КИИ в регламентах работы, близких к реальным процессам функционирования;
- инструментальная оценка устойчивости объектов КИИ при имитации ИТВ носит характер контрольной проверки, по результатам которой устанавливается, что значения вероятностных показателей устойчивости в условиях сбоев не ниже заданных;
- в ходе инструментальной проверки на стендовом полигоне проводятся ускоренные испытания элементов объектов КИИ, когда имитируются режимы информационной нагрузки, ускоряющие процесс возникновения сбоев;
- с учетом принимаемых мер по информационной безопасности объектов КИИ, значения показателей вероятности устойчивого функционирования в условиях низкоинтенсивных сбоев могут быть настолько малы,

что потребуют значительного времени тестирования системы, что обуславливает важность расчетного прогноза по результатам инструментальной оценки [8, 11, 13];

- продолжительность инструментальной оценки осуществляется в течение времени, которое необходимо для достоверной оценки вероятностных показателей устойчивости объектов КИИ при допустимых значениях их средней наработки на сбой [14];

- использование имитатора ИТВ позволяет проводить ускоренные испытания объектов КИИ в ходе инструментально-расчетной оценки, так как на стенде имитируются факторы повышения интенсивности искусственных сбоев (повышение вероятности их возникновения) при форсированных режимах эксплуатации объектов КИИ.

В общем виде постановка научной задачи оценки устойчивости объектов КИИ при ИТВ нарушителя представлена следующим образом:

Дано:

w_p – число реальных сбоев при передаче данных между элементами объекта КИИ;

h_p – число реальных сбоев в средствах обработки информации на объектах КИИ;

$\Delta t_{СПД}$ – среднее время передачи данных между элементами объекта КИИ;

$\Delta t_{ПАК}$ – среднее время обработки информации в средствах объекта КИИ.

Требуется:

найти такие значение фактических параметров сбоев в объектах КИИ: числа w_d^* дополнительных сбоев в сети передачи данных (СПД), числа h_d^* дополнительных сбоев в системе обработки данных (СОД), времени $t_{СПД}^{СБ*}$ сбоя в СПД и времени $t_{ПАК}^{СБ*}$ сбоя в СОД, при которых сохраняются требуемые значения вероятности устойчивости функционирования

$$P_{УПАК}^* \geq P_{УПАК}^{ТРЕБ} \left[(w_p^*, w_d^*, t_{СПД}^{СБ*}), (h_p^*, h_d^*, t_{ПАК}^{СБ*}), (\Delta t_{СПД}^*, \Delta t_{ПАК}^*) \right]$$

при ограничениях на характеристики средств передачи и обработки данных в объектах КИИ:

$$\Delta t_{СПД} \in T_{СПД}, \Delta t_{ПАК} \in T_{ПАК}$$

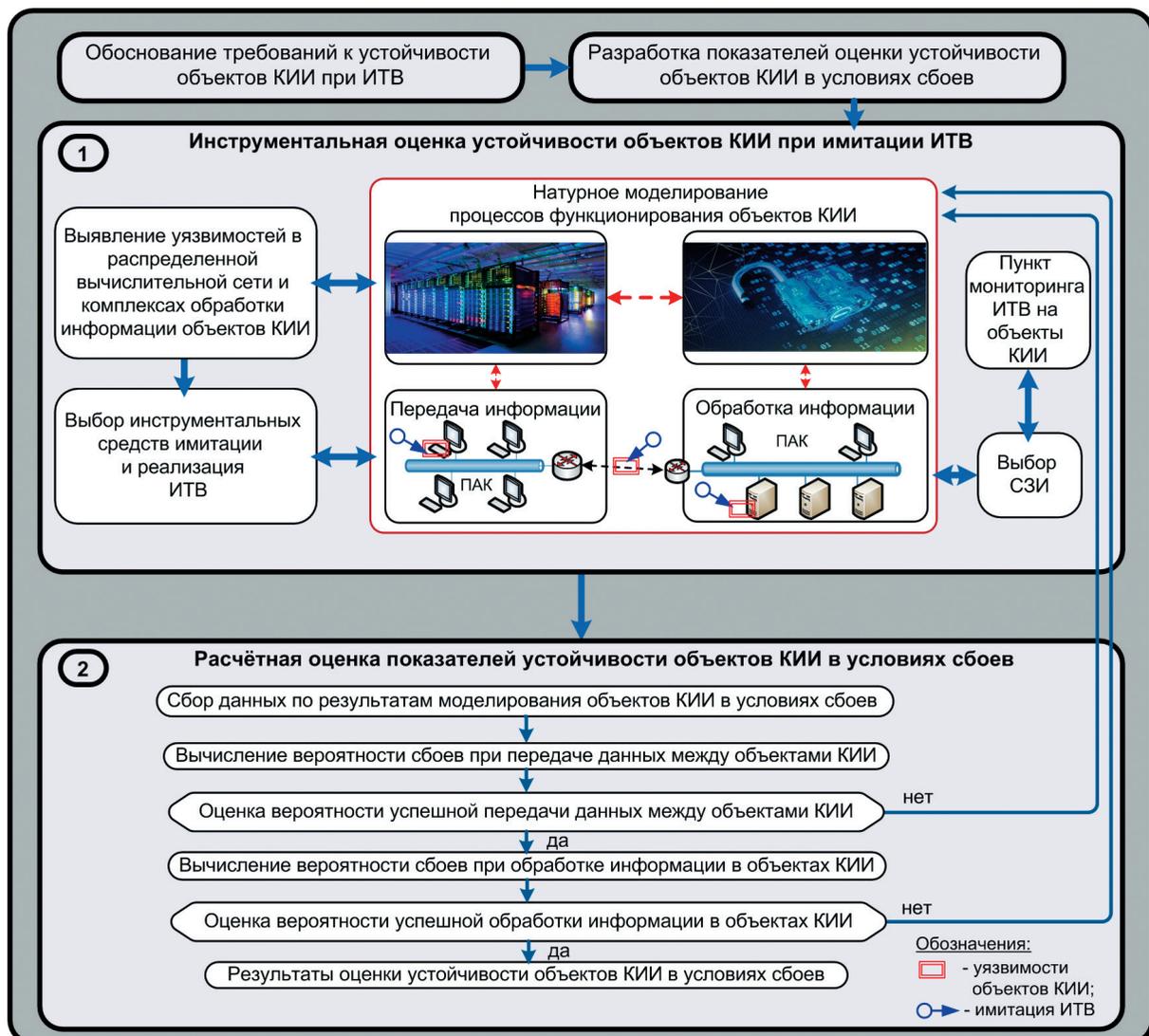


Рис. 1. Схема методики инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов КИИ при имитации ИТВ

Постановка научной задачи исследований выполнена в предположении того, что процессы функционирования объектов КИИ представляются Марковскими процессами, а процессы ИТВ, приводящие к дополнительным сбоям, описываются распределением Пуассона.

Схема методики инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов КИИ при ИТВ представлена на рис. 1. Под сбоем в элементах объектов КИИ будем понимать кратковременное (от нескольких секунд до 60 минут, с учетом времени восстановления) нарушение параметров функционирования [1, 8, 14]. В связи с тем, что категоризованные объекты КИИ являются опасными для жизнедеятельности и их нарушение приводит к значительному ущербу, в исследованиях принято, что в объектах КИИ отказ недопустим. То есть, при ИТВ события нарушения работоспособности объектов КИИ на время более 60 минут нейтрализуются выбранными организационно-техническими мерами информационной безопасности, средствами восстановления работоспособности и резервными элементами.

По своей сути представленная методика обеспечивает подтверждение соответствия показателей устойчивости перспективных или модернизированных объектов КИИ в условиях сбоев, обусловленных ИТВ нарушителя, предъявленным техническим требованиям заказчика.

Для формирования доказательной базы соответствия реальных показателей устойчивости объектов КИИ в условиях сбоев полученным оценкам, в методике использована проверка соответствия результатов натурного и имитационного моделирования на стендовом полигоне расчетным оценкам выбранных показателей.

В методике предложена пошаговая последовательность определения показателей в ходе инструментально-расчетной оценки устойчивости функционирования объектов КИИ в условиях сбоев, включающей два основных этапа:

1. Инструментальная оценка устойчивости объектов КИИ при имитации ИТВ;

2. Расчетная оценка показателей устойчивости объектов КИИ в условиях сбоев.

Первоначально должно быть проведено обоснование требований к устойчивости функционирования объектов КИИ при ИТВ. Эти требования должны быть включены в тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу по созданию объекта КИИ (экспериментального образца, опытного района объекта КИИ) или учтены при модернизации элементов объекта КИИ.

Далее в соответствии с методикой осуществляется разработка показателей для инструментально-расчетной оценки устойчивости объекта КИИ в условиях сбоев.

В связи с тем, что функционирование объекта КИИ характеризуется двумя основными процессами: передача данных между элементами объекта КИИ и обработка информации, то в методике предложены два показателя:

1. Вероятность успешной передачи данных между элементами объекта КИИ;

2. Вероятность успешной обработки информации в объекте КИИ.

Этап инструментальной оценки устойчивости функционирования объекта КИИ при имитации ИТВ проводится на стендовом полигоне и заключается в следующем:

1. Натурное моделирование процессов функционирования элементов объекта КИИ на стендовом полигоне или на опытном районе, включая передачу данных между элементами, а также обработку данных в локально-вычислительных сетях с программно-аппаратными комплексами (ПАК) на объектах КИИ.

2. Выбор средств защиты информации в соответствии с предъявленными требованиями к классам защищенности автоматизированных систем (АС), средств вычислительной техники, средств защиты информации от несанкционированного доступа, средств обнаружения вторжений, средств антивирусной защиты, межсетевых экранов, средств криптографической защиты, а также согласно требованиям к уровню доверия программного обеспечения АС [5].

3. Выявление уязвимостей в распределенной вычислительной сети и ПАК обработки информации объектов КИИ с использованием модели [8].

4. Выбор инструментальных средств имитации и реализация ИТВ с использованием методики [9].

Выходные статистические данные этапа инструментальной оценки устойчивости объектов КИИ при имитации ИТВ являются входными параметрами для расчетной оценки их устойчивости в условиях сбоев.

На этапе расчетной оценки устойчивости процессов функционирования объектов КИИ при имитации ИТВ с использованием метода ускоренных испытаний [14] сделаны предположения:

а) в составе объектов КИИ находятся два основных типа элементов:

1) j -е средства передачи данных объекта КИИ, в которых за время $t_{СПДj}$ с вероятностью $P_{СПДj}^{СБР}$ происходят реальные сбои $w_{рj}$, а с вероятностью $P_{СПДj}^{СБД}$ происходят дополнительные (искусственно созданные) сбои w_{dj} при ИТВ нарушителя;

2) i -е средства обработки данных объекта КИИ, в которых за время $t_{ПАКi}$ с вероятностью $P_{ПАКi}^{СБР}$ происходят реальные сбои $h_{рi}$, а с вероятностью $P_{ПАКi}^{СБД}$ происходят дополнительные (искусственно созданные) сбои h_{di} при ИТВ нарушителя;

б) при передаче и обработке данных в объекте КИИ на каждом средстве выполняется технологическая операция, в ходе которой может произойти сбой;

в) вероятность возникновения сбоев в элементах объекта КИИ при выполнении технологических операций, как правило, имеет геометрическое распределение, которое аппроксимируется экспоненциальным законом распределения [14];

г) поток событий сбоев в средствах передачи и обработке данных объекта КИИ интерпретируется как непрерывный пуассоновский поток.

Этап расчетной оценки устойчивости нарушителя в условиях сбоев, произошедших в результате реализации ИТВ, методом ускоренных испытаний состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Сбор данных по результатам моделирования объекта КИИ при имитации ИТВ, необходимых и достаточных параметров для проведения расчетной оценки устойчивости объекта КИИ в условиях сбоев.

Шаг 2. Вычисление вероятности сбоев при передаче данных между элементами объекта КИИ:

а) вычисление вероятности того, что произойдет w_{pj} реальных сбоев при передаче данных между элементами объекта КИИ за время $t_{СПДj}$ в j -м средстве передаче данных:

$$P_{СПД}^{СБР}(w_{pj}) = \prod_{j=1}^k e^{-t_{СПДj}^{СБР} P_{СПДj}^{СБР} / \Delta t_{СПД}} (P_{СПДj}^{СБР})^{w_{pj}}, \quad (1)$$

где w_{pj} – число реальных сбоев в j -м средстве передачи данных;

$t_{СПДj}^{СБР}$ – время, за которое происходит сбой в j -м средстве передачи данных;

$P_{СПДj}^{СБР}$ – вероятность возникновения реального сбоя в j -м средстве передачи данных;

$\Delta t_{СПД}$ – среднее время передачи данных между элементами объекта КИИ;

k – число средств передачи данных.

б) вычисление вероятности того, что произойдет w_{dj} дополнительных (искусственно организованных) сбоев при передаче данных между элементами объекта КИИ за время $t_{СПДj}$ в j -м средстве передачи данных:

$$P_{СПД}^{СБД}(w_{dj}) = \prod_{j=1}^k e^{-t_{СПДj}^{СБД} P_{СПДj}^{СБД} / \Delta t_{СПД}} (P_{СПДj}^{СБД})^{w_{dj}}, \quad (2)$$

где w_{dj} – число дополнительных сбоев в j -м средстве передачи данных;

$P_{СПДj}^{СБД}$ – вероятность возникновения дополнительного сбоя в j -м средстве передачи данных.

Шаг 3. Оценка вероятности успешной передачи данных между элементами объекта КИИ:

$$P_{УСПД} = \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} U_{P_{УСПД}}(w_{pj}, w_{dj}) \frac{\prod_{j=1}^k e^{-t_{СПДj}^{СБР} P_{СПДj}^{СБР} / \Delta t_{СПД}} (P_{СПДj}^{СБР})^{w_{pj}}}{\prod_{j=1}^k e^{-t_{СПДj}^{СБД} P_{СПДj}^{СБД} / \Delta t_{СПД}} (P_{СПДj}^{СБД})^{w_{dj}}}, \quad (3)$$

где N_w – количество инструментальных оценок на стендовом полигоне с реализацией векторов сбоев w_{pj} и w_{dj} ;

$U_{P_{УСПД}}(w_{pj}, w_{dj})$ – индикаторная функция, принимающая значение 1, если событие соответствует показателю $P_{УСПД}$, и 0 в противном случае.

Шаг 4. Вычисление вероятности сбоев при обработке информации в элементе объекта КИИ:

а) вычисление вероятности того, что произойдет h_{pi} реальных сбоев при обработке информации на объекте КИИ за время $t_{ПАКi}$ в i -м ПАК:

$$P_{ПАК}^{СБР}(h_{pi}) = \prod_{i=1}^l e^{-t_{ПАКi}^{СБР} P_{ПАКi}^{СБР} / \Delta t_{ПАК}} (P_{ПАКi}^{СБР})^{h_{pi}}, \quad (4)$$

где h_{pi} – число реальных сбоев в средствах обработки информации;

$t_{ПАКi}^{СБР}$ – время, за которое происходит сбой в i -м средстве обработки информации;

$P_{ПАКi}^{СБР}$ – вероятность возникновения реального сбоя в i -м средстве обработки информации;

$\Delta t_{ПАК}$ – среднее время обработки информации в средствах объекта КИИ;

l – число средств обработки информации.

б) вычисление вероятности того, что произойдет h_{di} дополнительных (искусственно организованных) сбоев при обработке информации на объекте КИИ за время $t_{ПАКi}$ в i -м ПАК:

$$P_{ПАК}^{СБД}(h_{di}) = \prod_{i=1}^l e^{-t_{ПАКi}^{СБД} P_{ПАКi}^{СБД} / \Delta t_{ПАК}} (P_{ПАКi}^{СБД})^{h_{di}}, \quad (5)$$

где h_{di} – число дополнительных сбоев в средствах обработки информации;

$P_{ПАКi}^{СБД}$ – вероятность возникновения дополнительного сбоя в i -м средстве обработки информации.

Шаг 5. Оценка вероятности успешной обработки информации в элементе объекта КИИ:

$$P_{УПАК} = \frac{1}{N_h} \sum_{i=1}^{N_h} U_{P_{УПАК}}(h_{pi}, h_{di}) \frac{\prod_{i=1}^l e^{-t_{ПАКi}^{СБР} P_{ПАКi}^{СБР} / \Delta t_{ПАК}} (P_{ПАКi}^{СБР})^{h_{pi}}}{\prod_{i=1}^l e^{-t_{ПАКi}^{СБД} P_{ПАКi}^{СБД} / \Delta t_{ПАК}} (P_{ПАКi}^{СБД})^{h_{di}}}, \quad (6)$$

где N_h – количество инструментальных оценок на стендовом полигоне с реализацией векторов сбоев h_{pi} и h_{di} ;

$U_{P_{УПАК}}(h_{pi}, h_{di})$ – индикаторная функция, принимающая значение 1, если событие соответствует показателю $P_{УПАК}$, и 0 в противном случае.

После выполнения шагов 1 – 5 методики формируются совокупность результатов оценки показателей устойчивости элементов объекта КИИ в условиях сбоев, которые будут использованы для повышения устойчивости объекта КИИ.

Табл. 1. Исходные данные для оценки вероятности успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ на базе протоколов ТСР/IPv условиях ИТВ

Наименование характеристики процессов передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ в условиях ИТВ	Значение характеристики
Среднее время передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ	$\Delta t_{СПД} = 2, \dots, 16$ сек
Число дополнительных сбоев в типовых средствах передачи данных объектов КИИ при ИТВ за 24 часа	$w_d = 1, \dots, 10$
Среднее время, за которое происходит сбой в типовых средствах передачи данных объектов КИИ	$t_{СПД}^{СБР} = 2, 4, \dots, 24$ часа

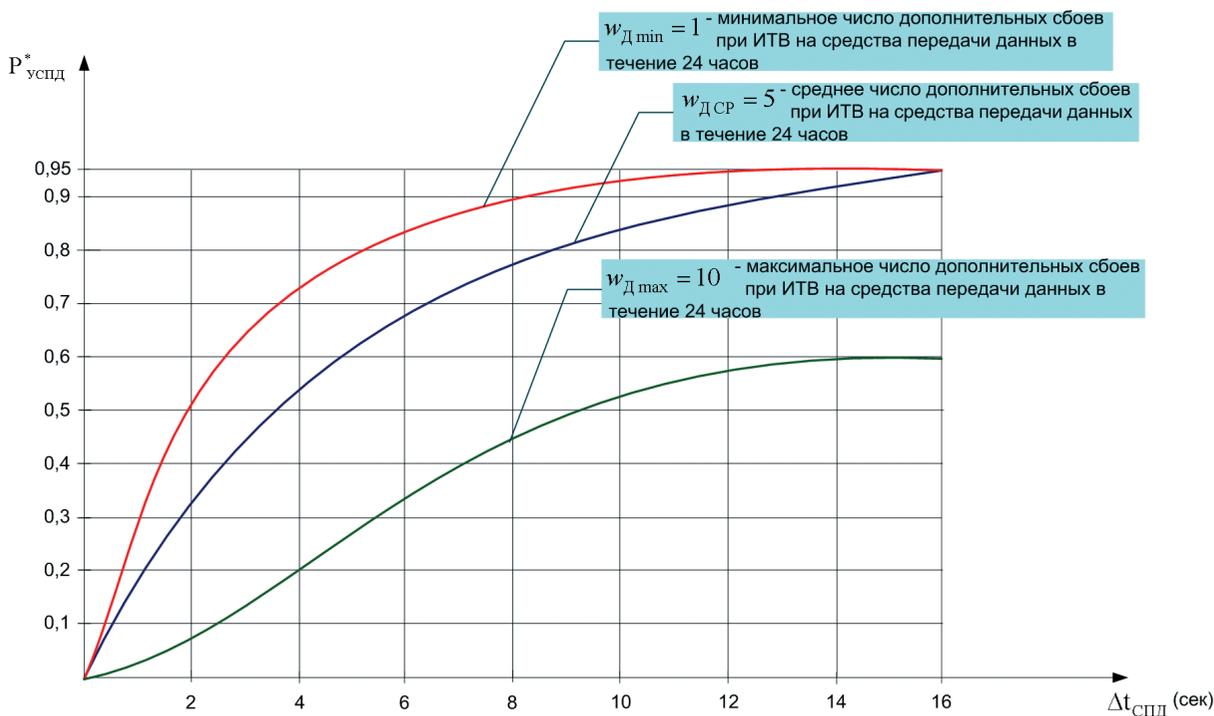


Рис. 2. Значения вероятности успешной передачи данных между элементами средств передачи данных объектов КИИ при изменении среднего времени передачи данных и числа дополнительных сбоев

В рамках исследований проведена предварительная оценка вероятности успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ на базе протоколов ТСР/IP (исходные данные приведены в табл. 1). Результаты оценки влияния сбоев, вызванных ИТВ, на устойчивость элементов типовых средств передачи данных объектов КИИ представлены на рис. 2.

Анализ значений вероятностей успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ на базе протоколов ТСР/IP в условиях ИТВ при изменении среднего времени передачи данных и числа дополнительных сбоев показывает следующее:

- вероятность успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ достигает значения 0,9 за 8 секунд при минимальном числе дополнительных сбоев при ИТВ нарушителя (1 сбой на суточном интервале работы);
- вероятность успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ принимает значение 0,8 за 10 секунд при среднем числе дополнительных сбоев при ИТВ нарушителя за счет применения средств резервирования и восстановления (5 сбоев на суточном интервале работы);
- вероятность успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ достигает лишь значения 0,6 за 16 секунд при максимальном числе дополнительных сбоев при ИТВ нарушителя даже при наличии средств ликвидации последствий компьютерных инцидентов (10 сбоев на суточном интервале работы).

В случае, когда ИТВ нарушителя своевременно обнаруживаются и нейтрализуются СЗИ на объекте КИИ, устойчивость функционирования средств передачи данных при дополнительных сбоях обеспечивается.

Вывод. Предложенная методика инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов КИИ при ИТВ нарушителя позволяет оценить значения показателей устойчивости – вероятности успешной передачи данных между элементами объекта КИИ и вероятности успешной обработки информации в элементе объекта КИИ – в условиях сбоев на основе инструментально-расчетной оценки процессов функционирования элементов системы при имитации ИТВ на стендовом полигоне.

Библиографический список

1. Антонов С.Г., Климов С.М. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий // Надежность. 2017. Том 17. № 1. С. 32-39.
2. Антонов С.Г., Гордеев С.В., Климов С.М., Рыжов Б.С. Модели угроз совместных информационно-технических и информационно-психологических воздействий в гибридных войнах // Информационные войны. 2018. № 2 (46). С. 83-87.
3. Гапанович В.А., Шубинский И.Б., Замышляев А.М. Метод оценки рисков системы из разнотипных элементов // Надежность. 2016. Том 16. № 2. С.49-53.
4. Гапанович В.А., Розенберг Е.Н., Шубинский И.Б. Некоторые положения отказобезопасности и киберза-

щищенности систем управления // Надежность. 2014. № 2. С. 88-100.

5. ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. М.: Стандаинформ, 2016. 19 с.

6. ГОСТ Р 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. М.: Стандаинформ, 2015. 7 с.

7. Климов С.М., Купин С.В., Купин Д.С. Модели вредоносных программ и отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Надежность. 2017. № 4. С. 36-43. DOI: 10.21683/1729-2640-2017-17-4

8. Климов С.М., Астрахов А.В., Сычев М.П. Методические основы противодействия компьютерным атакам: Электронное учебное издание. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 110 с.

9. Климов С.М., Астрахов А.В., Сычев М.П. Технологические основы противодействия компьютерным атакам: Электронное учебное издание. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 71 с.

10. Климов С.М., Половников А.Ю., Сергеев А.П. Модель функциональной отказоустойчивости процессов обеспечения потребителей навигационными сигналами в сложных условиях // Надежность. 2017. Том 17. № 2. С. 41-47.

11. Климов С.М., Поликарпов С.В., Федченко А.В. Методика повышения отказоустойчивости сетей спутниковой связи в условиях информационно-технических воздействий. // Надежность. 2017. Том 17. № 3. С. 32-40.

12. Климов С.М., Поликарпов С.В., Рыжов Б.С. и др. Методика обеспечения устойчивости функционирования критической информационной инфраструктур в условиях информационных воздействий // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 6 (34). С. 37-48.

13. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза / И.Б. Шу-

бинский. Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2016. 544 с.

Сведения об авторах

Антонов Сергей Григорьевич – начальник отдела 4 ЦНИИ Минобороны России, Российская Федерация, Королев, e-mail: sergey_antonov_1960@mail.ru

Анциферов Иван Игоревич – научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России, Российская Федерация, Королев, e-mail: antsiferov-ivan@mail.ru

Климов Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник управления 4 ЦНИИ Минобороны России, Российская Федерация, Королев, e-mail: klimov.serg2012@yandex.ru

Вклад авторов в статью

Антонов С.Г. Разработка схемы и описания положений методики инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов КИИ при имитации ИТВ. Проведение и анализ результатов экспериментальной оценки вероятности успешной передачи данных между элементами типовых средств передачи данных объектов КИИ.

Анциферов И.И. Формирование математической постановки задачи на разработку методики инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов КИИ при ИТВ.

Климов С.М. Проведение системного анализа исходных допущений и разработка математических выражений для вычисления вероятностей сбоя при передаче данных между элементами объекта КИИ и успешной обработки информации в элементе объекта КИИ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами

Наталья М. Кузьмина¹, Александра Н. Ридли^{2*}

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации, Российская Федерация, Москва,

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, Москва

*Alexandra.Ridley@yandex.ru



Наталья М. Кузьмина



Александра Н. Ридли

Резюме. Цель. В управлении инфраструктурными объектами возникает множество задач принятия решений, требующих оценивания альтернатив в условиях отсутствия четких критериев. Достаточно часто среди них встречаются задачи, в которых необходимо учесть разнообразное количество факторов. Данные факторы, как правило, относятся к различным областям знаний и требуют привлечения экспертов, обладающих компетенциями в данных областях. Так, например, к оценке инфраструктурных объектов могут быть привлечены экономисты, специалисты по земельному праву, экологи, специалисты по логистике, инженеры-проектировщики и другие узкопрофильные специалисты. Зачастую задачи усложняются тем, что существует большое множество альтернатив. В таких случаях достаточно сложно бывает организовать даже первичную экспертизу, целью которой будет являться уменьшение количества вариантов для дальнейшего рассмотрения. Основной целью работы является разработка модели оценивания критериев, влияющих на целесообразность модернизации инфраструктурного объекта, позволяющей учесть факторы из различных областей знаний, а также разработка методики, позволяющей упростить процесс оценки большого количества альтернативных вариантов. При этом данные оценки могут быть выражены в разных форматах: как количественно, так и качественно. Данные подходы получили применение в задаче ранжирования аэропортов с целью отбора аэропортов на статус аэропортов-кандидатов в Московский авиационный узел (МАУ). Особенностями данной задачи как раз является большой набор разнообразных факторов, которые требуется учесть, а также большое количество альтернативных вариантов – более 30 аэропортов, находящихся в радиусе 300 километров от Москвы. **Методы.** Применена модель синтеза рисков, опирающаяся на экспертные данные, характеризующие критерии, которые влияют на искомый риск, а также величины ущербов для каждого из объектов по данным критериям. Для оценки критериев использован метод, основанный на парных сравнениях, позволяющий экспертам задавать неточные и неполные оценки предпочтений сравниваемых альтернатив. Для оценки величины ущербов применен метод перевода качественных оценок в количественные, а также масштабирования количественных данных в количественную оценку ущербов. **Результаты.** В результате применения сформулированных в статье идей были определены величины вклада одиннадцати критериев, влияющих на достижение цели по разгрузке МАУ. По данным критериям были оценены частные риски для аэропортов в радиусе 300 километров от Москвы, и получены интегральные риски от модернизации каждого из аэропортов. Затем был составлен рейтинг аэропортов по величине риска от модернизации. **Заключение.** Предложенный метод обладает универсальностью и может быть применен для решения задач принятия решения в условиях неопределенности в тех областях, где требуется привлечение экспертов разного уровня подготовки и знания предмета оценки и требуется учет множества факторов в совокупности с большим разнообразием альтернатив.

Ключевые слова: синтез рисков, метод неполных парных сравнений, оценка ущербов, количественная оценка рисков.

Для цитирования: Кузьмина Н.М., Ридли А.Н. Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами // Надежность. 2020. №4. С. 42-49. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-42-49>

Поступила 24.06.2020 г. / После доработки 18.08.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение

В управлении инфраструктурными объектами достаточно часто встречаются сложные многоаспектные задачи, решение которых требует привлечения экспертов из различных областей для оценки большого количества факторов: начиная с экономических и заканчивая земельным правом или экологией. Особенно актуальными остаются на протяжении уже ряда лет задачи принятия оптимальных решений по управлению системами в условиях низкого информационного уровня их математического описания, который характеризуется, во-первых, неопределенностью в выборе целевой функции и задании ограничений, связанной с наличием большого числа разноименных и противоречивых показателей вариантов развития системы, и, во-вторых, нестандартностью ситуаций принятия решений – возможностью вычисления для каждого варианта лишь значений отдельных показателей, незнанием и труднореализуемостью ряда важных свойств целевой функции, свойств области поиска и т.д. Преодоление неопределенности в требованиях к качеству вариантов в нестандартных ситуациях базируется, как правило, на более полной и корректной формализации многоцелевой задачи принятия решений, допускающей построение регулярной алгоритмической базы (именно поэтому такие задачи, как правило, относят к разряду слабо формализованных). Для этого на семантическом уровне моделирования вводятся понятия иерархии целей, ресурса, трудности достижения цели, компенсации, функции эквивалентности ценности и др. На их основе осуществляется аксиоматическое построение интегральных показателей, описывающих свойства системы и среды ее функционирования.

Принятие решений при этом в общем виде определяется как процесс выбора наилучшей альтернативы из всех возможных вариантов, но на практике достижение оптимального результата может быть проблематичным, поскольку лица, принимающие решения (ЛПР) и эксперты часто испытывают затруднения при принятии решений. Одним из наиболее важных разделов теории принятия решений, использующихся для определения наилучшего решения из всех возможных доступных вариантов, является многокритериальное принятие решений (МКПР). Существует несколько методов, позволяющих улучшить МКПР, в том числе: метод анализа иерархий Т. Саати [1] (англ.: Analytic Hierarchy Process, АНР); метод ранжирования превосходства и неполноценности [2]; метод ранжирования Simos [3]; теория полезности с несколькими атрибутами (МАУТ) [4]; метод исключения неизвестного и выбор, соответствующий реальности (ELECTRE) [5-7]; метод организации ранжирования предпочтений и выбор по преимуществам (СВА) [8]. Эти методы, некоторые из которых рассмотрены авторами во вводной части работы, часто используются для облегчения решения проблем принятия решений в практической деятельности.

АНР Саати представляет собой наиболее популярный МКПР, который привлек значительное внимание и обрел заслуженную популярность за последние два десятилетия. АНР обеспечивает ЛПР мощным средством принятия стратегических и обоснованных решений, что позволяет ЛПР использовать несколько количественных критериев для оценки потенциальных альтернатив и последующего выбора оптимального варианта. Такое широкое использование, безусловно, связано с простотой его применения и структурой АНР, соответствующей интуитивному способу, которым ЛПР решают проблемы. Иерархическое моделирование проблемы, возможность принятия устных суждений и проверка согласованности являются основными достоинствами метода. Наряду с его традиционными приложениями развиваются и новые направления, например, заключающиеся в использовании АНР в сочетании с другими методами: методами математического программирования, такими, как линейное программирование, анализ свертки данных (DEA), нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети, SWOT-анализ и так далее. Один из существенных недостатков метода АНР – увеличение вычислительной сложности нахождения собственных значений с увеличением размерности матрицы МКПР, однако нет никаких сомнений в том, что АНР будет все чаще и чаще приниматься на вооружение.

В качестве примера его практического применения рассмотрим задачу разгрузки московского авиационного узла (МАУ), представляющего собой систему аэропортов Москвы и Московской области. В аэропортах МАУ ежегодно осуществляется порядка 800 тыс. взлетно-посадочных операций в год за счет авиаперевозок пассажиров, грузов и рейсов деловой авиации. Подавляющее большинство из них – пассажирские, по статистическим данным¹ обеспечивающие пассажиропоток более 100 млн пассажиров в год. По прогнозам к 2030 году пассажиропоток возрастет до 180 млн пассажиров в год [9], что потребует увеличения пропускной способности существующей системы. Модернизации аэропортов, входящих в МАУ, в настоящий момент, недостаточно из-за высокой нагрузки на наземные виды транспорта в Москве, что приводит к необходимости рассматривать варианты увеличения количества аэропортов.

Строительство нового аэропорта более затратно, чем модернизация существующего. Например, стоимость строительства пассажирского терминала по предварительным оценкам составляет около 30 млрд рублей, в то время, когда модернизация существующего составляет примерно 5-7 млрд руб. Так как аэропортов в окрестностях Москвы и Московской области много, в первую очередь необходимо оценить целесообразность вложений в каждый конкретный аэропорт. Инвестиции в модернизацию каждого из них несут ряд рисков, связанных с их эффективностью для разгрузки в МАУ.

¹ Источник: https://bit.ly/MOW_stat19 – статистика Росавиации (<https://favt.ru/>)

Сложность оценки альтернативных вариантов обусловлена большим количеством влияющих на принятие решения факторов и отсутствием соответствующей статистики. Вследствие этого неизбежно привлечение экспертов, имеющих квалификацию в разных областях. Такие эксперты могут высококвалифицированно оценить известную им область, но затрудняются в оценке смежных областей. Ввиду взаимозависимости и взаимовлияния факторов принятия решения, возникает задача обработки экспертных оценок, в которых отсутствуют или являются нечеткими оценки ряда факторов для сравниваемых альтернатив. Решение такой нетривиальной задачи можно получить с помощью так называемого метода синтеза рисков [10].

Рассмотрим задачу разгрузки МАУ в такой постановке.

1. Постановка задачи

Пусть K_1, K_2, \dots, K_n – перечень из n критериев, по которым необходимо оценить и ранжировать перечень A_1, A_2, \dots, A_m из m аэропортов по величине риска их модернизации для целей разгрузки МАУ.

Риск в данном случае определяется величиной возможных ущербов от реализации выбранной в результате анализа альтернативы по сравнению с идеальной ситуацией, характеризуемой отсутствием (или приемлемым минимумом для ЛПР) подобных ущербов. В данной постановке риск понимается в смысле влияния неопределенности на достижение поставленных целей¹. Неопределенность в рассматриваемой задаче обусловлена неопределенностью выбранных критериев и степени их влияния, а цель – разгрузка МАУ с минимальными издержками при реализации проекта. Бессмысленно говорить в данной постановке о частоте или вероятности реализации риска, поскольку цель анализа – выбор приемлемого с точки зрения ущерба (в случае неэффективности его эксплуатации) проекта модернизации МАУ.

Риск объекта (процесса) – это величина, пропорциональная отклонению от эталона качества объекта (процесса) [11, с. 15]. Качество объектов и риск можно измерять в сопоставимых шкалах. Мера риска – «угроза изменения состава или свойств объекта или окружающей его среды, либо появление изменений связанных с возникновением нежелательных процессов, обусловленных антропогенным или природным воздействием». При этом подчеркивается, что смысл этого определения – вероятностный.

На нижнем уровне иерархической структуры сравниваемые объекты описываются определенным набором показателей – частных показателей риска (ЧПР). Как показал анализ используемых в системных исследованиях интегральных оценок состояния сложных объектов и систем [12, 13, 14] широко используются обобщенные критерии (индексы) рисков: аддитивная (средневзвешенная арифметическая) и мультипликативная (средневзвешенная геометрическая) формы.

¹ ГОСТ Р ИСО 31000-2019 Менеджмент риска. Принципы и руководство

Вследствие сказанного, риск в рассматриваемой задаче определим как функцию двух векторов $U = (u_1, u_2, \dots, u_{n-1}, u_n)$ – вектора ущербов и $W = (w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n)$ – вектора весовых коэффициентов ущербов (по сути, это и есть экспертная оценка возможности их появления) и может быть записан следующим образом [15]:

$$R(U, W) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i)^{w_i}, \quad (1)$$

где $w_i > 0$ – ненулевые вероятности вкладов (веса), такие, что

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (2)$$

В [15] показано, что в обоих случаях интегральный критерий может быть сконструирован с помощью многократного использования бинарной ассоциативной и коммутативной операции и является целой аналитической функцией от локальных критериев. Также в [15] показано, что класс таких операций достаточно узок и существует **только три** (с точностью до постоянных параметров) бинарные операции, удовлетворяющие условиям коммутативности, ассоциативности и целой аналитичности. Они задаются тремя следующими функциями²: а) c ; б) $\Phi_1 + \Phi_2 + c$; в) $a(\Phi_1 + \Phi_2) + b\Phi_1\Phi_2 + \frac{a(a-1)}{b}$; $a, b, c - const, b \neq 0$, причем именно третью из даваемых оценок (при определенных значениях входящих в нее коэффициентов) надо использовать для получения интегрального критерия качества при наличии взаимодействия между подсистемами и критериальными ограничениями на области изменения локальных оценок.

Интегральный риск принятия варианта модификации m -го аэропорта для включения в сеть узловых аэропортов, исходя из вышесказанного, соответственно:

$$R^m = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i^m)^{w_i}. \quad (3)$$

Для малых значений U^m интегральный риск принятия решения для варианта m совпадает с принятым определением риска:

$$R^m \approx 1 - \prod_{i=1}^n (1 - w_i \times u_i^m) \approx \sum_{i=1}^n w_i \times u_i^m, \quad (4)$$

где u_i^m – величина ущерба для варианта m при использовании критерия i , w_i – вероятности влияния критериев.

Введенный риск (1), который иногда называют геометрическим антириском [16], удовлетворяет основным априорным требованиям, лежащим в основе рискового подхода к построению нелинейной интегральной оценки R_{\otimes} :

1) гладкость – непрерывная зависимость интегральной R оценки и ее производных от частных оценок: $R(r_1, \dots, r_M)$;

2) ограниченность – границы интервала изменения частных r_i и интегральной R оценок: $0 < R(r_1, \dots, r_M) < 1$ при $0 < r_1, r_2, \dots, r_M < 1$;

3) равноценность – одинаковая важность частных оценок r_i и r_j ;

² См. там же

4) иерархическая одноуровненность – агрегируются лишь частные оценки r_i , которые принадлежат одному уровню иерархической структуры;

5) нейтральность – интегральная оценка совпадает с частной оценкой, когда другая принимает минимальное значение: $R(r_1, 0) = r_1$; $R(0, r_2) = r_2$; $R(0, 0) = 0$; $R(1, 1) = 1$.

6) однородность $R(r_1 = r, \dots, r_M = r) = r$.

Геометрический антириск является оценкой сверху для средневзвешенного арифметического и средневзвешенного геометрического. Подчеркнем также, что геометрический антириск удовлетворяет теореме «о хрупкости хорошего» в теории катастроф, согласно которой «...для системы, принадлежащей особой части границы устойчивости, при малом изменении параметров более вероятно попадание в область неустойчивости, чем в область устойчивости. Это проявление общего принципа, согласно которому все хорошее (например, устойчивость) более хрупко, чем плохое» [17, с. 31-32]. В анализе рисков используется аналогичный принцип лимитирующего фактора риска.

Таким образом, любая система может считаться «хорошей», если она удовлетворяет определенному набору требований, но должна быть признана «плохой», если не выполняется хотя бы одно из них. При этом все «хорошее», например экологическая безопасность территорий, более хрупко – утратить ее легко, а восстановить трудно.

В работе [18] для содержательной интерпретации такой оценки предлагается использовать вербально-числовую шкалу Харрингтона, имеющую достаточно универсальный характер.

Для решения обсуждаемой задачи необходимо последовательно решить следующие подзадачи:

1. Выбрать критерии, влияющие на величину риска.
2. Определить вклад критериев в величину риска.
3. Сформировать перечень рассматриваемых альтернатив.
4. Определить величины частных рисков каждой альтернативы по каждому критерию.
5. Оценить интегральный риск в соответствии с выбранной моделью для каждой альтернативы и ранжировать их.

2. Экспертные данные и результаты их обработки

2.1. Критерии и оценка их вклада в интегральный риск

Для определения перечня критериев, влияющих на риск от модернизации аэропорта, был произведен опрос экспертов по методике, в общем виде изложенной в [10] и включающей два этапа:

Этап 1. Эксперты по некоторой числовой шкале из личного опыта и предпочтений оценивают величину ущерба, к которому может привести определенное значение параметра. При этом, если параметры дискретные, то эксперт оценивает каждый из них. Для непрерывных значений выбираются диапазоны принимаемых значений, для которых эксперты производят оценивание. Чем

выше значение оценки ущерба, тем, по мнению эксперта, более возможен негативный исход.

Этап 2. Осуществляется определение весов, которое можно выполнить как при помощи прямого вычисления (собираем мнения экспертов об оценках других экспертов, выставляем коэффициенты оценок и вычисляем веса), так и при вычислении весов через коэффициенты. В последнем случае веса определяются в соответствии с процедурой метода анализа иерархий через нормированный вектор при максимальном собственном значении матрицы попарных сравнений [1]. Для каждой пары сравниваемых объектов определяется коэффициент на основе всех полученных экспертных оценок. При большом разбросе мнений относительно данного коэффициента разумно отказаться от какой-либо оценки, то есть оставить ячейку неопределенной.

В результате был сформирован следующий список критериев:

1. Оптимальное удаление от центра Москвы (КОУ).
2. Пропускная способность аэропорта (КПСА).
3. Качество и количество ВПП (КВПП).
4. Аэродромная инфраструктура (КАДИ).
5. Аэропортовая инфраструктура (КАПИ).
6. Инфраструктура других видов транспорта (КИДТ).
7. Земельные ресурсы (КЗР).
8. Наличие грузового терминала (КГР).
9. Наличие международного статуса (КМС).
10. Наличие совместного базирования (КСБ).
11. Форма собственности (КФС).

Как было замечено выше, поскольку данные критерии затрагивают различные сферы деятельности, для их сравнения требуется привлечение экспертов с различным профессиональным опытом, которые могут испытывать затруднения при сравнении критериев, не относящихся к области их профессиональных интересов. В связи с этим

Табл. 1. Вероятности влияния критериев

№	Критерий	Сокращение	Влияние критерия
1	Оптимальное удаление от центра Москвы	КОУ	0,1624
2	Пропускная способность аэропорта	КПСА	0,0673
3	Качество и количество ВПП	КВПП	0,1301
4	Аэродромная инфраструктура	КАДИ	0,1390
5	Аэропортовая инфраструктура	КАПИ	0,1330
6	Земельные ресурсы	КЗР	0,1282
7	Инфраструктура других видов транспорта	КИДТ	0,1570
8	Наличие грузового терминала	КГР	0,0233
9	Наличие международного статуса	КМС	0,0201
10	Наличие совместного базирования	КСБ	0,0219
11	Форма собственности	КФС	0,0178

Табл. 2. Список рассматриваемых в задаче вариантов

№	Список аэропортов
1	Клин-5 – г. Клин, Московская обл. (МО)
2	Семязино – г. Владимир
3	Добрыньское – г. Владимир
4	Мячково – Раменский р-н, МО
5	Туношна – г. Ярославль
6	Клоково – г. Тула
7	Мигалово – г. Тверь
8	Раменское – г. Жуковский, МО
9	Иваново-южн. – г. Иваново
10	Ефремов-Восточн. – Тульская обл.
11	Чкаловский – г. Щелково, МО
12	Грабцево – г. Калуга
13	Быково – г. Москва
14	Остафьево – г. Москва
15	Протасово – г. Рязань
16	Дягилево – г. Рязань

был использован метод неполных парных сравнений [19] с оценками предпочтений по шкале Саати [1], заданными интервально. Данный метод, благодаря своей гибкости, позволяет экспертам давать точные оценки в областях, где они уверены в наибольшей мере, и при этом указывать широкий разброс оценки предпочтений в отношении тех пар альтернатив, на счет которых эксперту сложно дать однозначный ответ в силу обозначенных выше причин. Данный подход позволяет, кроме того, повысить согласованность матрицы парных сравнений за счет удаления тех оценок предпочтений, которые нарушают согласованность по причине недостаточности шкалы оценивания [20].

Полученные данным методом веса критериев приведены в табл. 1.

2.2. Оценка величины ущерба по критериям

Итак, отобрано 11 критериев для оценивания альтернатив. С учетом того, что в группу наиболее значимых критериев вошел критерий оптимального удаления от Москвы (см. табл. 1), а также в связи тем, что аэропорты за пределами 300-километровой зоны от Москвы не будут привлекательны для пассажиров [21], в рассмотрение были включены только аэропорты в этой зоне. Помимо аэропортов «Внуково», «Домодедово» и «Шереметьево» в радиусе 300 км от Москвы располагается 31 аэропорт (табл. 2). Таким образом, если пытаться оценить каждый аэропорт по каждому критерию напрямую (то есть просить эксперта указать величину риска), в связи с размерностью задачи возможно большое количество ошибок. Кроме того, было замечено, что многие из критериев могут быть

№	Список аэропортов
17	Турлатово – г. Рязань
18	Крутышки – г. Ступино, МО
19	Змеево – г. Тверь
20	Третьяково – г. Луховицы, МО
21	«Можайский» – г. Можайск, МО
22	Алферьево – г. Волоколамск, МО
23	Волосово – г. Чехов, МО
24	Монино – МО, г. Монино, МО
25	Черное – МО, г. Балашиха, МО
26	Вихрево – Сергиево-Посадский р-н, МО
27	Вагулино – г. Руза, МО
28	Северка – г. Коломна, МО
29	Коробчеево – г. Коломна, МО
30	Борки – г. Кимры Тверская обл.
31	Ермолино – г. Балабаново Калужская обл.

охарактеризованы дополнительными однозначно объективными параметрами, содержащимися в технической документации: расстояние, длина, количество. В связи с этим, реализован упрощенный процесс экспертизы, согласно которому экспертам предлагалось оценивать не величину риска для каждого конкретного аэропорта, а характеристики, которыми они обладают. Там, где эти характеристики не были определены в официальных источниках (например, насколько хороша инфраструктура), проводилась экспертиза для каждого конкретного аэропорта.

Для каждого критерия совместно с экспертами были составлены шкалы оценивания аэропортов. Например, для оценки взлетно-посадочных полос (ВПП) была предложена двумерная шкала по количеству полос и по длине наибольшей из них. При этом было определено, что по количеству есть различие для аэропортов с 1 ВПП, с 2 ВПП, а если у аэропорта 3 и более ВПП, то они относятся к одной категории. По длине, например, были выделены интервалы

Табл. 3. Оценка шкалы оценивания аэропортов по критерию КГР

Параметр	Отличное состояние ГТ	Хорошее состояние ГТ	Ограниченная деятельность ГТ	Грузовая деятельность отсутствует
Оценки, C_i	1	2	4	8
Макс ущерб, γ	0,4			
Риски, R_i	0,125	0,25	0,5	1
Ущерб, U_i	0,05	0,1	0,2	0,4

Табл. 4. Величины ущерба по шкале оценивания аэропортов по критерию КГР

Пропускная способность, тыс. пасс./год, на 2019 год	10000 и более	2000	1000	200	100	40	10 и менее
Ущерб, U_i	0,01	0,02	0,04	0,1	0,2	0,4	1

Табл. 5. Обработка экспертных оценок рассматриваемых вариантов модернизации МАУ

№	Оценки экспертов										Рассчитанные компоненты полезностей											
	КОУ	КПСА	КВВП	КАДИ	КАПИ	КЗР	КИДТ	КГР	КМС	КСБ	КФС	КОУ	КПСА	КВВП	КАДИ	КАПИ	КЗР	КИДТ	КГР	КМС	КСБ	КФС
1	0,04	0,99	0,16	0,8	0,8	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99272	0,77543	0,97412	0,81421	0,83564	0,96997	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
2	0,08	0,8	0,28	0,8	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,4	0,05	0,98520	0,91495	0,95180	0,81421	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	1,00000	0,99917
3	0,05	0,35	0,13	0,4	0,8	0,01	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99087	0,97649	0,97927	0,93684	0,83564	0,99863	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
4	0,01	0,99	0,62	0,8	0,8	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99820	0,77543	0,86458	0,81421	0,83564	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
5	0,38	0,3	0,07	0,1	0,1	0,2	0,4	0,05	0	0	0,02	0,91805	0,98049	0,98915	0,98663	0,98831	0,96997	0,92109	0,99873	1,00000	1,00000	0,99967
6	0,1	0,99	0,3	0,8	0,8	0,99	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	0,98133	0,77543	0,94777	0,81421	0,83564	0,53299	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
7	0,95	0,99	0,13	0,8	0,4	0,5	0,2	0,4	0	0	0,03	0,58517	0,77543	0,97927	0,81421	0,94460	0,90964	0,96473	0,98746	1,00000	1,00000	0,99950
8	0,01	0,01	0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	0	0	0,02	0,99820	0,99945	1,00000	0,98663	0,98831	0,96997	0,98319	0,99873	1,00000	1,00000	0,99967
9	0,37	0,38	0,13	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0	0	0,03	0,92068	0,97394	0,97927	0,98663	0,98831	0,96997	0,92109	0,99450	1,00000	1,00000	0,99950
10	0,38	0,8	0,13	0,4	0,8	0,5	0,8	0,01	0	0	0,02	0,91805	0,91495	0,97927	0,93684	0,83564	0,90964	0,77185	0,99975	1,00000	1,00000	0,99967
11	0,01	0,8	0,02	0,8	0,4	0,2	0,1	0,01	0	0	0,05	0,99820	0,91495	0,99697	0,81421	0,94460	0,96997	0,98319	0,99975	1,00000	1,00000	0,99917
12	0,055	0,4	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0	0	0,02	0,98993	0,97218	0,96700	0,93684	0,94460	0,90964	0,92109	0,98746	1,00000	1,00000	0,99967
13	0,01	0,5	0,23	0,2	0,8	0,99	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	0,99820	0,96244	0,96146	0,97190	0,83564	0,53299	0,98319	0,99740	0,99544	0,99819	0,99917
14	0,01	0,8	0,23	0,2	0,4	0,8	0,1	0,4	0	0	0,01	0,99820	0,91495	0,96146	0,97190	0,94460	0,80259	0,98319	0,98746	1,00000	1,00000	0,99984
15	0,09	0,4	0,23	0,2	0,4	0,99	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	0,98327	0,97218	0,96146	0,97190	0,94460	0,53299	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
16	0,09	0,8	0,07	0,2	0,8	0,8	0,2	0,4	0	0	0,03	0,98327	0,77543	0,80684	0,81421	0,83564	0,80259	0,77185	0,98746	1,00000	1,00000	0,99950
17	0,09	0,99	0,76	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99087	0,91495	0,96700	0,93684	0,83564	0,96997	0,96473	0,99975	1,00000	1,00000	0,99917
18	0,05	0,8	0,2	0,4	0,8	0,2	0,2	0,01	0	0	0,05	0,98520	0,77543	0,67037	0,93684	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
19	0,08	0,99	0,93	0,4	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,98805	0,77543	0,98915	0,97190	0,83564	0,90964	0,92109	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
20	0,065	0,99	0,07	0,2	0,8	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99087	0,77543	0,88978	0,81421	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
21	0,05	0,99	0,54	0,8	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,78038	0,77543	0,68397	0,81421	0,83564	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
22	0,75	0,99	0,92	0,8	0,8	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99457	0,77543	0,55325	0,93684	0,94460	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
23	0,03	0,99	0,98	0,4	0,4	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99820	0,77543	0,83438	0,81421	0,83564	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
24	0,01	0,99	0,7	0,8	0,8	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99820	0,77543	0,68397	0,93684	0,94460	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
25	0,01	0,99	0,92	0,4	0,4	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99820	0,77543	0,68397	0,93684	0,94460	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
26	0,03	0,99	0,62	0,4	0,8	0,99	0,1	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99457	0,77543	0,86458	0,93684	0,83564	0,53299	0,98319	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
27	0,04	0,99	0,95	0,4	0,4	0,99	0,2	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99272	0,77543	0,63729	0,93684	0,94460	0,53299	0,96473	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
28	0,05	0,99	0,99	0,4	0,4	0,8	0,2	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99087	0,77543	0,50029	0,93684	0,94460	0,80259	0,96473	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
29	0,05	0,99	0,76	0,8	0,4	0,99	0,2	0,4	0,2	0,1	0,05	0,99087	0,77543	0,80684	0,81421	0,94460	0,53299	0,96473	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
30	0,06	0,99	0,62	0,8	0,4	0,99	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,98899	0,77543	0,86458	0,81421	0,94460	0,53299	0,77185	0,98746	0,99544	0,99819	0,99917
31	0,05	0,02	0,07	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0	0	0,03	0,99087	0,99888	0,98915	0,98663	0,98203	0,96997	0,96473	0,99450	1,00000	1,00000	0,99950

таким образом, что в рамках одной группы разница между ВПП незначительна (на каждом таком интервале не сильно различается разнообразие воздушных судов, способных безопасно осуществлять взлет/посадку).

По данным шкалам была произведена оценка параметров C_i – коэффициентов риска для i -го значения шкалы, выражающихся любым неотрицательным числом, и γ – максимального значения ущерба (по шкале от 0 до 1) по выбранному критерию. На основании данных параметров вычисляется значение риска R_i по данной величине параметра в шкале, а также величина ущерба U_i , по следующим формулам:

$$R_i = \frac{C_i}{\max_i C_i}, \quad (5)$$

$$U_i = \gamma \times R_i. \quad (6)$$

Из формул и характеристик значений видно, что $0 \leq U_i \leq R_i \leq 1$. Так, например, рассмотрим оценки по критерию КГР (см. табл. 1), представленные в табл. 3. Данные оценки качественно характеризуют состояние грузового терминала (ГТ) аэропорта.

Так как понятия, используемые в данной шкале, относятся к оценочным (кроме последнего, точную информацию о котором можно найти), аэропорты оценивались экспертами и принималась во внимание самая популярная оценка. Однако, например, есть критерий КПСА (см. табл. 1), характеризующий пропускную способность аэропорта (количество пассажиров в год). Для данного критерия величины ущерба были оценены по шкале, представленной в табл. 4.

Очевидно, что данные параметры аэропортов в подавляющем большинстве находятся в интервале между значениями шкалы. Для таких аэропортов была использована кусочно-линейная аппроксимация. Для значения c из диапазона значений критерия $[a, b]$ и соответствующего ему диапазона рисков $[U_a, U_b]$ формула для вычисления риска имеет вид:

$$U_c = U_a + (c - a) \frac{U_b - U_a}{b - a}. \quad (7)$$

Результаты оценок, данных экспертами для каждого рассматриваемого варианта, и рассчитанные компоненты полезностей для всех выбранных ранее критериев приведены в табл. 5.

3. Ранжирование аэропортов по значению интегрального риска

Вычисление интегрального риска выполнено по формуле (1) с использованием данных, полученных согласно сформулированным выше принципам (см. табл. 5). В результате сформирован список из альтернативных аэропортов, первые десять из которых приведены в табл. 6. Следующие за ними в рейтинге аэропорты имеют значение риска выше 0,5 и не рассматриваются вследствие неприемлемости такого значения риска их модернизации.

Как видно из табл. 6, минимальный риск у проектов под номерами 1, 2, 3 и 4. Эти варианты следует рассматривать как предпочтительные при окончательном принятии решения об инвестировании в модернизацию МАУ.

Заключение

Очевидно, что представленный алгоритм решения задачи синтеза рисков для ранжирования инфраструктурных объектов нельзя рекомендовать как единственный и безальтернативный при принятии решения об инвестировании средств в тот или иной проект. Однако подобные алгоритмы позволяют существенным образом сократить количество сравниваемых вариантов и дают ЛПР возможность детального рассмотрения оставшихся вариантов для выделения среди них наилучшего.

Описанный подход к синтезу рисков может быть востребован в различных областях как для крупных компаний, например, в оценке привлекательности инвестиционных проектов, строительстве инфраструктурных объектов, так и для малого бизнеса, например, в оценке риска аренды складских помещений или нового клиентского офиса. Последние задачи интересны тем, что на рынке недвижимости очень много объектов, описания которых содержатся на различных сайтах-агрегаторах. Ручная аналитическая обработка данных по таким объектам невозможна, поскольку часто приводит к ограниченному выбору вариантов наиболее близких (по мнению экспертов) к предпочтениям ЛПР, и оставляет за границами рассмотрения большое количество ни в чем не уступающих выбранным альтернатив. Предложенный алгоритм синтеза рисков упрощает задачу ЛПР и позволя-

Табл. 6. Рейтинг аэропортов по величине интегрального риска от их модернизации

№	Аэропорт	Населенный пункт	Регион	Интегральный риск
1	Раменское	г. Жуковский	Московская область	0,0747
2	Ермолино	г. Балабаново	Калужская область	0,1173
3	Туношна	г. Ярославль	Ярославская область	0,2293
4	Южный	г. Иваново	Ивановская область	0,2380
5	Грабцево	г. Калуга	Калужская область	0,3105
6	Чкаловский	г. Щелково	Московская область	0,3627
7	Добрыньское	г. Владимир	Владимирская область	0,3777
8	Остафьево	г. Москва	Москва	0,3799
9	Крутышки	г. Ступино	Московская область	0,3907
10	Дягилево	г. Рязань	Рязанская область	0,4684

ет легко автоматизировать процесс многокритериального выбора из большого количества альтернатив.

Благодарности

Выражаем благодарность Сивене Дмитрию Сергеевичу, заместителю начальника Управления экономики и программ развития Федерального агентства воздушного транспорта, и Пашетных Александре Викторовне, советнику отдела формирования и отчетности ФЦП Управления экономики и программ развития Федерального агентства воздушного транспорта, за содействие в организации сбора и систематизации данных, использованных в исследовании.

Библиографический список

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
2. Tam C.M., Tong Thomas K.L., Wong Y.W. Selection of concrete pump using the superiority and inferiority ranking method // *Journal of construction engineering and management*. 2004. Volume 130, Issue 6. P. 827-834.
3. Mohamed Marzouk, Omar Amer, Moheeb El-Said. Feasibility study of industrial projects using Simos' procedure // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2013. Vol. 19:1. P. 59-68. DOI: 10.3846/13923730.2012.734855
4. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 400 с.
5. Roy B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
6. Roy B., Bouyssou D. *Aide Multicritere a la Decision: Methodes et Cas*. Paris: Economica, 1993.
7. Vincke P. *Multicriteria Decision Aid*. Chichester: Wiley, 1992.
8. Greco S., Matarazzo B., Slowinski R. Rough sets methodology for sorting problems in presence of multiple attributes and criteria. // *European Journal of Operational Research*. 2002. Vol.138. № 2. P. 247-259.
9. Аракелян К.М. Модель развития московского авиационного узла // *Наука и транспорт. Гражданская авиация*. 2013. № 3(7). С. 46-49. URL: http://www.rostransport.com/science_transport/pdf/7/46-49.pdf.
10. Ридли А.Н. Методика синтеза рисков в управлении системами // «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. М.: МАИ, 2019. 1345 с. URL: https://gagarin.mai.ru/files/2019/Abstracts_2019.pdf. С. 713-714.
11. Карлин Л.Н., Музалевский А.А. Рискологические исследования в РГГМУ // *Безопасность жизнедеятельности*. 2011. № 2. С. 5-19.
12. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // *Общество. Среда. Развитие*. 2009. № 4. С. 146-165.
13. Потапов А.И., Воробьев В.Н., Карлин Л.Н. и др. Мониторинг, контроль, управление качеством окружающей среды: науч. и учеб.-метод. справ. пособие: В 3 ч. Ч. 3. Оценка и управление качеством окружающей среды. СПб.: РГГМУ, 2005. 598 с.
14. Шитиков В.Г., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. М.: Наука, 2005. 281 с.
15. Артоболевский И.И., Руссман И.Б., Сергеев В.И. и др. О некоторых способах выбора интегрального критерия качества в задачах оптимального проектирования машин // *Изв. АН СССР. Машиноведение*. 1978. № 2. С. 3-10.
16. Каплинский А.И., Руссман И.Б., Умывакин В.М. Алгоритмизация и моделирование слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 168 с.
17. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.
18. Зибров Г.В., Умывакин В.М., Матвиец Д.А. Геоэкологическая квалиметрия природно-хозяйственных территориальных систем // *Экологические системы и приборы*. 2011. № 5. С. 3-9.
19. Бочков А.В., Жигирев Н.Н., Ридли А.Н. Метод восстановления вектора приоритетов альтернатив в условиях неопределенности или неполноты экспертных оценок. *Надежность*. 2017. Т. 17. № 3 (62). С. 41-48.
20. Xu Z.S. Goal programming models for obtaining the priority vector of incomplete fuzzy preference relation // *International Journal of Approximate Reasoning*. 2004. Vol. 36:3. P. 261-270.
21. Бородулина С., Соколов В., Окунева А. Логистика прогнозирования пассажиропотока на воздушном транспорте с учетом влияния региональных факторов // *Логистика*. 2015. № 4(101). С. 34-39. URL: http://www.logistika-prim.ru/sites/default/files/s02_log_0415.pdf.

Сведения об авторах

Кузьмина Наталия Михайловна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Организация перевозок на воздушном транспорте», Московский государственный технический университет гражданской авиации, Российская Федерация, Москва, e-mail: n.kuzmina@mstuca.aero

Ридли Александра Николаевна — аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, Москва, e-mail: Alexandra.Ridley@yandex.ru

Вклад авторов в статью

Автором **Кузьминой Н.М.** осуществлена поддержка организации сбора экспертных данных, подбор и верификация статистических данных и характеристик аэропортов, предоставлены сведения и подобраны источники по тематике гражданской авиации.

Автором **Ридли А.Н.** была применена описанная модель синтеза рисков для решения поставленной задачи, представлены идеи работы с полученными данными, сформулированы результаты исследования и возможные применения использованных в нем идей, моделей и методов для решения схожих задач.

Конфликт интересов

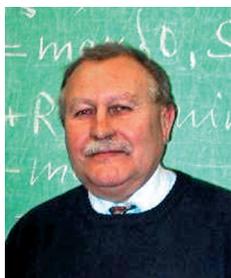
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов

Александр В. Крянев¹, Сергей С. Семенов^{2*}, Алла Э. Калдаева¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Российская Федерация, Москва, ²АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Российская Федерация, Москва

*gnppregion@sovintel.ru



Александр В.
Крянев



Сергей С.
Семенов



Алла Э. Калдаева

Резюме. Цель. Целью настоящей работы является разработка схемы оценки показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов (БЛА). **Методы.** При разработке схемы оценки показателей приоритета БЛА использован математический аппарат метрического анализа и известные экспертные оценки показателей для части БЛА. **Результаты.** Разработана схема оценки показателей приоритета БЛА. **Выводы.** Предложенная схема оценки приоритетности БЛА может быть использована при выборе рациональных решений при создании (покупке) БЛА.

Ключевые слова: выбор образца беспилотного летательного аппарата, оценка приоритетности, комплекс беспилотных летательных аппаратов, разведывательно-ударные беспилотные летательные аппараты, ударные беспилотные летательные аппараты, оценочные показатели, метрический анализ, экспертная оценка

Для цитирования: Крянев А.В., Семенов С.С. Калдаева А.Э. Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов // Надежность. 2020. №4. С. 50-60. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-50-60>

Поступила 22.07.2020 г. / После доработки 25.09.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение

Задача выбора очень важна как при покупке какой-либо продукции, так и при ее создании, особенно для сложных технических систем (СТС) и, прежде всего, для систем военного назначения.

Проектирование авиационной техники и оружия в настоящее время осуществляется на основе системного подхода с широким привлечением математического и полунатурного моделирования с последующим проведением наземных и натурных испытаний [1]. Это, в частности, было продемонстрировано в докладах на юбилейной Всероссийской научно-технической конференции «Авиационные системы в XXI веке» 26-27 мая 2016 года, организованной ГНЦ ФГУП «ГосНИИАС». На конференции было представлено ряд докладов, в частности, по проектированию беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и ракетного вооружения. В одном из них сообщалось, что для исследования влияния проектных параметров на облик БЛА была разработана модельная система синтеза конструктивных характеристик, которая включает в себя основные расчеты по летно-техническим и экономическим характеристикам, что позволяет провести сравнительный анализ БЛА разных типов, обеспечивая наглядное отображение полученных характеристик и оценок. Таким образом, предпринята попытка проанализировать влияние новых и перспективных технологий на облик БЛА [2]. В другом докладе был рассмотрен подход к формированию облика системы и технических обликов беспилотных авиационных комплексов, обеспечивающих выполнение разведывательных и ударных задач. Предложена методика исследований, разработана структурная схема модельного аппарата, сформирована и обоснована система критериев эффективности функционирования рассматриваемой системы [3].

Известен широкий круг научно-технической литературы, посвященный как проектированию, так и выбору наилучших технических решений при создании сложных систем, основанный в том числе на оценке качества и технического уровня (ТУ). Библиографическое описание источников представлено в монографиях [4, 5]. О том, насколько актуален вопрос научно обоснованного выбора при разработке новой техники, в настоящее время свидетельствует публикация ряда монографий, посвященных методологии создания авиационной техники [6 – 9]. На практике при выборе авиационных комплексов и систем оружия широко используется принцип сопоставительного анализа, при котором сравнение объектов одинакового назначения производится с помощью критериев сравнения совершенства объектов по функциональному, техническому и экономическому признакам [8, 10]. Так, в статье [10] представлен пример выбора лучшего морского ракетного комплекса на основе сравнения характеристик, приведенных в едином формате данных, с учетом стоимости каждого элемента комплекса и его жизненного цикла в целом. По мнению авторов, в условиях дефицита времени

реализация такого подхода позволяет оптимизировать выбор ракетного комплекса и сэкономить значительные финансовые средства. Насколько сложен процесс принятия решения Индией о закупке самолета при выборе между «Рафаль» или «Тайфун», можно судить по материалам, приведенным в статье [11], при этом принимались во внимание такие показатели, как эффективность боевого применения по наземным целям и в воздушном бою, эксплуатационные свойства, степень совершенства радиоэлектронного оборудования, цена самолета, время реализации проекта. В результате Индией был выбран многоцелевой истребитель 4-го поколения «Рафаль» (Передача Индии первого истребителя «Рафаль». Экспресс-информация. 2020. №13. С. 2 (Авиационные системы). К числу эффективных мер по выбору СТС можно отнести его натурные испытания.

Необходимо также отметить, что современный этап развития авиационного вооружения характеризуется значительным увеличением объема задач, ставящихся перед ударным авиационным комплексом, и повышением требований к тактико-техническим характеристикам модернизируемых и разрабатываемых систем высокоточного оружия в условиях значительных бюджетных ограничений. В данных условиях в целях сокращения сроков разработки и принятия оптимального решения по выбору вариантов систем вооружения становится актуальной задача создания автоматизированных систем поддержки принятия решений. Причем под решениями предлагается понимать человеко-машинную систему, позволяющую специалистам использовать как объективные, так и субъективные данные для анализа и решения задач, в том числе плохо формализуемых. Например, были предложены методики по выбору рационального типажа авиационных боевых комплексов и рациональных вариантов авиационного вооружения на основе моделирования и оценки боевой эффективности и теории принятия решений [12-15]. В статье [16] предложен метод выбора рационального типа основных элементов разрабатываемых изделий вооружения и военной техники, основанный на применении экспертных процедур оценки и сравнения многокритериальных альтернатив в условиях неопределенности, предусмотренных методами анализа иерархий и теории принятия решений. К числу работ, посвященных проблеме выбора лучших технических решений, оценке качества и ТУ образцов вооружения и военной техники, в том числе с привлечением экспертов, следует отнести также работы [5, 6, 17].

Начальные этапы проектирования являются определяющими при формировании технического облика вновь создаваемой продукции и влияющими на уровень научно-технического задела. Проведенные системные исследования по определению характера развития СТС и оценке их качества и ТУ выявили общую закономерность в соотношении оценки влияния принятия решений и стоимости произведенных затрат на различных этапах жизненного цикла СТС, независимо от области научно-технической деятельности. Для авиационных

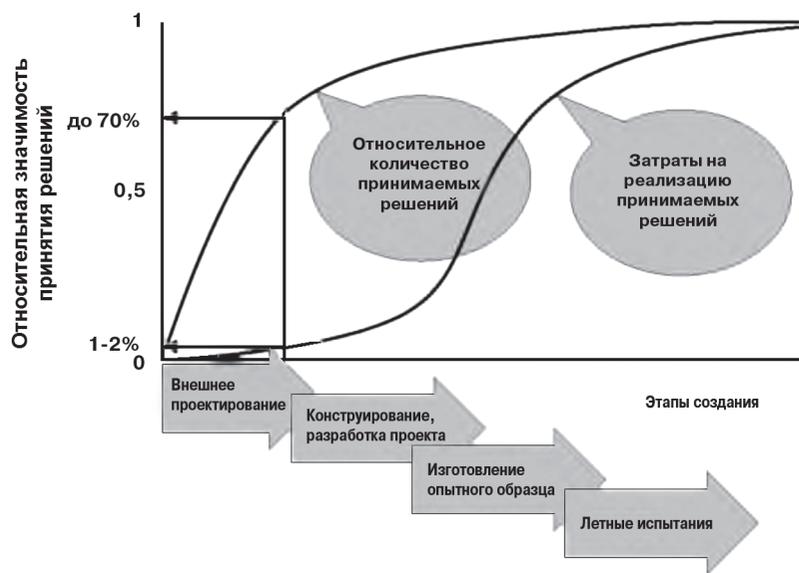


Рис. 1. Значимость принимаемых решений при создании авиационной техники

комплексов [18] значимость принятия концептуальных решений составляет до 70% от их общего числа, при этом затраты находятся на уровне 2% от общих затрат по созданию комплекса (рис. 1). На рис. 1 относительная значимость принятия решений определяется как относительное количество принимаемых решений.

Затраты на исправление выявленных ошибок многократно возрастают при отработке изделия и на последней стадии жизненного цикла проекта по сравнению со стоимостью таких изменений на самых ранних стадиях его разработки [19] (рис. 2).

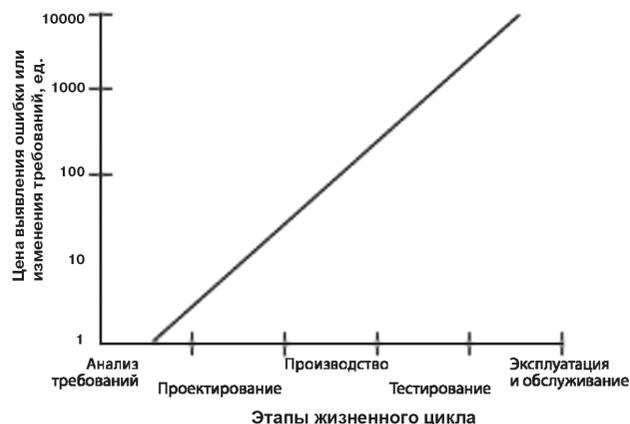


Рис. 2. Относительная стоимость исправления ошибок

Вот почему начальные стадии проектирования образца СТС, в том числе БЛА, следует считать основополагающими при формировании технического облика образца, а собственно процесс выбора рационального технического решения – концептуальным.

В данной работе предложена схема оценки показателей приоритета БЛА, основанная на использовании методов метрического анализа, применительно к боевым БЛА разведывательно-ударного и ударного назначения с взлетной массой от 300 до 25 000 кг и более, как к одному из перспективных направлений развития беспилотной техники. Использование методов метрического анализа для решения многих прикладных многомерных и многокритериальных задач показало его высокую эффективность [20–22]. В качестве основного признака классификации БЛА (планер, двигатель, системы навигации и управления и др.) в статье рассматривается взлетная масса (представлена в работах [23–26]), в которой отражается уровень конструктивных и схемно-технических решений. Именно масса БЛА определяет их энергетические характеристики, грузоподъемность и стоимость затрат на создание. Пример такой классификации для БЛА массой более 100 кг представлен в табл. 1 [23].

Общий вид некоторых образцов разведывательно-ударных и ударного БЛА представлен на рис. 3–6. Техническое совершенство БЛА проявляется в новизне и улучшении функциональных характеристик за счет внедрения достижений научно-технического прогресса. Уровень технического совершенства – это свойство образца, отражающее полноту использования в его составе лучших мировых технических достижений. Основываясь на анализе основных функций и состояний, присущих летательным аппаратам на различных стадиях жизненного цикла, в работе [27] предложено определять техническое совершенство по четырем комплексным показателям, характеризующих конструктивное, эксплуатационное, производственно-технологическое и функциональное совершенство. При этом под ТУ (как критерием технического совершенства) будем понимать совокупность свойств изделия, отражающих его техническое совершенство в сравнении с базовым образцом (аналогом). Оценка ТУ БЛА особенно очень важна как при формировании концепции, так и на ранних стадиях его создания. Чтобы

Табл. 1. Классификация БЛА, принятая в вооруженных силах США

Категория	Максимальная взлетная масса, кг	Максимальная высота (потолок), м	Продолжительность полета, ч
Средние	100 – 1500	3000 – 8000	2 – 24
Средневысотные с большой продолжительностью полета (MALE)	1500 – 2500	3000 – 8000	12 – 24
Высотные с большой продолжительностью полета (HALE)	2500 – 5000	5000 – 20 000	12 – 24
Ударные/боевые	–	8000 – 12 000	–

новое поколение БЛА было совершеннее существующего, необходимо обеспечить более высокий ТУ.

В данной статье для определения значимости анализируемого БЛА относительно других БЛА (что равносильно оценке ТУ), по которым уже заранее известна оценка их уровня, введено понятие «приоритетности» БЛА.

Предложенный методический подход к оценке приоритетности БЛА может быть использован при выборе рациональных решений при создании (покупке) БЛА.

Для оценки приоритетности БЛА приняты следующие оценочные показатели: взлетная масса БЛА, масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета.



Рис. 3. Беспилотный летательный аппарат «Херон ТР» (Израиль)



Рис. 4. Беспилотный летательный аппарат «Клауд Шэдоу» (Китай)



Рис. 5. Европейский беспилотный летательный аппарат «Мантисс» (Великобритания)

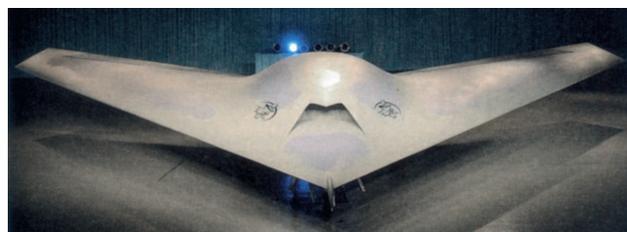


Рис. 6. Многоцелевой ударный беспилотный летательный аппарат «Фантом Рэй» (США)

1. Некоторые положения метрического анализа, используемые при оценке приоритета беспилотных летательных аппаратов

В настоящей работе для оценки БЛА, для которых отсутствует экспертная оценка, используется схема интерполяции, основанная на метрическом анализе. Задачи анализа и обработки данных приобрели особую актуальность с развитием компьютерных технологий. Метрический анализ позволяет эффективно решать различные задачи для функций многих переменных без фиксации априори вида функциональной зависимости от переменных, а используя лишь информацию, имеющуюся в реализованных значениях функции Y_1, \dots, Y_n , в точках X_1, \dots, X_n [20-22].

1.1. Интерполяция функций одной и многих переменных с помощью метрического анализа

Интерполяция в вычислительной математике – способ нахождения промежуточных значений функции по имеющемуся набору известных значений функции в конечном числе точек – значений аргументов функции.

Рассматривается задача, связанная с функциональной зависимостью

$$Y = F(X_1, \dots, X_m) = F(X) \quad (1)$$

где функция $F(X)$ неизвестна и подлежит восстановлению либо в одной точке X^* , либо в совокупности заданных точек на основе известных значений функции Y_k , $k = 1, \dots, n$, в фиксированных точках $X_k = (X_{k1}, \dots, X_{km})^T$. Точки X принадлежат единичному m -мерному кубу $K \in E^m$ пространства E^m .

В пространстве E^m выбрана метрика, порожденная нормой:

$$\|X\|^2 = \sum_{j=1}^m w_j * X_j^2, \quad (2)$$

где метрические веса $w_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^m w_j = m$.

Метрические веса w_1, \dots, w_m – величины, учитывающие характер изменения исследуемой функции при изменении ее аргументов. Они вычисляются с учетом взаимного расположения узлов интерполяции и значений функции в них. Существенной частью предлагаемого метрического анализа является не априорное задание весов, определяющих норму, а выбор весов $w_j, j = 1, \dots, m$, по совокупности известных данных $Y_k, X_k, k = 1, \dots, n$.

Для определения метрических весов разработано несколько схем [20 – 22].

Необходимо восстановить значение функции в точке X^* .

Для решения этой задачи составляется матрица метрической неопределенности W для точки X^* относительно совокупности точек X_1, \dots, X_n . Матрица метрической неопределенности – матрица размерности $(n \times n)$, определяемая положением узлов интерполяции X_1, \dots, X_n , значением X^* и метрическими весами w_1, \dots, w_m :

$$W = \begin{pmatrix} p^2(X_1, X_1)_w & (X_1, X_2)_w & \dots & (X_1, X_n)_w \\ (X_2, X_1)_w & p^2(X_2, X_2)_w & \dots & (X_2, X_n)_w \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (X_n, X_1)_w & (X_n, X_2)_w & \dots & p^2(X_n, X_n)_w \end{pmatrix} \quad (3)$$

где

$$p^2(X_i, X_i)_w = \sum_{k=1}^m w_k (X_{ik} - X_k^*)^2, \quad (4)$$

$$(X_i, X_j)_w = \sum_{k=1}^m w_k (X_{ik} - X_k^*)(X_{jk} - X_k^*), \quad i, j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Искомое значение $Y(X^*)=Y^*$ определяется равенством:

$$Y^* = \frac{(w^{-1} Y, \mathbf{1})}{(w^{-1} \mathbf{1}, \mathbf{1})} \quad (6)$$

где $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$, $Y = (Y_1, \dots, Y_n)^T$.

1.2. Определение метрических весов методом последовательного исключения аргументов

Если положить метрические веса w_1, \dots, w_m равными единице, то есть $w_i=1, i = \overline{1, m}$, то матрица метрической неопределенности будет учитывать только геометрическое расположение узлов интерполяции в исходном геометрическом пространстве. Однако с помощью соответствующего подбора значений метрических весов можно учитывать разный уровень изменения функции при изменении различных аргументов функции. В настоящей работе использовалась схема нахождения метрических весов, основанная на сравнении восстановленных значений функции в точках, в которых заданы значения функции с последовательным исключением каждого аргумента в отдельности [20].

2. Оценка приоритетности разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов методом метрического анализа

Имеются данные по основным показателям БЛА (взлетная масса БЛА, масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета (практический потолок)).

Эксперты разделили эти аппараты на несколько категорий (в зависимости от взлетной массы БЛА): первая – до 1650 кг; вторая – свыше 1650 кг и до 5000 кг; третья – свыше 5000 и до 10 000 кг; четвертая – свыше 10000 кг. В каждой категории эксперты смогли дать оценки показателю приоритетности в 100 балльной шкале некоторому количеству БЛА (см. табл. 2 – 5) с учетом оставшихся пяти показателей – масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета.

Требуется, используя данные экспертами значения показателя приоритета для некоторых БЛА, определить неизвестные значения этого показателя для других БЛА.

Эта задача решается с помощью схемы, представленной выше в пунктах 1.1 и 1.2, в которой в качестве функции выступает показатель приоритета, а в качестве аргументов – указанные выше пять показателей БЛА.

Алгоритм решения задачи подсчитывает показатель приоритетности по формуле (6), где Y^* – показатель приоритетности рассматриваемого БЛА, $X_k^*, k = 1, \dots, 5$ – пять вышеуказанных показателей этого БЛА.

Результаты оценок значений показателя приоритетности для всех БЛА представлены в последнем столбце табл. 6.

Табл. 2. Экспертные оценки приоритетности БЛА первой категории.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию, $M_{взл}$, кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
1100	0,32	36	4000	120	9100	100
1200	0,17	20	350	120	7000	65
1250	0,12	40	2500	800	6900	70
1300	0,46	25	1200	220	7000	80

Табл. 3. Экспертные оценки приоритетности БЛА второй категории.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию, $M_{взл}$, кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
3300	0.36	40	2000	220	7000	50
4000	0.10	12	1300	700	2000	20
4760	0.5	28	5900	425	15240	100

Табл. 4. Экспертные оценки приоритетности БЛА третьей категории.

Взлетная масса, БЛА упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$, кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
5300	0.40	40	3700	300	13700	100
5600	0.13	30	7000	330	9000	50

Табл. 5. Экспертные оценки приоритетности БЛА четвертой категории.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$, кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
16556	0.12	2	2400	988	12200	20
65000	0.37	30	7500	800	13000	100

Табл. 6. Основные летно-технические характеристики БЛА, связанные с взлетной массой.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$, кг	Масса полезной нагрузки / Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка показателя приоритета
1	2	3	4	5	6	7
300	70 / 0,23	8	290	150	5000	43,31
450	150 / 0,33	20	200	130	6000	68,24
450	140/0,31	24	250	170	5500	69,47
640	220 / 0,34	30	3700	210	7500	86,21
650	55 / 0,08	24	150	220	7000	49,64
727	90 / 0,12	12	260	148	4500	35,84
1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	63,97
1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	77,88
1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	59,93
1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	100,00
1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	91,88
1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	65,00
1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	67,79
1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	70,00
1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	77,29
1300	400 / 0,30	30	6000	240	9000	87,47
1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	80,00
1450	350 / 0,24	10	1300	480	7000	48,99
1450	300 / 0,20	22	260	287	7900	60,82
1451	489 / 0,34	30	800	250	9000	86,52
1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	82,47
1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	85,81
1600	200 / 0,12	24	180	200	9000	58,17
1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	86,96
1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	69,77
2400	350 / 0,14	24	250	280	10600	63,05
2678	454 / 0,16	12	2800	720	12200	54,24
2800	400 / 0,14	35	6000	850	8000	69,73
2800	340/0,12	24	1000	600	8200	53,87
3000	400 / 0,13	6	2000	550	14000	49,74
3000	300 / 0,10	22	260	287	7900	50,96

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$, кг	Масса полезной нагрузки / Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка показателя приоритета
3000	100 / 0,03	32	800	2200	6500	36,36
3200	1000 / 0,31	45	250	240	7000	94,93
3250	300 / 0,09	35	200	600	6000	57,12
3300	1200 / 0,36	40	2000	220	7000	50,00
3500	600/0,14	20	250	400	600	35,78
4000	400 / 0,10	12	1300	700	2000	20,00
4200	480 / 0,11	32	2000	370	9000	66,13
4500	1360 / 0,30	24	400	390	14000	85,46
4760	1700 / 0,5	28	5900	425	15240	100,00
4760	1800/0,38	32	1852	313	15240	94,98
4763	1746 / 0,36	30	5900	425	15240	93,33
4800	1589 / 0,33	20	6000	647	18000	96,04
5000	480 / 0,09	12	2500	400	7400	39,32
5000	480 / 0,09	15	260	253	5100	36,52
5000	480 / 0,09	50	260	213	9100	83,10
5300	1800 / 0,40	40	3700	300	13700	100,00
5450	1000 / 0,18	3	1200	920	10700	40,25
5600	700/0,13	30	7000	330	9000	50,00
6000	600 / 0,10	25	3000	400	12200	65,44
6000	800/0,13	14	500	850	12000	49,87
6146	500 / 0,08	16	8149	592	13700	60,08
7000	800 / 0,11	20	2500	555	15240	65,84
7500	2000 / 0,26	48	1000	250	12000	95,02
8000	950/0,12	26	1000	950	12000	61,47
8255	2948 / 0,35	18	1600	650	15240	85,71
9000	1000 / 0,11	30	1600	370	16700	80,50
10000	2000 / 0,20	28	4000	960	15000	80,89
13000	2000 / 0,15	34	3000	730	13000	79,09
16556	907 / 0,05	12	2800	850	12200	42,55
16556	2040 / 0,12	7	2200	850	12200	43,41
16556	2000 / 0,12	2	2400	988	12200	20,00
20190	2040 / 0,12	12	2960	850	12200	49,38
22000	6010 / 0,27	16	7000	900	1200	47,85
25000	4000 / 0,16	15	6000	1500	15000	60,22
65000	24000 / 0,37	30	7500	800	13000	100,00

3. Объединение оценок нескольких экспертов

На практике нередкими являются ситуации, когда разные эксперты дают разную оценку какой-либо величины. Задача оценки приоритета БЛА не является исключением. В данном разделе статьи предложены четыре схемы объединения оценок различных экспертов. Ниже эти четыре схемы объединения оценок приоритетности приведены на примере первой категории БЛА: от 1000 до 1650 кг.

Схема № 1. В схеме № 1 по оценке каждого эксперта по отдельности оцениваются остальные БЛА, затем полученные оценки усредняются (табл. 7). Жирным шрифтом указаны БЛА, для которых эксперты дали

оценки; обычным шрифтом отмечены оценки, полученные методом метрического анализа.

Исходные показатели БЛА, представленные в табл. 6, были нормированы относительно математического ожидания и дисперсии:

$$\hat{X}_i = \frac{X_i - \mu}{\sqrt{\sigma^2}}.$$

Схема № 2. Согласно второй схеме объединения изначально для каждого оцененного БЛА оценки экспертов усредняются (берется среднее арифметическое оценок) для БЛА (табл. 8):

$$- \text{№ 10: средняя оценка } \frac{100+95+90}{3} = 95;$$

Табл. 7. Оценка показателя приоритета БЛА по схеме № 1 (усредненная оценка).

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$, кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{пр}$, ч	Дальность полета $D_{пр}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{пр}$, м	Оценки показателей приоритета (оценки экспертов выделены жирным шрифтом)			Оценка показателя приоритета
							1	2	3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1000	0,20	24	750	250	8000	43,31	39,51	39,04	40,62
2	1020	0,34	24	1100	148	7620	68,24	68,73	69,99	68,99
3	1040	0,2	20	740	130	7600	69,47	70,47	68,09	69,34
4	1100	0,32	36	4000	120	9100	86,21	84,59	85,29	85,36
5	1100	0,32	36	600	110	9000	49,64	48,24	45,83	47,90
6	1200	0,17	20	350	120	7000	35,84	33,77	34,66	34,76
7	1200	0,25	24	300	200	7500	63,97	62,65	63,54	63,39
8	1250	0,12	40	2500	800	6900	77,88	76,57	76,31	76,92
9	1260	0,27	30	2000	180	7200	59,93	57,71	59,94	59,19
10	1300	0,30	30	6000	240	9000	100,00	95,00	90,00	95,00
11	1300	0,46	25	1200	220	7000	91,88	97,91	95,44	95,08
12	1450	0,24	10	1300	480	7000	65,00	63,00	60,00	62,67
13	1450	0,20	22	260	287	7900	67,79	69,54	67,21	68,18
14	1451	0,34	30	800	250	9000	70,00	72,00	75,00	72,33
15	1500	0,27	35	2000	280	7500	77,29	78,58	75,31	77,06
16	1500	0,25	40	800	200	7500	87,47	85,10	86,36	86,31
17	1600	0,12	24	180	200	9000	80,00	84,00	85,00	83,00
18	1633	0,29	36	400	280	8840	48,99	46,01	45,17	46,72
19	1650	0,27	24	260	268	7800	60,82	62,93	60,86	61,54

– № 12: средняя оценка $\frac{65 + 63 + 60}{3} = 62,67$;

– № 14: средняя оценка $\frac{70 + 72 + 75}{3} = 72,33$;

– № 17: средняя оценка $\frac{80 + 84 + 85}{3} = 83$.

А затем используется схема метрического анализа.

Схема № 3. Обычно оценки разных экспертов имеют разный вес в зависимости от опыта эксперта [4]. Следовательно, необходимо это учитывать для получения более точной итоговой оценки методом метрического анализа

$$K = \sum_{i=1}^n W_i * K_i, i = 1, \dots, n,$$

где $\sum_{i=1}^n W_i = 1$, K_i – оценка показателя приоритета i -го эксперта.

Пусть вес 1-го эксперта равен 0,5; вес 2-го эксперта равен 0,3; вес 3-го эксперта равен 0,2, тогда оценка приоритетности для БЛА будет иметь вид (табл. 8):

– № 10: $K_{10} = 0,5 \cdot 100 + 0,3 \cdot 95 + 0,2 \cdot 90 = 96,5$;

– № 12: $K_{12} = 0,5 \cdot 65 + 0,3 \cdot 63 + 0,2 \cdot 60 = 63,4$;

– № 14: $K_{14} = 0,5 \cdot 70 + 0,3 \cdot 72 + 0,2 \cdot 75 = 71,6$;

– № 17: $K_{17} = 0,5 \cdot 80 + 0,3 \cdot 84 + 0,2 \cdot 85 = 82,2$.

Результаты оценки БЛА по схеме № 3 приведены в табл. 9.

Схема № 4. В случае если веса W_i экспертов неизвестны, мы можем их найти, используя исходные оценки экспертов [20]:

$$W_i = \frac{1/\Delta_i^2}{\sum_{k=1}^n 1/\Delta_k^2},$$

$$\bar{K}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{ij}, j = 1, \dots, m,$$

$$\Delta_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (K_{ij} - \bar{K}_j)^2,$$

где m – число оцениваемых БЛА, n – количество экспертов, K_{ij} – оценка показателя приоритета j -го БЛА на основе оценки i -го эксперта.

В результате выполнения расчетов были получены следующие значения веса каждого из трех экспертов: $w_1 = 0,50$; $w_2 = 0,02$; $w_3 = 0,48$.

Тогда получаем оценку приоритетности для четырех БЛА, оцененных экспертами:

– № 10: $K_{10} = 0,5 \cdot 100 + 0,02 \cdot 95 + 0,48 \cdot 90 = 95,1$;

– № 12: $K_{12} = 0,5 \cdot 65 + 0,02 \cdot 63 + 0,48 \cdot 60 = 62,56$;

– № 14: $K_{14} = 0,5 \cdot 70 + 0,02 \cdot 72 + 0,48 \cdot 75 = 72,44$;

– № 17: $K_{17} = 0,5 \cdot 80 + 0,02 \cdot 84 + 0,48 \cdot 85 = 82,48$.

Табл. 8. Оценка приоритетности БЛА по схеме № 2 (усредненная оценка экспертов).

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{ВЗЛ}$, кг	Масса полезной нагрузки $M_{ПН}$, кг / Отношение $M_{ПН} / M_{ВЗЛ}$	Продолжительность полета $T_{П}$, ч	Дальность полета $D_{П}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{КР}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{П}$, м	Оценка приоритетности
1	1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	42,36
2	1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	68,58
3	1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	69,97
4	1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	86,49
5	1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	47,86
6	1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	34,1
7	1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	63,22
8	1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	78,07
9	1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	58,58
10	1300	400 / 0,30	30	6000	240	9000	95,00
11	1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	92,01
12	1450	350 / 0,24	10	1300	480	7000	62,67
13	1450	300 / 0,20	22	260	287	7900	67,49
14	1451	489 / 0,34	30	800	250	9000	72,33
15	1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	77,07
16	1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	86,75
17	1600	200 / 0,12	24	180	200	9000	83,00
18	1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	49,21
19	1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	60,25

Табл. 9. Оценка показателей приоритета БЛА по схеме № 3.

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{ВЗЛ}$, кг	Масса полезной нагрузки $M_{ПН}$, кг / Отношение $M_{ПН} / M_{ВЗЛ}$	Продолжительность полета $T_{П}$, ч	Дальность полета $D_{П}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{КР}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{П}$, м	Оценка показателей приоритета
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	42,72
2	1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	68,53
3	1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	69,87
4	1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	86,45
5	1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	48,39
6	1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	34,66
7	1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	63,46
8	1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	78,05
9	1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	59,01
10	1300	400 / 0,30	30	6000	240	9000	96,5
11	1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	91,99
12	1450	350 / 0,24	10	1300	480	7000	63,40
14	1451	489 / 0,34	30	800	250	9000	71,60
15	1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	77,16
16	1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	87,0
17	1600	200 / 0,12	24	180	200	9000	82,20
18	1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	42,09
19	1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	60,44

Табл. 10. Оценка приоритетности БЛА по схеме № 4 (с учетом веса каждого эксперта по его выборке)

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$, кг	Масса полезной нагрузки $M_{пн}$, кг / Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$, ч	Дальность полета $D_{п}$, км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$, км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$, м	Оценка приоритетности
1	1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	42,03
2	1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	68,26
3	1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	69,69
4	1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	86,3
5	1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	47,87
6	1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	33,92
7	1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	63,12
8	1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	77,8
9	1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	58,44
10	1300	400 / 0,30	30	6000	240	9000	95,10
11	1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	91,88
12	1450	350 / 0,24	10	1300	480	7000	62,56
13	1450	300 / 0,20	22	260	287	7900	67,32
14	1451	489 / 0,34	30	800	250	9000	72,44
15	1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	76,94
16	1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	86,66
17	1600	200 / 0,12	24	180	200	9000	82,48
18	1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	48,96
19	1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	60,14

Результаты оценки БЛА по схеме № 4 приведены в табл. 10.

Выводы

1. В работе показана актуальность задачи выбора и определения показателей приоритета различных образцов авиационной техники и вооружения, в том числе БЛА, на начальных этапах создания среди существующих или проектирования нового технического объекта.

2. Для решения задачи определения показателей приоритета БЛА использованы схемы метрического анализа, позволяющие по экспертным оценкам приоритета некоторых БЛА определить показатели приоритета всех остальных БЛА при знании исходных показателей по каждому оцениваемому БЛА.

3. В качестве исходных показателей при оценке приоритета БЛА приняты следующие: масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета.

4. Представленные в статье схемы определения показателей приоритета могут быть использованы при выборе направлений дальнейшего развития БЛА различного предназначения, а также при покупке готовых БЛА.

Библиографический список

1. Балько Ю.П., Горчица Г.И., Ермолин О.В. и др. Методологические основы создания систем и комплексов авиационного ракетного вооружения / Под ред. Ю.П. Балько. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2012. 688 с.

2. Левина Е.С., Вавилов Д.С., Топоров Н.П. и др. Исследование влияния проектных параметров на облик характеристики ВПЛА // Юбилейная всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке» (26-27 мая 2016 г., г. Москва): Сборник тезисов докладов. М.: ГНЦ РФ «ГосНИИАС», 2016. 300 с. С. 30.

3. Левков В.Г., Овчинников Д.И., Топоров Н.Б. и др. Методика формирования облика системы беспилотных АК, обеспечивающей выполнение разведывательных и ударных задач // Юбилейная всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке» (26-27 мая 2016 г., г. Москва): Сборник тезисов докладов. М.: ГНЦ РФ «ГосНИИАС», 2016. 300 с. С. 31.

4. Семенов С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: Практика применения метода экспертных оценок. М.: ЛЕНАНД, 2015. 352 с.

5. Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В. и др. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Е.Я. Рубиновича. М.: ЛЕНАНД, 2016. 520 с.

6. Платунов В.С. Методология системного военно-научного исследования авиационных комплексов. М.: Дельта, 2005. 344 с.

7. Барковский В.И., Скопец Г.М., Смыслов В.Д. Методология формирования технического облика экспортно ориентированных авиационных комплексов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 244 с.

8. Мышкин Л.В. Прогнозирование развития авиационной техники, теория и практика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 328 с.

9. Круглов В.И., Ершов В.И., Чумадин А.С. и др. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении. М.: Логос, 2011. 432 с.

10. Апанасенко В.М., Агейкин В.И. Алгоритм выбора морского ракетного комплекса с современной ракетой // Вооружение. Политика. Конверсия. 2006. № 4. С. 8-14.

11. Никольский М. Сравнительный анализ самолетов Дассо «Рафаль» и Еврофайтер «Тайфун» // Авиация и космонавтика. 2012. № 8 (17). С. 46–47.

12. Бешелев С.Д. Карпова И.В. Выбор перспективной техники с помощью метода экспертных оценок // Экономика и математические методы. 1972. Том VIII. Вып. 1. С. 117-121.

13. Габрелян К.А. Задача выбора рационального типажа авиационных боевых комплексов // Вооружение. Политика. Конверсия. 2002. № 3. С. 22-25.

14. Габрелян К.А. Выбор и формирование математической модели в задаче оценки эффективности авиационного боевого комплекса // Вооружение. Политика. Конверсия. 2002. № 4. С. 29-32.

15. Габрелян К.А. Методика выбора рациональных вариантов авиационного вооружения на основе теории принятия решений // Вооружение. Политика. Конверсия. 2003. № 3. С. 25–27.

16. Андреев А.Ю., Карпачев И.А., Пляскота С.И. Экспертный метод выбора основных элементов технических систем, комплексов и образцов военного назначения на основе обобщенных критериев «качество» и «стоимость» // Вооружение. Политика. Конверсия. 2009. № 6. С. 23-27.

17. Семенов С.С., Щербинин В.В. Оценка технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб. М.: Машиностроение, 2015. 326 с.

18. Желтов С.Ю. Современное состояние и перспективы развития технологий моделирования авиационных комплексов // Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке», Москва (26-27 мая 2016 г.): Сборник докладов. Том 1 (Пленарное заседание, секции 1-2). М.: ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС», 2017. 445 с. С. 9-30.

19. Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М.: Физматлит, 2015. 555 с.

20. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 280 с.

21. Kryanev A.V., Ivanov V.V., Sevastianov L.A. et al. A review of metric analysis applications to the problems of interpolating, filtering and predicting the values of onevariable and multivariable functions // Communications in Computer and Information Science. 2018. Vol. 919. P. 457-468.

22. Kryanev A., Ivanov V., Romanova A. et al. Extrapolation of Functions of Many Variables by Means of Metric Analysis // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 173.

23. Полтавский А.В., Бурба А.А., Лапсаков О.А. и др. Боевые комплексы беспилотных летательных аппаратов. Часть 1. Системная характеристика боевых комплексов

беспилотных летательных аппаратов / Научно-методический материал. Под ред. А.Н. Максимова. М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 2005. 237 с.

24. Шибяев В., Шнырев А., Буня В. Беспилотные авиационные системы: безопасность полетов и критические факторы // Аэрокосмический курьер. 2011. № 1 (73). С. 55-57.

25. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. М.: Изд-во «Стратегические приоритеты», 2016. 676 с.

26. Никольский М. Российские ударные БПЛА самолетного типа // Аэрокосмическое обозрение. 2018. № 4. С. 14-19.

27. Голубев С.И. Соизмерение технического уровня и эффективности при проектировании конструкции ЛА. М.: Изд-во МАИ, 1986. 90 с.

Сведения об авторах

Крянев Александр Витальевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладной математики», Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Российская Федерация, Москва, e-mail: avkryanev@mephi.ru

Семенов Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, руководитель группы анализа и перспективного проектирования, АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Российская Федерация, Москва, e-mail: gnppregion@sovintel.ru

Калдаева Алла Эдуардовна – студентка 1-го курса магистратуры, Национальный исследовательский университет высшей школы экономики, Российская Федерация, Москва, e-mail: kaldaeva.a@mail.ru

Вклад авторов в статью

Крянев А.В. Предложен метод оценки показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных БЛА с привлечением аппарата метрического анализа по заранее известным экспертным оценкам приоритета некоторой части БЛА и при знании основных оценочных показателей БЛА.

Семенов С.С. Рассмотрены различные методы выбора рациональных технических решений в области авиационных комплексов, представлена классификация и данные о разведывательно-ударных и ударных БЛА, предложен метод оценки показателей приоритета СТС на основе метрического анализа применительно к БЛА при различных схемах экспертных оценок.

Калдаева А.Э. Разработана программа на языке программирования Python, которая реализует математическую модель, основанную на метрическом анализе, проведены расчеты по оценке приоритетности БЛА.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Повышение надежности прогноза стрессоустойчивости при профессиональном психологическом отборе летных специалистов

Эльвира А. Крачко¹, Геннадий Т. Красильников^{1,2*}, Федор В. Мальчинский¹, Валерий И. Медведев¹

¹Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Российская Федерация, Краснодар, ²Кубанский государственный медицинский университет, Российская Федерация, Краснодар

*gennadykras@mail.ru



Эльвира А. Крачко



Геннадий Т. Красильников



Федор В. Мальчинский



Валерий И. Медведев

Резюме. Цель. В статье описывается исследование повышения надежности прогноза стрессоустойчивости при профессиональном психологическом отборе (ППО) кандидатов в военное летное училище с применением объективирующей методики авторской разработки «Оценка стрессоустойчивости». Стрессоустойчивость (СУ) (нервно-психическая устойчивость, НПУ) является важным профессиональным качеством из психофизиологического блока и служит одним из факторов, обеспечивающим успешность как летного обучения, так и дальнейшей профессиональной летной деятельности. Однако методики, рекомендованные нормативными документами для определения СУ при прохождении ППО, отличаются недостаточной эффективностью и подвержены влиянию субъективных факторов. Поэтому сохраняется актуальная потребность в объективной и тем самым более эффективной методике. **Методы.** Методика разрабатывалась на основании анализа тематической литературы и собственного опыта. Подбор стрессовых стимулов и методик регистрации показателей осуществлялся на основании их эмпирической проверки. Стрессогенность стимулов в этой методике подтверждалась повышением частоты пульса на 40 – 100% и выше, соответствующими поведенческими проявлениями и существенной динамикой продуктивности умственной деятельности в процессе выполнения тестовых заданий. Из методов математической статистики в статье применялся корреляционный анализ. **Результаты.** Методика оценки СУ реализована на основе многофункционального психофизиологического комплекса «Реакор» научно-производственной конструкторской фирмы «Медиком МТД» г. Таганрога, со встроенным в программное обеспечение комплекса авторским сценарием проведения методики. Для стресс-стимульного материала и контрольной оценки работоспособности были выбраны арифметические усложненные задания, выполнение которых активируют больший объем (областей) головного мозга, чем при решении вербальных тестов. Для исключения эффекта привыкания и заучивания, тестовые арифметические задания подавались на экран компьютера в случайном порядке по одному заданию. Значение интервала времени между отдельными заданиями в 3–4 секунды было выбрано, основываясь на данных авиационной психологии и путем апробации на выборке курсантов. Выборка испытуемых составила 1135 кандидатов мужского пола на поступление в высшее военное летное училище в 2016 г. Корреляционный анализ показывает, что связи между показателями внешнего критерия (успешность в тренажерной подготовке и успешность прохождения летной практики) и интегральным показателем СУ являются статистически значимыми: чем выше показатель СУ, измеренный в процессе ППО с помощью методики оценки СУ, тем более высокие экспертные оценки за тренажерную подготовку и летную практику. **Заключение.** Таким образом, проведенные исследования показали, что применение разработанной методики оценки СУ в ППО в высшее военное летное училище обеспечивает повышение прогноза СУ у отобранных кандидатов как психофизиологического фактора профессиональной эффективности и надежности летного персонала.

Ключевые слова: профессиональный психологический отбор, профессионально важные качества, летный состав, стрессоустойчивость, надежность.

Для цитирования: Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В., Медведев В.И. Повышение надежности прогноза стрессоустойчивости при профессиональном психологическом отборе летных специалистов // Надежность. 2020. №4. С. 61–66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-61-66>

Поступила 16.07.2020 г. / После доработки 15.09.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

Введение. Проблема надежности и безопасности полетов сохраняет свою актуальность, несмотря на колоссальный прогресс в развитии современной авиационной техники, и привлекает разносторонний интерес [1 – 8]. Одной из главных особенностей профессиональной деятельности летного состава является стрессовая ситуация. Несмотря на постоянное совершенствование профессионального психологического отбора (ППО) в высшие военные авиационные образовательные учреждения, в недавнем прошлом около 50%, а в последние годы до 20% отчислений курсантов из летных училищ происходит по причине летной неупеваемости [9, 10]. Стрессоустойчивость (СУ) (нервно-психическая устойчивость, НПУ) является одним из самых важных профессиональных качеств летчика из психофизиологического блока, которые делают вклад в безопасность полетов. Под СУ мы понимаем сложное, многоуровневое, интегральное качество, системный комплекс индивидуальных психологических, психофизиологических и социально-психологических свойств, который позволяет успешно противостоять негативным и экстремальным факторам окружающей среды, сохраняя при этом оптимальное психическое, эмоциональное состояние и способность выполнять ту или иную деятельность при адекватной физиологической «цене» на прежнем высоком уровне эффективности. Системность комплекса свойств СУ выражается в том, что отдельные характеристики человека проявляются только в единстве и во взаимодействии друг с другом. На сегодняшний день оценка СУ (НПУ), как основной причины летной неупеваемости, в практике профессионального психологического отбора происходит с использованием, в основном, опросников и данных анкет, в соответствии с требованиями нормативных документов [11, 12]. Опыт применения этих методик на этапе отбора в летный вуз с целью диагностики НПУ показал их недостаточную информативность, иногда противоречивость данных, недостаточную объективность и подверженность влиянию субъективных факторов. Оценка СУ (НПУ) у кандидатов для поступления в летный ВУЗ является важной задачей еще и потому, что ее уровень определяет успешность не только их летного обучения, но и дальнейшей летной деятельности, тем самым включаясь в качестве психофизиологического фактора в формирование профессиональной надежности [9, 13].

Постановка проблемы. Нередко случается, что те, кто показывал хорошие результаты деятельности в обычных условиях, оказываются аутсайдерами при попадании в стрессовые ситуации. К основным признакам СУ относится сохранение способности к адаптивной деятельности (сохранению или повышению работоспособности) при критической ситуации [3, 10, 14]. Согласно литературным данным, одним из главных профессиональных стрессов у летчиков является информационный стресс [4, 15, 16]. Поэтому логично считать, что показатели динамики умственной работоспособности у испытуемого при экспериментальном стрессовом воздействии окажутся информативным критерием прогноза его СУ в реальной профессиональной экстремальной ситуации [14, 15, 16].

Факторами, ограничивающими разработку дизайна методики прогностической оценки СУ в процессе ППО, являются отсутствие сложного оборудования для моделирования стрессовой ситуации и лимит времени на одно обследование в 14-16 минут с учетом возможного наличия до 1200 и более кандидатов. Концептуальные положения разрабатываемой методики основаны на трудах Б.В. Ломова, В.А. Бодрова, Л.А. КитаеваСмыка, В.А. Пономаренко, В.Л. Маришука [14, 15, 17, 18, 19]. Исходя из поставленной цели, при разработке методики решались следующие проблемы: 1) формирование стрессового стимула (комплекса стимулов), вызывающего экспериментальное стрессовое состояние; 2) подбор показателей оценки СУ в экспериментальном стрессе (динамика продуктивности умственной деятельности в процессе тестирования, физиологическая цена деятельности, поведенческие проявления).

Материал и методы. Разрабатываемая методика предназначалась для ППО кандидатов, поступающих в высшее военное авиационное училище летчиков. В качестве стресс-стимульного и контрольного материала были выбраны арифметические усложненные задания, выполнение которых, согласно литературным данным, активируют большой объем (областей) головного мозга, чем при решении вербальных тестов [20, 21]. Это соответствует литературным данным о преимущественно информационных стрессах, возникающих у летного состава [15, 16, 22], что связано также и с переводом приборов в современных самолетах с аналоговых на цифровые показатели. Кроме того, для усиления стрессогенности ситуации обследования, решение задач сопровождалось информационными помехами (в виде стука метронома и драматического радиообмена авиадиспетчера с летчиком об аварийном состоянии двигателя самолета), подаваемыми в наушники обследуемому. Для исключения эффекта привыкания и заучивания [23] тестовые арифметические задания подавались на экран компьютера в случайном порядке по одному заданию. Значение интервала времени между отдельными заданиями в 3 – 4 секунды было выбрано по основанию данных исследований авиационной психологии [15] и путем апробации на выборке курсантов. Подбор тестовых заданий и методик регистрации показателей осуществлялся на основании их эмпирической проверки в процессе ППО кандидатов на поступление в военное летное училище в 2013 – 2016 гг. Стрессогенность разрабатываемого теста подтверждалась повышением частоты пульса на 40-100 %, и выше во время выполнения теста, а также соответствующими поведенческими проявлениями и существенной динамикой продуктивности умственной деятельности в процессе выполнения данного теста [24, 25]. Для настоящего исследования выбрана последняя модификация методики, с помощью которой в 2016 г. было обследовано 1135 кандидатов мужского пола. При получении результатов летной практики у 562 курсантов этого набора в 2020 г. была проверена критериальная валидность методики по данному внешнему критерию. Из методов математической статистики применялся корреляционный анализ.

Результаты и обсуждение. Методика оценки СУ реализована на основе многофункционального психофизиологического комплекса «Реакор» научно-производственной конструкторской фирмы «Медиком МТД» г. Таганрога, со встроенным в программное обеспечение комплекса авторским сценарием проведения методики.

Оценка СУ заключается в исследовании умственной продуктивности при выполнении трех когнитивных тестов в сопоставлении с параметрами физиологических показателей (частоты сердечных сокращений) на всех этапах исследования, а также с поведенческими проявлениями в стрессовой ситуации. Когнитивные тесты представлены модифицированными тестами «Арифметический счет» в двух вариантах выполнения – «Арифметический счет 1» (АС-1), «Арифметический счет 2» (АС-2) и разработанной методики «Сложение чисел». Каждый из тестов – (АС-1) и (АС-2) состоит из 20 заданий. Сущность методики заключается в устном выполнении арифметических действий с целыми числами в пределах от 1 до 25. Модификация методики состоит в том, что отдельное задание состоит из двух действий, предъявляется испытуемому на экран монитора с интервалом времени от 4 до 3 секунд, то есть на решение одного примера отводится установленное время: первые 10 заданий подаются на экран монитора с интервалом в 4 секунды, вторые 10 заданий – с интервалом в 3 секунды. В процессе выполнения теста вводится дополнительная (психологическая) нагрузка: помимо создаваемых условий дефицита времени, решение заданий методики сопровождается звуковыми помехами в виде звуков метронома, передаваемыми испытуемому через наушники.

К каждому заданию прилагается пять вариантов ответов, из которых надо выбрать только один правильный, и определить букву графы ответа. Испытуемому необходимо выполнять арифметические действия в том порядке, как они записаны, слева направо, без соблюдения правил арифметического счета. После нахождения ответа, испытуемый должен произнести вслух: номер задания и букву, соответствующую варианту графы ответа, например, «один – В», «два – Б» и т.д.

Тест «Сложение чисел» (СЧ) составлен из 60 арифметических заданий, в каждом из которых надо складывать по 5 однозначных чисел, которые предъявляются на экран монитора через каждые 3,5 секунды. Испытуе-

мому необходимо найти сумму из 5 цифр и произнести вслух номер задания и ответ, например, «один – 19», «два – 25» и т.д. В процессе выполнения теста создается дополнительная нагрузка – необходимость выполнения теста в условиях дефицита времени (на каждое задание выделяется всего 3,5 секунды) и звуковых помех, подаваемых в наушники (помехами служит радиообмен авиадиспетчера с летчиком при пилотировании самолета в условиях аварийного отказа авиационного двигателя).

Ответы на тестовые задания выполняются в устном формате, так как на руках испытуемого наложены специальные датчики, регистрирующие физиологические сигналы (частоту сердечных сокращений – ЧСС), делающие невозможным его письменные ответы. Устная форма подачи ответов на тестовые задания имеет в то же время эвристический смысл, так как позволяет наблюдать на всем протяжении выполнения методики за речевым поведением испытуемого и отслеживать состояние его эмоционального напряжения в процессе обследования.

Физиологическая «цена» деятельности оценивается по величине сдвигов физиологических показателей (частота сердечных сокращений) на всех этапах прохождения методики и по длительности их сохранения после прекращения стрессового воздействия на этапе «отдыха». В показателях поведенческих проявлений фиксируются различные степени выраженности стрессовых эмоциональных реакций: тремор, заикание, двигательная и речевая заторможенность и застывание или гиперактивность (нецелесообразная суетливость), мимические, кожно-вегетативные и поструральные поведенческие проявления. Перевод качественных поведенческих характеристик в количественные показатели осуществляется в соответствии с положениями квалиметрического подхода [26].

Комплексное заключение о СУ выводится путем интеграции параметров всех показателей. При определении интегральной оценки СУ за основу взят экспертно-аналитический метод многомерного шкалирования, который был обоснован ведущими учеными в области авиационной психологии как наиболее приемлемый для практической оценки профессионально важных качеств военного летчика [15, 27] Определение интегральной оценки позволяет относить, на основе проведенной в пилотных исследованиях стандартизации показателей

Табл. 1. Интегральное заключение о СУ на основе многомерного шкалирования

Показатель СУ (интегральная оценка)	154,58 и более	132,48 – 154,57	120,63 – 132,47	120,62 и менее
Формулировка	Прогноз надежности деятельности в экстремальных ситуациях – низкий. Неустойчивость к стрессовым нагрузкам. Не рекомендуется к освоению летной деятельности	Прогноз надежности деятельности в экстремальных ситуациях – удовлетворительный. Удовлетворительная устойчивость к стрессовым нагрузкам. Рекомендуется к освоению летной деятельности условно	Прогноз надежности деятельности в экстремальных ситуациях – хороший. Хорошая устойчивость к стрессовым нагрузкам. Рекомендуется к освоению летной деятельности	Прогноз надежности деятельности в экстремальных ситуациях – высокий. Высокая устойчивость к стрессовым нагрузкам. Рекомендуется к освоению летной деятельности в первую очередь

[4, 28, 29], каждого исследуемого к одной из следующих 4-х групп профессиональной пригодности по степени СУ: пригоден в первую очередь, годен, условно пригоден, непригоден, как это визуализировано в табл. 1.

По завершении процедуры обследования методикой оценки СУ на каждого испытуемого составляется протокол психофизиологического обследования оценки СУ, в который включаются результаты с описанием индивидуальных психологических, психофизиологических особенностей и сформулированным интегральным заключением о градации профессиональной пригодности по СУ.

Критериальная валидность методики подтверждалась исследованием корреляции интегральной оценки СУ с показателями внешнего критерия, в качестве которого принимались показатели успешности практического обучения в тренажерной подготовке и успешности прохождения летной практики.

Исследование корреляции показателей СУ и успешности в тренажерной подготовке было проведено в порядке предварительной проверки критериальной валидности методики [30]. Инструкторы практического обучения по окончании тренажерной подготовки выставляют оценки курсантам за скорость формирования и устойчивость навыков, координацию движений, распределение внимания, действия в особых случаях (отказа, пожара двигателя и др.) и другие способности при выполнении «полетов» на авиационных тренажерах, что и было выбрано в качестве внешнего критерия. При сопоставлении показателей СУ с показателями напряженности и действий курсантов в особых случаях «полетов» на авиационном тренажере были выявлены значимые корреляционные взаимосвязи ($p < 0,05$) между интегральной оценкой СУ и внешним критерием, которые представлены в табл. 2.

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между интегральной оценкой СУ и показателями внешнего критерия по тренажерной практике ($n = 562$).

Наименование показателя внешнего критерия	Интегральный показатель СУ
напряженность в полете на авиационном тренажере	-0,316
действия в особых случаях	0,276

При анализе данных, визуализированных в табл. 2, устанавливается, что корреляционные связи между интегральным показателем СУ и показателями оценки инструкторов являются статистически значимыми (при $p < 0,05$). Это означает, что чем выше показатель СУ, измеренный при прохождении ППО с помощью методики оценки СУ, тем меньше показатель напряженности и тем лучше действия курсантов в особых случаях, смоделированных в тренажерном полете.

Более точным внешним критерием для подтверждения prognostической оценки методики является результат прохождения первоначальной летной подготовки

(летной практики). Подобные результаты у курсантов 2016 года набора по прохождении практики в учебно-авиационных базах Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков были получены в 2020 г.

Успешность прохождения летной практики оценивалась летчиками-инструкторами в виде следующих градаций, характеризующих курсанта по их летным способностям и качеству летной подготовки:

- сильный курсант – имеет высокие и очень высокие летные способности;
- курсант выше среднего – летные способности выше средних и хорошие;
- средний курсант – средние летные способности;
- курсант ниже среднего – летные способности ниже средних;
- слабый курсант – низкие и очень низкие летные способности.

Распределение оценки за летную практику проведено в соответствии с нормативным документом [12] следующим образом:

- экспертная оценка «сильный» соответствует 1-й группе успешности обучения и адекватна I категории профпригодности;
- экспертная оценка «выше среднего» соответствует 2-й группе успешности обучения и адекватна II категории профпригодности;
- экспертная оценка «средний» соответствует 3-й группе успешности обучения и адекватна III категории профпригодности;
- экспертная оценка «ниже среднего» и «слабый» соответствует 4-й группе успешности обучения и адекватна IV категории профпригодности. Количественное распределение курсантов по группам успешности летного обучения представлено в табл. 3.

Если рассмотреть распределение курсантов по группам успешности летного обучения в соответствии с законом нормального распределения, то выявляется смещение выборки в сторону показателей успешности «средних» и «ниже среднего, слабых». С целью смягчения влияния статистического сдвига было проведено объединение курсантов 1-й и 2-й групп по успешности обучения в одну группу. После такой процедуры выборка курсантов ($n = 562$) была разделена на 3 группы следующим образом: I-я и II-я группы – 273 курсанта; III-я – 207; IV-я – 82 курсанта.

В соответствии с таким подходом, распределение курсантов по интегральным показателям СУ также было произведено на три группы: I-я группа – объединяет «рекомендуется и рекомендуется в первую очередь» к освоению

Табл. 3. Количественное распределение курсантов 2016 года набора по группам успешности летного обучения в 2020 г.

Выборка курсантов (количество, процент)	Количество человек			
	1 группа («сильный»)	2 группа («выше среднего»)	3 группа («средний»)	4 группа («ниже среднего», «слабый»)
$n = 562$	41	136	272	113
100 %	7,3	24,2	48,4	20,1

летной деятельности; 2-я – «рекомендуется условно»; и 3-я – «не рекомендуется». Следует отметить, что на 3-м курсе обучения курсанты осваивают программу первоначальной летной подготовки, результатом которой является выполнение самостоятельного полета на учебном самолете. При дальнейшем летном обучении – освоении программы базовой летной подготовки и программы совершенствования летной подготовки – происходит постепенное развитие и становление летных способностей у курсантов, при этом происходит повышение доли курсантов с высокими летными способностями и значительное снижение курсантов, характеризующихся как «слабые».

Проверка корреляционной связи между полученными показателями внешнего критерия (результатов летной практики) и интегральными показателями СУ показала их статистическую значимость (при $p < 0,05$). Распределение показателей успешности летного обучения в зависимости от значений показателя СУ представлено в табл. 4.

Табл. 4. Средние значения и доверительные интервалы оценки за летную практику по показателю СУ (при $p < 0,05$, в знаменателе приведен численный состав группы).

Выборка обследуемых	Значение рейтинговой оценки за летную практику по методике оценки СУ		
	1 группа СУ	2 группа СУ	3 группа СУ
курсанты 2016 года набора, $n = 562$	$3,32 \pm 0,09$ 273	$3,09 \pm 0,12$ 207	$3,02 \pm 0,17$ 82

Приведенные в табл. 4 данные показывают, что курсанты с высокими показателями СУ имеют более высокие показатели успешности в тренажерной подготовке и по экспертным оценкам летчиков-инструкторов за летную практику. Однако более четко статистическая достоверность ($p < 0,05$) этих различий проявляется при сравнении полярных групп: курсанты, имеющие высокие показатели СУ – 1 группа СУ, имеют экспертную оценку по результатам летной практики «сильный», и наоборот, курсанты, отнесенные экспертами к категории курсантов «слабый» и «ниже среднего», имеют низкие показатели СУ – 3 группа СУ.

Заключение. Таким образом, описанное выше проведение корреляционного анализа показало, что связи между интегральным показателем СУ и показателями внешнего критерия являются статистически значимыми (при $p < 0,05$): чем выше показатель СУ, установленный с помощью методики оценки СУ, тем более высокие экспертные оценки летчиков-инструкторов за летную практику (достоверно при $p < 0,05$). В настоящее время методика «Оценка стрессоустойчивости» находится на стадии экспертной проверки с целью возможного включения в нормативные документы ППО. Следовательно, применение разработанной методики оценки СУ в ППО в высшее военное летное училище обеспечивает повышение прогноза СУ у кандидатов на обучение, как психофизиологического фактора профессиональной эффективности и надежности летного персонала.

Библиографический список

1. Концепция безопасности полетов авиации Вооруженных Сил Российской Федерации. Утв. МО РФ 31.05.2017 г. М.: СБП А ВС РФ, 2017. 19 с.
2. Ариничева О.В., Малишевский А.В. Повышение надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов // Надежность. 2019. № 19(1). С. 40-47. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-40-47.
3. Гандер Д.В., Ворона А.А., Пономаренко В.А. и др. Методологические и теоретические предпосылки психологических исследований летного труда на современном этапе развития авиации // Психология и Психотехника. 2016. № 11. С. 906-912. DOI: 10.7256/2454-0722.2016.11.22442.
4. Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В. и др. Надежность прогноза успешности летного обучения по данным профессионального психологического отбора // Надежность. 2018. № 18(3). С. 27-30. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-3-27-30.
5. Лапа В.В., Пономаренко В.А., Чунтул А.В. Психофизиология безопасности полетов. М.: «Ассоциация журналистов, пишущих на правоохранительную тематику», 2013. 396 с.
6. Никифоров Д.А., Ворона А.А., Богомолов А.В. Методика оценивания потенциальной ненадежности действий летчика // Безопасность жизнедеятельности. 2015. № 7. С. 7-16.
7. Плотников Н.И. Основания теории надежности человека-оператора (пилота) // Надежность. 2015. № 2 (53). С. 90-93. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-2-90-97
8. Пономаренко В.А. Безопасность полета – боль авиации. М.: Флинта, 2007. 416 с.
9. Пономаренко В.А. Психология духовности профессионала. М.: ПЕР СЭ, 2004. 256 с.
10. Алешин С.В. Безопасность и стресс / С.В. Алешин // Человеческий фактор: новые подходы в профилактике авиационной аварийности: сборник статей / Под ред. В.В. Козлова. М., 2000. С. 59–65.
11. Основы военного профессионального психологического отбора: учеб. пособие / Под ред. Г.М. Зарковского, В.И. Лазуткина. М.: Воениздат, 2005. 464 с.
12. Методические рекомендации по организации и проведению профессионального психологического отбора в военно-учебных заведениях Министерства обороны Российской Федерации. М., 2002. 288 с.
13. Благинин А.А. Профессиональная надежность летчика / А.А. Благинин // Физиология летного труда: учебник. СПб.: Наука, 1997. С. 238–245.
14. Маришук В.Л., Евдокимов В.И. Поведение и саморегуляция человека в условиях стресса. СПб.: Издательский дом «Сентябрь», 2001. 260 с.
15. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. Красноярск: «Поликом», 2006. 629 с.
16. Покровский Б.Л. Эмоциональный стресс / Б.Л. Покровский // Функциональное состояние летчика в экстремальных условиях / Под ред. В.А. Пономаренко, П.В. Васильева. М.: Полет, 1994. С. 273-302.

17. Ломов Б.Ф. Методологические и теоретические проблемы психологии. М.: Наука, 1984. 444 с.

18. Бодров В.А., Орлов В.Я. Психология и надежность: человек в системах управления техникой. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 1998. 288 с.

19. Китаев-Смык Л.А. Психология стресса. М.: Академический проект, 2009. 943 с.

20. Роик А.О., Иваницкий Г.А. Нейрофизиологическая модель когнитивного пространства // Журнал высшей нервной деятельности. 2011. № 60(6). С. 688-696.

21. Айдаркин Е.К., Фомина А.С. Исследование динамики пространственной синхронизации биоэлектрических потенциалов мозга при решении сложных арифметических примеров // Валеология. 2012. № 3. С. 91-106.

22. Бодров В.А. Информационный стресс: Учебное пособие для вузов. М.: ПЕР СЭ, 2000. 352 с.

23. Аллюшин М.В. Минимизация эффекта привыкания при проведении психологического тестирования // Вопросы психологии. 2015. № 3. С. 153-160.

24. Красильников Г.Т., Крачко Э.А., Мальчинский Ф.В. Разработка методики определения стрессоустойчивости у кандидатов для поступления в высшее военное авиационное образовательное учреждение // Матер. XV Южно-Российской научно-практ. конф.: «Инновационные технологии в образовательном процессе». Краснодар: филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. Т. II. С. 173-181.

25. Красильников Г.Т., Крачко Э.А., Мальчинский Ф.В. Проблемы исследования экспериментальных стрессов опасных профессий // Сборник материалов юбилейной конференции: «От истоков к современности» (130 лет организации психологического общества при Московском университете): В 5-ти томах: Том 5. М., 2015. С. 9–21.

26. Косачев В.Е., Агапов И.В., Усов В.М. Квалиметрический подход к изучению профессионально важных качеств // Развитие идей Б.Ф. Ломова в исследованиях по психологии труда и инженерной психологии: Материалы I научных Ломовских чтений. М., 1992. с.148.

27. Формирование и развитие профессионально важных качеств у курсантов в процессе обучения в ВВАУЛ/Под ред. В.А. Пономаренко, А.А. Вороны. М.: Воениздат, 1992. 184 с.

28. Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В. Психофизиологический аспект исследования стрессоустойчивости летного состава // Материалы XXIII съезда Физиологического общества имени И.П. Павлова. Воронеж: Издательство «Истоки», 2017. С. 1278–1279.

29. Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В. Разработка стрессогенного стимула для методики оценки стрессоустойчивости // Матер. научно-практ. конф., посвященной 20-летию кафедры военной психофизиологии Военно-медицинской академии: «Психофизиология профессионального здоровья человека». СПб.: ВМедА, 2017. С. 192–197.

30. Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В. Исследование стрессоустойчивости кандидатов на поступление в высшее военное авиационное училище летчиков // Известия Российской военно-медицинской академии. 2019. Т. 38. № 3. С. 34-41.

Сведения об авторах

Крачко Эльвира Адисовна – кандидат медицинских наук, начальник научно-исследовательской лаборатории психофизиологических проблем профессиональной подготовки летного состава научно-исследовательского отдела, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Российская Федерация, Краснодар, e-mail: elvira.krachko@yandex.ru

Красильников Геннадий Тимофеевич – доктор медицинских наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела (профессионального психологического отбора и профессионального психологического сопровождения обучения летного состава), Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Краснодар, Россия; Кубанский государственный медицинский университет, Российская Федерация, Краснодар, e-mail: gennadykras@mail.ru

Мальчинский Федор Валентинович – кандидат психологических наук, начальник научно-исследовательского отдела (профессионального психологического отбора и профессионального психологического сопровождения обучения летного состава), Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Российская Федерация, Краснодар, e-mail: nil.pfl@yandex.ru

Медведев Валерий Иванович – кандидат исторических наук, доцент, заместитель начальника училища по учебной и научной работе, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Российская Федерация, Краснодар.

Вклад авторов в статью

Крачко Э.А. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы. Теоретическая составляющая работы, разработка методики «Оценка стрессоустойчивости», проведение пилотных исследований по апробации методики «Оценка стрессоустойчивости» и статистическая обработка полученных результатов.

Красильников Г.Т. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы.

Теоретическая составляющая работы, разработка методики «Оценка стрессоустойчивости», проведение пилотных исследований по апробации методики «Оценка стрессоустойчивости».

Мальчинский Ф.В. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, разработка методики «Оценка стрессоустойчивости, организация проведения исследования по апробации методики «Оценка стрессоустойчивости».

Медведев В.И. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, организация проведения исследования по апробации методики «Оценка стрессоустойчивости».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY

The Gnedenko e-Forum has been established by the International Group On Reliability (I.G.O.R.). The Forum is named after outstanding probabilist and statistician Boris Vladimirovich Gnedenko. The I.G.O.R.'s purpose is promoting contacts between members of the World reliability community and exchanging professional news and information (new publications, forthcoming events, etc.).

Gnedenko Forum основан в 2004 году неофициальной международной группой экспертов в области теории надёжности для профессиональной поддержки исследователей всего мира, заинтересованных в изучении и развитии научных, технических и пр. аспектов теории надёжности, анализа рисков и безопасности в теоретической и прикладной областях.

Форум создан в сети Интернет как некоммерческая организация. Его цель – привлечь к совместному обсуждению и общению технических специалистов, заинтересованных в развитии теории надёжности, безопасности и анализа рисков, независимо от места их проживания и принадлежности к тем или иным организациям.

Форум выступает в качестве объективного и нейтрального лица, распространяющего научную информацию для прессы и общественности по вопросам, касающимся безопасности, анализа риска и надёжности сложных технических систем. Он опубликует обзоры, технические документы, технические отчеты и научные эссе для распространения знаний и информации.

Форум назван в честь Бориса Владимировича Гнеденко, выдающегося советского математика, специалиста в области теории вероятностей и её приложений, академика Украинской академии наук. Форум является площадкой для распространения информации о стипендиях, академических и профессиональных позициях, открывающихся в профессиональной области надёжности, безопасности и анализа рисков по всему миру.

В настоящее время в Форуме состоят 500 участников из 47 стран мира.

Начиная с января 2006 года, Форум выпускает свой ежеквартальный журнал *Reliability: Theory & Applications* (www.gnedenko.net/RTA). Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321) и публикует статьи, критические обзоры, воспоминания, информацию и библиографии на теоретические и прикладные аспекты надёжности, безопасности, живучести, технического обслуживания и методы анализа и управления рисками.

С 2000 года журнал индексируется в международной базе Scopus.



Членство в GNEDENKO FORUM не подразумевает никаких обязательств. Достаточно прислать по адресу a.bochkov@gmail.com свою фотографию и краткую профессиональную биографию (резюме). Образцы можно найти на <http://www.gnedenko.net/personalities.htm>

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Требования к формату статьи

Статья представляется в редакцию в электронном формате, в виде файла, созданного в текстовом редакторе MS Word из пакета Microsoft Office (файл с расширением *.doc или *.docx). Текст набирается черным шрифтом на листе формата А4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

Структура материала статьи

Представленные ниже структурные элементы статьи отделяются друг от друга *пустой строкой*. Отдельные примеры оформления, как это должно выглядеть в тексте, выделены *синим шрифтом*.

1) Название статьи

Название статьи представляется на русском и английском языках. Название статьи на русском языке должно соответствовать содержанию статьи. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Оформление: Текст названия набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

Оформление: Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}

Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

Оформление: Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

²Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

Оформление: Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, производственная эффективность.

7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

Оформление:

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например: где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисовочные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисовочная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисовочной подписи не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисовочном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями *.tiff, *.png, *.gif, *.jpg, *.eps.

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как \sin , \cos , \max , \min и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a \cdot x + b$, тогда...

либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = a \cdot x + b.$$

При наборе формул как в тексте, так и в отдельной строке, знаки препинания должны ставиться по обычным правилам – точка, если формулой заканчивается предложение; запятая (или отсутствие знака препинания), если предложение после формулы продолжается. Для разделения формулы и текста рекомендуется для строки с формулой устанавливать вертикальные отступы (6 пт перед, 6 пт после). Если в тексте статьи делается отсылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

$$y = a \cdot x + b. \quad (1)$$

Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делаются отсылки, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

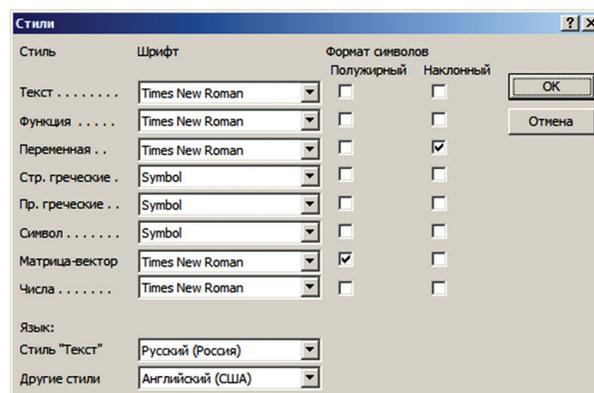
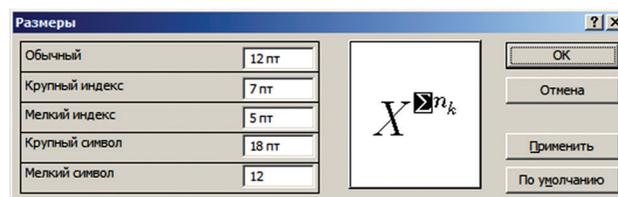
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

Если формула набирается без применения редактора формул, то между буквами и знаками «+», «-», «=» должны быть набраны неразрывные пробелы (Ctrl+Shift+Spacebar).

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редак-

рованием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m}. \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников удастся это сделать в 95% случаев).

Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В ссылках на статьи из журналов должны быть обязательно указаны год выхода публикации, том и номер журнала, номера страниц.

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

Ссылки должны быть верифицированы, выходные данные проверены на официальном сайте журналов и/или издательств.

Оформление:

Оформление ссылок (в русскоязычной версии журнала) должно выполняться по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая

запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

10) Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество полностью (на русском и английском языках); полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну); полное наименование места работы, занимаемая должность; ученая степень, ученое звание, почетные звания; членство в общественных союзах, организациях, ассоциациях и т.д.; официальное англоязычное название учреждения (для версии на английском языке); адрес электронной почты; перечень и номера журналов, в которых ранее публиковались статьи автора; фото авторов для публикации в журнале.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

11) Вклад авторов в статью

Следует указать подробно, каким из авторов что сделано в статье. Например: Автором А. выполнен анализ литературы по теме исследования, автором Б. разработана модель объекта в реальных условиях эксплуатации, выполнен расчет примера и т.д. Даже если у статьи один автор, то требуется указание его вклада.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

12) Конфликт интересов

Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в статью.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

Оформление:

Текст набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(АО «НИИАС»)



АО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог



Цели:

- эффективность,
- безопасность
- надежность перевозок



Основные направления деятельности

- Интеллектуальные системы управления
- Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- Системы автоматики и телемеханики
- Центры автоматизированного управления
- Информационные системы
- Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- Системы транспортной безопасности
- Системы управления инфраструктурой
- Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- Испытания, сертификация и экспертиза
- Информационная безопасность
- Нормативно-правовое обеспечение

