

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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 проблемам 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)

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)

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 – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Телематика» (при ЦНИИ РТК) 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 ОАО «Областная типография

«Печатный двор». 432049, г. Ульяновск, ул. Пушкирева, 27.

Подписано в печать 19.03.2020

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №

Формат 60х90/8, 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») И ООО «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ТЕХНОЛОГИИ»

СОДЕРЖАНИЕ

От главного редактора 1

Структурная надежность. Теория и практика

Тарарычкин И.А. Особенности развития и характеристики смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта 4

Михайлов В.С. План испытаний с добавлением. Эффективные оценки показателей надежности 12

Долганов А.И. Об учете прогрессирующего разрушения при проектировании 20

Белоусова М.В., Булатов В.В. К вопросу об организации службы надежности на машиностроительном предприятии 25

Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А., Трахтомиров А.В. Расчет комплекта ЗИП с использованием комплекса имитационных программ «Диалог» (Часть 1. Общие положения для расчета комплекта ЗИП) 32

Функциональная надежность и функциональная живучесть. Теория и практика

Ариничева О.В., Зюба Т.В., Малишевский А.В. Влияние половых различий на надёжность профессионального психологического отбора авиационных специалистов 39

Безопасность. Теория и практика

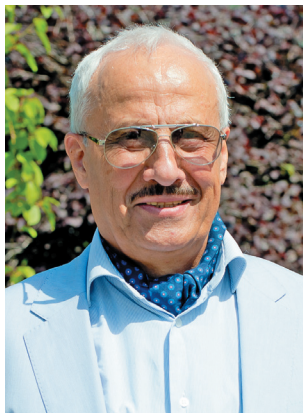
Махутов Н.А., Резников Д.О. Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределенностей 47

Управление рисками. Теория и практика

Бочков А.В. О методе синтеза рисков в управлении безопасностью структурно-сложных систем 57

Гнеденко –Форум 68

Развитие тематики журнала «Надежность» в 2020 г.



Уважаемые коллеги!

Наступил 2020 год – юбилейный год семидесятилетия науки и практики надежности. За сравнительно короткий отрезок времени дисциплина «надежность» стала одной из основополагающих научных основ разработки и эксплуатации технических средств и систем. Первые два десятилетия развития надежности отмечены исключительно

высоким интересом исследователей различных стран к этой науке. Новизна задач, прикладной характер, острая практическая потребность в их решении, возможность внести свой вклад в новую область знаний – все это способствовало формированию теории надежности.

Достижения в области надежности способствовали созданию сложных многофункциональных технических систем. Это привело, в свою очередь, к необходимости решать гораздо более сложные задачи анализа и синтеза надежности систем. В частности, потребовалось вводить в их состав комбинации различных видов резервирования (структурного, временного, функционального и т.д.). Строгая оценка уровня надежности сложных избыточных технических систем известными методами была затруднена. Поэтому широкое развитие получили методы, которые основывались на следующих двух постулатах:

1. Метод должен учитывать те объекты или условия функционирования технической системы, которые вносят определяющий вклад в ее надежность. Отсюда следует, что можно пренебречь объектами или условиями функционирования системы (независимо от их количества), если их вклад в надежность системы меньше приемлемой из инженерных соображений нормы;

2. Метод должен быть прикладным, пригодным для практического применения в службах надежности предприятий.

В качестве примера реализации первого постулата можно привести применение диаграммы Парето, с помощью которой при решении ряда практических задач удавалось выделять сравнительно небольшую группу составных наиболее значимых объектов. При анализе сложных электронных систем во многих случаях вводились допущения об отсутствии последствий и постоянных интенсивностях отказов и восстановлений, что обычно не противоречило практическим данным и позволяло применять прикладной математический аппарат Марковских случайных процессов. Этот аппарат также применялся на практике при управлении надежностью сложных технических систем на этапе их эксплуатации после приработки и до износа и старения.

По мере повышения надежности систем возникли проблемы с получением необходимого количества текущих статистических данных об отказах. Данные стали неполными и недостаточно достоверными. Для решения проблем надежности в этих условиях исследователи стали применять математические аппараты теории нечетких множеств, теории возможностей, интервальных средних. Это позволило математически объединить все имеющиеся сведения о надежности объектов: статистические данные, мнения экспертов, технические предположения и др. В результате формировалась достаточно объемная картина состояния надежности системы. Однако вызвали большие опасения принимаемые решения по управлению надежностью, поскольку достоверность исходных сведений и прогнозов не всегда устраивала пользователей системы. Естественно стало управлять надежностью сложных систем на основе оценки рисков: управлять инвестициями в обеспечение надежности, регулировать срок службы систем, оценивать критичность отказов, управлять техническим обслуживанием и т.д.

Инновационные технологии искусственного интеллекта существенно расширяют границы теории надежности – появляется возможность достоверно прогнозировать появление опасных событий и критичных отказов, снизить уровни рисков, повысить уверенность в принимаемых решениях. Методы и модели технологии Data Science позволяют реализовать проактивное управление надежностью и функциональной безопасностью сложных технических систем. Поэтому к кругу вопросов классической теории надежности, который в свое время полно сформулировал академик А.И. Берг, следует добавить, что «в современных условиях теория надежности ищет способы повышения надежности на основе оценки рисков и искусственного интеллекта».

Тематика журнала «Надежность» неразрывно связана с развитием самой науки о надежности систем и в 2020 г. будет включать разделы структурной и функциональной надежности, функциональной безопасности, отказоустойчивости и живучести систем, стандартизации и сертификации, управления рисками, а также раздел инновационных технологий в области надежности и безопасности. При этом акцентируется внимание авторов на необходимость обзора публикаций других авторов в исследуемой области, особенно зарубежных авторов. Это требование редколлегии основывается на общепринятых в мировой практике правилах.

Желаю читателям журнала «Надежность» успехов в научной и практической работе, новых оригинальных результатов.

*С уважением, главный редактор журнала,
д.т.н., профессор И.Б. Шубинский*

Особенности развития и характеристики смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта

Игорь А. Тарарычкин, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск
donbass_8888@mail.ru



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Введение. Трубопроводные транспортные системы применяются в различных отраслях промышленного производства при доставке потребителям разнообразных веществ и материалов. Если при развитии аварийной ситуации происходит последовательный переход в состояние неработоспособности случайным образом некоторого количества линейных элементов (трубопроводов), то такой сценарий развития событий называется прогрессирующим повреждением. Если в состояние неработоспособности переходят сразу несколько сходящихся в узел трубопроводов, то такой точечный элемент системы оказывается блокированным. Последовательный переход узлов системы в случайном порядке в состояние блокировки называется прогрессирующей блокировкой. Одновременное развитие в системе процессов прогрессирующего повреждения линейных элементов и блокировки транспортных узлов представляет собой смешанное повреждение. Смешанное повреждение является опасным вариантом аварийной ситуации, а его развитие приводит к быстрой деградации транспортных возможностей системы. **Целью работы** является изучение особенностей и закономерностей процесса смешанного повреждения сетевых структур трубопроводных систем, а также оценка способности таких структур противостоять его развитию. **Методы исследования.** Определение характеристик стойкости сетевых объектов к развитию процесса смешанного повреждения выполнялось с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. При этом характер воздействия на систему задавался при помощи циклограммы, целочисленные параметры которой указывают на чередование процессов последовательного повреждения линейных элементов и узлов сетевой структуры. **Результаты.** Установлено, что корректное сравнение стойкости различных сетевых структур к смешанному повреждению возможно только в отношении сопоставимых объектов. Для этого анализируемые системы должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, указанные системы должны быть подвергнуты воздействиям с одинаковой циклограммой. Показано, что соотношение стойкости сопоставимых сетевых структур не зависит от конкретного вида циклограммы смешанного повреждения, а определяется характером действующих внутрисистемных связей. **Выводы.** Смешанное повреждение представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем. Способность сетевых структур трубопроводных систем противостоять развитию процесса смешанного повреждения оценивается при помощи показателей, которые устанавливаются с использованием метода имитационного моделирования. Корректное сравнение стойкости к смешанному повреждению различных структур возможно только в случае их сопоставимости. Для этого они должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта. Кроме того, такие системы должны быть подвергнуты процедуре повреждения с одинаковой циклограммой. Соотношение стойкости сетевых структур удовлетворяющих условиям сопоставимости не зависит от принятой циклограммы повреждения, а определяется имеющимся набором внутрисистемных связей.

Ключевые слова: система, трубопровод, структура, смешанное повреждение, стойкость.

Для цитирования: Тарарычкин И.А. Особенности развития и характеристики смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта // Надежность. 2020. №1. С. 4-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-4-11>

Поступила 22.10.2019 г. / После доработки 20.12.2019 г. / К печати 20.03.2020 г.

Трубопроводные транспортные системы применяют в различных отраслях промышленного производства при доставке потребителям разнообразных веществ, продуктов и материалов [1-4]. Как правило, такие инженерные объекты характеризуются сложной сетевой структурой, наличием большого числа возможных состояний и функциональных элементов [5]. Переход в состояние неработоспособности отдельных структурных элементов представляет потенциальную опасность, как для потребителей целевого продукта, так и для окружающей среды [6-9]. Если в результате процессов, протекающих в системе или окружающей среде, происходит последовательный переход в состояние неработоспособности случайным образом некоторого количества линейных элементов (трубопроводов), то такой сценарий развития событий называется прогрессирующим повреждением [10].

В том случае, если в состояние неработоспособности переходят сразу несколько сходящихся в узел трубопроводов, то такой точечный элемент системы оказывается заблокированным. Очевидно, что прохождение транспортных потоков через заблокированный узел становится невозможным, а процесс блокировки способен нанести серьезный ущерб транспортным возможностям системы. Последовательный переход узлов системы в случайном порядке в состояние блокировки называется прогрессирующей блокировкой [11, 12].

В реальных условиях эксплуатации негативное воздействие на систему может быть связано с одновременным развитием как процессов прогрессирующего повреждения линейных элементов, так и блокировки транспортных узлов. Однако способность сетевых структур противостоять развитию смешанного повреждения, протекающего в соответствии с указанным механизмом, не изучена, а в технической литературе систематизированные данные относительно динамики этого процесса отсутствуют.

Целью настоящей работы является изучение особенностей и закономерностей процесса смешанного повреждения сетевых структур трубопроводных систем, а также оценка способности таких структур противостоять его развитию.

Будем считать, что процесс смешанного повреждения является стационарным, т.е. скорости повреждения различных структурных элементов известны (или заданы) и не меняются с течением времени.

Тогда процедуру повреждения сетевого объекта можно описать при помощи элементарного цикла T , который при развитии аварии воспроизводится многократно, до полного разрыва связей источника со всеми потребителями целевого продукта. В этих условиях для любого момента системного времени несложно установить общее количество поврежденных линейных элементов и заблокированных транспортных узлов.

Так, если динамика процесса характеризуется повреждением сначала α линейных элементов, а затем блокировкой β транспортных узлов, то циклограмма процесса смешанного повреждения $T(\alpha, \beta)$ позволяет со-

ставить полное представление о процедуре воздействия на анализируемую систему.

Таким образом, для характеристики стационарного случайного процесса смешанного повреждения сетевой структуры с использованием циклограммы достаточно указать ее целочисленные параметры α и β . В частности, если повреждение происходит по механизму блокировки транспортных узлов, то такая схема воздействия характеризуется циклограммой $T(0, 1)$. Если же реализуется сценарий прогрессирующего повреждения линейных элементов, то указанный механизм воздействия на систему характеризуется циклограммой $T(1, 0)$.

Оценка способности трубопроводной системы противостоять развитию процесса смешанного повреждения выполнялась при помощи компьютерной программы имитационного моделирования, аналогично тому, как это делалось в работах [13, 14].

При этом для заданной сетевой структуры и принятой циклограммы повреждения устанавливались следующие статистические характеристики:

1. Средняя доля линейных элементов системы ϕ_{EL} , повреждение которых приводит к разрыву связей с источником всех потребителей целевого продукта.
2. Средняя доля транспортных узлов ϕ_{UZ} , при блокировке которых в условиях смешанного повреждения происходит разрыв связей с источником всех потребителей целевого продукта.

Парные значения ϕ_{EL} и ϕ_{UZ} представляют собой проекции на координатные оси вектора Φ^* , характеризующего способность анализируемой системы противостоять развитию процесса смешанного повреждения. При этом большим значениям модуля Φ^* соответствует и большая способность системы противостоять развитию этого процесса.

Компьютерное имитационное моделирование [15-17] смешанного повреждения выполнялось при помощи вычислительной системы MathCAD [18] в соответствии со следующей схемой:

1. Исходная сетевая структура трубопроводной системы задается квадратной матрицей смежности, аналогично тому, как это делается в работах [19, 20].
2. Если в рассматриваемый момент системного времени происходит повреждение одного линейного элемента, то в соответствующей бинарной матрице смежности обнуляются все элементы, расположенные в случайно выбранной i -й строке. Если же в заданный момент системного времени блокируется транспортный узел, то производится обнуление всех элементов случайно выбранной i -ой строки и i -го столбца соответствующей матрицы смежности.

3. Для каждого момента системного времени строятся соответствующие матрицы достижимости, необходимые для определения наличия связи узла-источника с каждым из потребителей целевого продукта. Процедура повреждения сетевого объекта завершается после того, как все потребители утрачивают связь с узлом-источником.

4. Поскольку процедура смешанного повреждения задается циклограммой с известными значениями параметров α и β , то определение момента системного времени, при котором наступает разрыв связи с источником всех потребителей продукта, позволяет установить общее количество как поврежденных линейных элементов, так и заблокированных транспортных узлов.

Их соответствующие доли представляют собой случайные величины, полученные в ходе реализации одного акта воздействия на систему по механизму смешанного повреждения. Для определения статистических характеристик процесса повреждения указанную процедуру воздействия необходимо повторять многократно, в соответствии с принятой циклограммой.

При выполнении расчетов для выборок объемом 10^4 элементов устанавливались средние значения φ_{EL} и φ_{UZ} , а также характеристики их рассеяния. Принятый объем выборки позволяет оценивать полученные характеристики стойкости как имеющие 2 значащие цифры после запятой, что оказывается достаточным для сравнения свойств анализируемых в работе сетевых структур [21].

Отметим, что возможность сравнения стойкости к смешанному повреждению существует только в отношении сопоставимых сетевых структур.

Требования по сопоставимости структур связаны с необходимостью выполнения следующих условий:

1. Сетевые объекты должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов, а также потребителей целевого продукта.
2. Сравниваемые объекты должны быть подвергнуты смешанному повреждению подобным способом, т.е. иметь одну и ту же циклограмму повреждения.

Рассмотрим в этой связи особенности смешанного повреждения некоторой совокупности сопоставимых сетевых структур.

Так, на рис. 1 показаны структурные схемы трубопроводных систем SMA, ..., SMF с источником целевого продукта A и потребителями $B, \dots, I$ обладающие разной стойкостью к смешанному повреждению.

Все они имеют в своем составе одинаковое количество узлов R , ребер Z и потребителей целевого продукта U . Для корректного сравнения характеристик стойкости этих систем требуется обеспечить одинаковые условия их повреждения.

Установленные в этом случае значения φ_{EL} и φ_{UZ} позволяют составить представление о способности анализируемых систем противостоять развитию процесса смешанного повреждения. Характеристики стойкости, полученные для различных условий повреждения, приведены на рис. 2.

Сравнение стойкости структур к смешанному повреждению возможно только при движении вдоль направлений, указанных на графике стрелками, поскольку именно в этом случае параметры соответствующих циклограмм α и β остаются неизменными. Видно, что по мере перехода от SMA к SMB и далее к SMF стойкость анализируемых структур непрерывно снижается, независимо от характеристик используемой циклограммы повреждения.

Это означает, что для произвольной совокупности сопоставимых сетевых структур соотношение их стойкости не зависит от конкретных условий смешанного повреждения. Вследствие этого можно утверждать, что любые структурные вариации, направленные на повышение стойкости систем к смешанному повреждению,

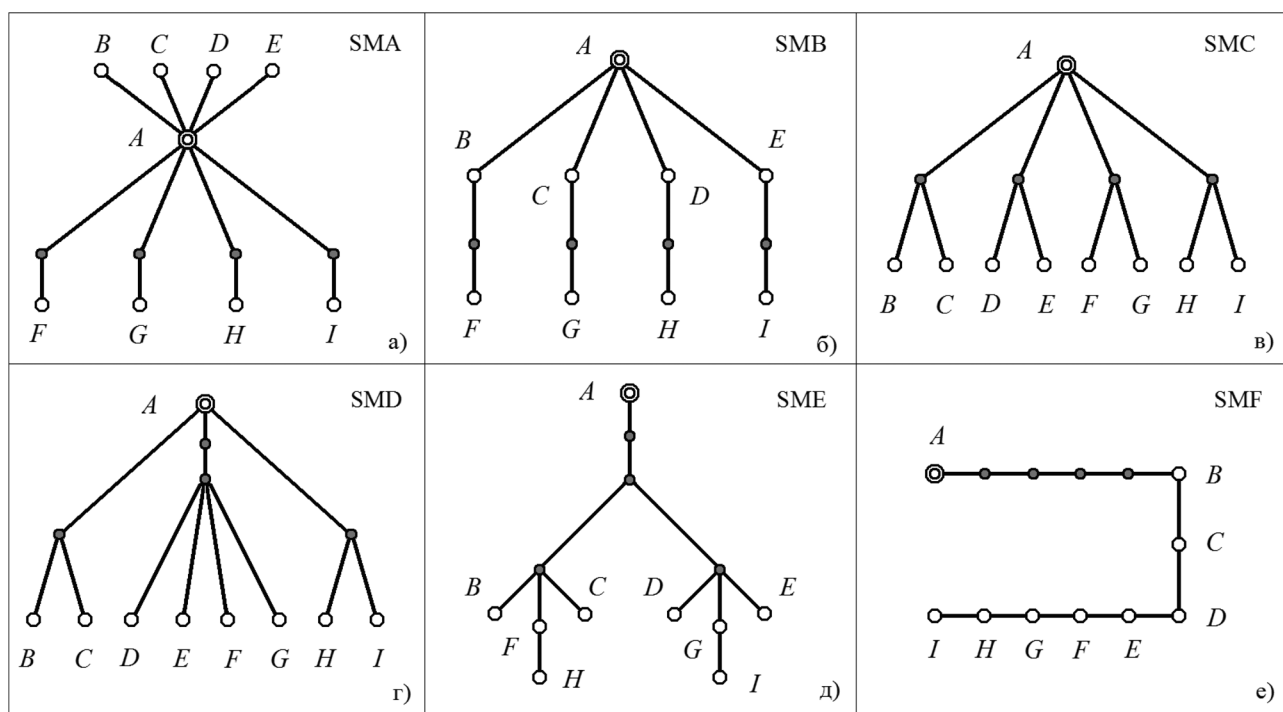


Рисунок 1. Структурные схемы SMA (a), ... SMF (e) систем трубопроводного транспорта

дению, положительно влияют на ее поведение при возникновении аварии, независимо от конкретного вида реализуемой на практике циклограммы. Кроме того, представленные на рис. 2 данные позволяют заключить, что блокировка транспортных узлов является наиболее опасным сценарием повреждения сетевого объекта.

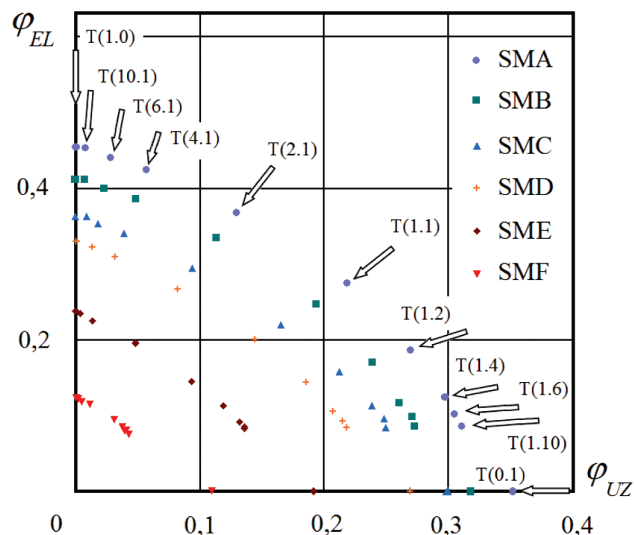


Рисунок 2. Значения φ_{EL} и φ_{UZ} , установленные для совокупности структур SMA, ..., SMF

В этой связи представляет интерес оценка изменения значений φ_{EL} и φ_{UZ} у совокупности сопоставимых сетевых структур с различной стойкостью к смешанному повреждению, например, по мере перехода от SMA к SMF.

Для того чтобы проследить такую динамику, необходимо для структуры SMA, обладающей наибольшей стойкостью, подобрать такую циклограмму повреждения, при реализации которой соблюдается условие $\varphi_{EL} = \varphi_{UZ}$. В этом случае снижение характеристик стойкости систем по мере перехода от SMA к SMF будет происходить с одинаковых стартовых позиций. Выполнение указанного условия позволяет составить представление о том, как структурные вариации влияют на изменение вклада отдельных составляющих в итоговую стойкость сетевых структур к смешанному повреждению.

В результате серии поисковых вычислительных экспериментов, выполненных в отношении структуры SMA, установлено, что примерное равенство $\varphi_{EL} \approx \varphi_{UZ}$ достигается в случае использования циклограммы T(3.8). Изменение положения на плоскости вектора $\vec{\Phi}^*$ при реализации процедуры смешанного повреждения T(3.8) в отношении совокупности сопоставимых сетевых структур SMA, ..., SMF показано на рис. 3. При этом величина модуля вектора $\vec{\Phi}^*$ определяется так:

$$|\vec{\Phi}^*| = \sqrt{\varphi_{EL}^2 + \varphi_{UZ}^2}.$$

Снижение значений отдельных составляющих (осевых проекций вектора $\vec{\Phi}^*$) φ_{EL} и φ_{UZ} по мере перехода от SMA к менее стойким сетевым структурам показано

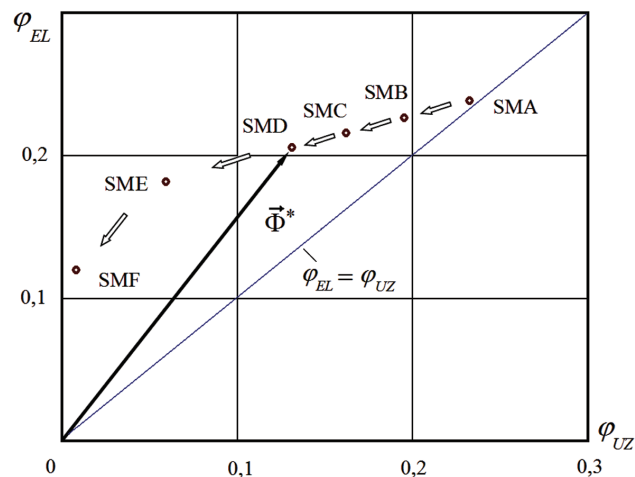


Рисунок 3. Характеристика стойкости к смешанному повреждению сетевых структур при помощи вектора $\vec{\Phi}^*$

на рис. 4. Поскольку для структуры SMA выполняется условие $\varphi_{EL} \approx \varphi_{UZ}$, то высота соответствующих столбцов на диаграмме оказывается примерно одинаковой.

Кроме того видно, что при последовательном переходе от SMA к менее стойким сетевым структурам наблюдается сравнительно медленное снижение значений φ_{EL} . При этом снижение значений φ_{UZ} происходит резко, что в значительной мере и обуславливает наблюдаемый эффект понижения стойкости.

Таким образом, полученный результат позволяет заключить, что обеспечивать стойкость систем к смешанному повреждению целесообразно, прежде всего, за счет реализации мероприятий, направленных на повышение их стойкости к прогрессирующей блокировке транспортных узлов.

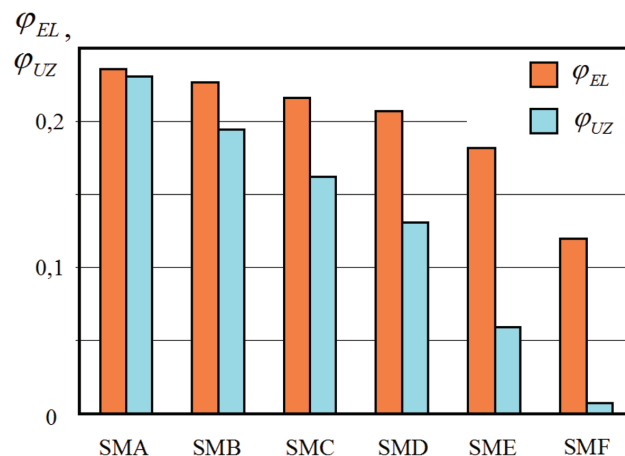


Рисунок 4. Диаграммы изменения значений φ_{EL} и φ_{UZ} по мере перехода от SMA к SMF

Укажем также и на следующую особенность, установленную по результатам анализа данных рис. 2. Если смешанное повреждение некоторой совокупности сетевых структур оказывается близким к процедуре прогрессирующей блокировки транспортных узлов ($\beta \gg \alpha$) или к процессу повреждения линейных элементов ($\alpha \gg \beta$),

то соответствующие точки на графике располагаются слишком близко, что затрудняет оценку полученного результата.

По этой причине определение способности системы противостоять развитию смешанного повреждения следует осуществлять, используя в качестве тестовой нагрузки с циклограммой типа $T(1.1)$. Такое воздействие представляет собой последовательное чередование случайных повреждений линейных и точечных элементов системы и в этом смысле является сбалансированным. Тогда сравнение стойкости сопоставимых сетевых структур целесообразно производить для условий их повреждения с циклограммой $T(1.1)$.

Предположим, требуется оценить способность противостоять развитию процесса смешанного повреждения трубопроводных систем, структурные схемы которых показаны на рис. 5. Указанные системы характеризуются наличием источника A , одинакового количества транспортных узлов, линейных элементов, а также потребителей целевого продукта ($B, \dots, G$). Оценим их стойкость для различных условий смешанного повреждения.

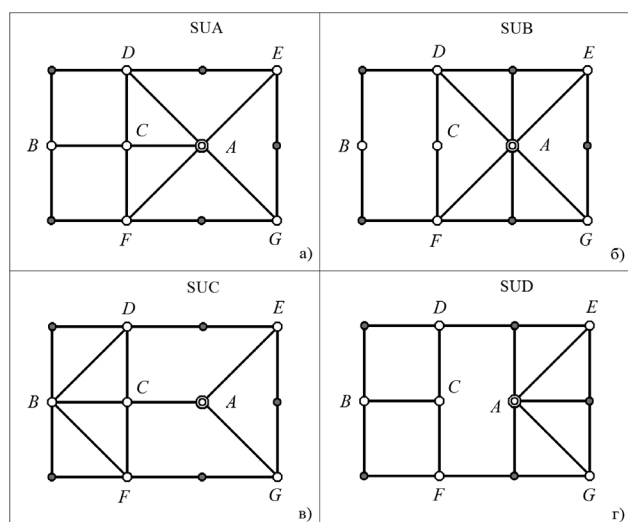


Рисунок 5. Структурные схемы SUA (а), ..., SUD (г) систем трубопроводного транспорта

Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 6 и позволяют заключить, что стойкость к повреждению непрерывно снижается по мере перехода от системы с условным обозначением SUA к системе SUB и далее от SUC к SUD.

Кроме того, на плоскости можно указать условную границу областей различными механизмами повреждения сетевых структур. Так, для области Ω_E значений φ_{EL} и φ_{UZ} повреждение происходит в основном за счет перехода в состояние неработоспособности линейных элементов, а для области Ω_U блокируются в основном транспортные узлы.

Если для циклограммы $T(\alpha, \beta)$ выполняется условие $\alpha \gg \beta$, то такой характер воздействия на сетевой объект связан с повреждением преимущественно линейных

элементов. Тогда требования к сопоставимости можно несколько ослабить и считать такими системы, у которых совпадает только общее число линейных элементов и потребителей целевого продукта. Если указанные системы подвергаются повреждению с одинаковой циклограммой, то расчетные значения φ_{EL} следует использовать как критерии, позволяющие оценить их стойкость к смешанному повреждению.

Если же циклограмма характеризуется соотношением параметров $\beta \gg \alpha$, то такое воздействие на систему связано с повреждением преимущественно транспортных узлов.

В этих условиях сопоставимыми будут системы с совпадающим количеством узлов и потребителей целевого продукта.

Если такие объекты подвергаются повреждению с одинаковой циклограммой, то установленные значения φ_{UZ} представляют собой критерии, характеризующие их стойкость к смешанному повреждению.

Таким образом, снятие некоторых ограничений при определении сопоставимости сетевых объектов для специфических условий смешанного повреждения позволяет выполнять анализ и решать более широкий круг задач прикладного характера.

Предположим, требуется оценить стойкость и принять проектное решение в отношении практического использования одной из альтернативных сетевых структур, показанных на рис. 7, при наличии угрозы смешанного повреждения.

Все эти объекты имеют одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта ($B, \dots, G$). При смешанном повреждении указанных структур с циклограммой $T(1.1)$ сравнение значений $|\Phi^*|$ позволяет оценить соотношение их стойкости. Именно эту особенность и следует использовать при обосновании и принятии проектного решения.

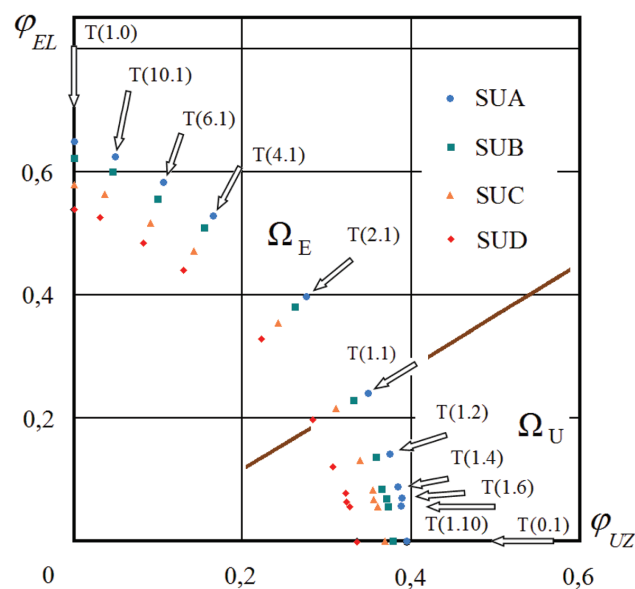


Рисунок 6. Характеристики стойкости, установленные для сетевых структур SUA, ..., SUD

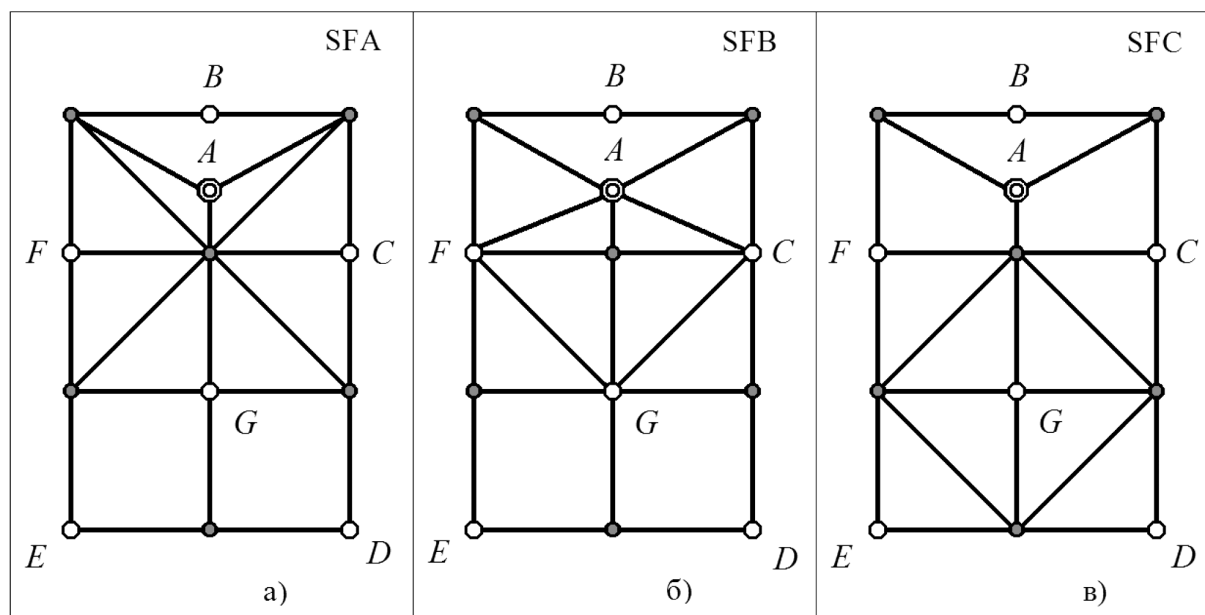


Рисунок 7. Структурные схемы SFA (а), ..., SFC (в) систем трубопроводного транспорта

Так, в табл. 1 приведены соответствующие расчетные значения, позволяющие заключить, что при смешанном повреждении (независимо от конкретных условий воздействия) наибольшей стойкостью характеризуется структура с условным обозначением SFB, которую и следует рассматривать как результат решения поставленной задачи.

Таблица 1. Характеристики стойкости сопоставимых сетевых структур для принятых условий смешанного повреждения

Обозначение структуры	Обозначение циклограммы смешанного повреждения	Расчетные характеристики стойкости		
		Φ_{EL}	Φ_{UZ}	$ \vec{\Phi}^* $
SFA	T(1.1)	0,168	0,288	0,333
SFB		0,187	0,323	0,373
SFC		0,167	0,286	0,331

При этом сетевые структуры SFA и SFC имеют примерно одинаковую стойкость, поскольку у них практически совпадают соответствующие значения модуля вектора $\vec{\Phi}^*$.

Предположим теперь, что выбранная сетевая структура SFB находится под угрозой внешнего воздействия, связанного с повреждением преимущественно транспортных узлов. Оценим возможность повышения ее стойкости за счет изменения структурного состава и использования дополнительных линейных элементов. Такая производная структура с условным обозначением SFW, показана на рис. 8 (а).

Сопоставление характеристик стойкости систем SFB и SFW для принятых условий повреждения возможно, поскольку у них совпадает общее число узлов, а также потребителей целевого продукта. Применим в отноше-

нии этих систем процедуру смешанного повреждения, например, с циклограммой T(1.3). Значения, установленные по результатам имитационного моделирования, приведены в табл. 2.

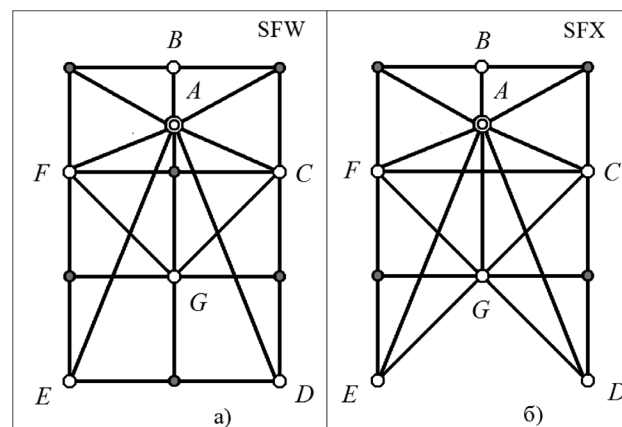


Рисунок 8. Структурные схемы систем, полученные при включении в состав SFB дополнительных линейных элементов (а) и исключения из ее состава узлов (б)

Видно, что включение в состав системы SFB дополнительных трубопроводов позволяет повысить ее стойкость при повреждении преимущественно точечных элементов.

Если же в процессе эксплуатации система SFB находится под угрозой повреждения преимущественно линейных элементов, то представляет интерес поиск решений, позволяющих положительным образом повлиять на ее стойкость для указанных условий воздействия.

Уменьшим число узлов в системе SFB до уровня $R = 11$, сохранив при этом общее количество линейных элементов ($Z = 23$) и потребителей продукта ($U = 6$).

Таблица 2. Расчетные характеристики стойкости сетевых структур

Обозначение структуры	Состав структурных элементов	Обозначение циклограммы повреждения	Характеристики стойкости	
			Φ_{UZ}	Φ_{EL}
SFB	$R=13, Z=23, U=6$	$T(1.3)$	0,349	-
		$T(3.1)$	-	0,413
SFW	$R=13, Z=26, U=6$	$T(1.3)$	0,391	-
SFX	$R=11, Z=23, U=6$	$T(3.1)$	-	0,454

Таблица 3. Условия сопоставимости и критерии оценки стойкости сетевых структур

Особенности повреждения	Параметры циклограммы	Условия сопоставимости сетевых структур	Критерии оценки стойкости систем
Сбалансированное повреждение структурных элементов	$\alpha = \beta = 1$	Одинаковое количество линейных элементов, узлов и потребителей продукта	$ \tilde{\Phi}^* = \sqrt{\Phi_{EL}^2 + \Phi_{UZ}^2}$
Повреждение преимущественно линейных элементов	$\alpha \gg \beta$	Одинаковое количество линейных элементов и потребителей продукта	$0 < \Phi_{EL} < 1$
Преимущественная блокировка транспортных узлов	$\beta \gg \alpha$	Одинаковое количество узлов и потребителей продукта	$0 < \Phi_{UZ} < 1$

Структура такой трубопроводной системы с условным обозначением SFX показана на рис. 8 (б). Сравнение стойкости систем SFB и SFX возможно после определения соответствующих значений для принятых условий повреждения преимущественно линейных элементов. Так, полученные в результате имитационного моделирования значения для каждой из анализируемых сетевых структур, повреждаемых в соответствии с принятой циклограммой $T(3.1)$, приведены в табл. 2. Видно, что структурные изменения, реализуемые при переходе к схеме SFX, положительным образом влияют на стойкость системы и рекомендуются к практическому применению.

Таким образом, при оценке стойкости к смешанному повреждению некоторой совокупности сопоставимых сетевых структур необходимо в условиях тестового воздействия с характеристиками $\alpha = \beta = 1$ установить соответствующие значения $|\tilde{\Phi}^*|$. Тогда упорядочение рассматриваемых систем с точки зрения их стойкости к смешанному повреждению выполняется с учетом того, что более стойким системам соответствуют и большие значения $|\tilde{\Phi}^*|$. Именно этот критерий и следует использовать на практике при решении проектных задач.

Однако в некоторых случаях специфика повреждающего воздействия позволяет несколько ослабить установленный перечень требований и расширить тем самым возможности сравнительной оценки свойств анализируемых систем.

Так, в табл. 3 представлены рекомендации по условиям сопоставимости и выбору критериев оценки стойкости систем для различных вариантов реализации процедуры смешанного повреждения. Их практическое значение связано с возможностью расширения области

применения установленных закономерностей и полученных теоретических результатов.

Выводы

1. Смешанное повреждение представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем.

2. Способность сетевых структур трубопроводных систем противостоять развитию процесса смешанного повреждения оценивается при помощи показателей Φ_{EL} , Φ_{UZ} и $|\tilde{\Phi}^*|$, которые устанавливаются с использованием метода имитационного моделирования.

3. Корректное сравнение стойкости к смешанному повреждению различных структур возможно только в случае их сопоставимости. Для этого они должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта. Кроме того, такие системы должны быть подвергнуты процедуре повреждения с одинаковой циклограммой.

4. Соотношение стойкости сетевых структур, удовлетворяющих условиям сопоставимости, не зависит от принятой циклограммы повреждения, а определяется имеющимся набором внутрисистемных связей.

Библиографический список

1. **Barker, Geoff.** The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries [Text] / G. Barker. – Gulf Professional Publishing, 2018. – 532p.
2. **Bahadori, Alireza.** Hazardous Area Classification in Petroleum and Chemical Plants. A Guide to Mitigating Risk [Text] / A. Bahadori. – CRC Press, 2017. – 564 p.

3. **Toghraei, Moe.** Piping and Instrumentation Diagram Development [Текст] / M. Toghraei. – John Wiley & Sons, Inc, 2019. – 461 p.

4. Wilson, Bob. Detail Engineering and Layout of Piping Systems [Текст] / B. Wilson. – Titles on Demand, 2015. – 464 p.

5. **Бочков, А.В.** Научно-методические основы мониторинга и прогнозирования состояния производственной безопасности ПАО «Газпром» [Текст] / А.В. Бочков, Д.В. Пономаренко // Газовая промышленность. – 2017. – № 3 (749). – С. 20–30.

6. Critical Infrastructure Security. Assessment, Prevention, Detection, Response [Текст] / Edited by Francesco Flammini. – WIT Press, UK, 2012. – 326 p.

7. **Рябинин, И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

8. **Иванцов, О.М.** Безопасность трубопроводных систем [Текст] / О.М. Иванцов, И.И. Мазур. – М.: Елима, 2004. – 1104 с.

9. **Бочков, А.В.** Проблемы оценки опасностей и управления рисками объектов критически важной инфраструктуры Группы «Газпром» [Текст]: аналитический обзор / А.В. Бочков // Вести газовой науки. – 2018. – № 2 (34). – С. 51–87.

10. **Тарарычкин, И.А.** Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры [Текст] / И.А. Тарарычкин // Надежность. – 2018. – Т 18. – № 1. – С. 26–31.

11. **Тарарычкин, И.А.** Развитие аварий и защита от повреждений структурных элементов систем трубопроводного транспорта [Текст] / И.А. Тарарычкин // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 12. – С. 65–70.

12. **Тарарычкин, И.А.** Характеристика и сравнительный анализ стратегий защиты трубопроводных систем от повреждения транспортных узлов [Текст] / И.А. Тарарычкин // Газовая промышленность. – 2019. – № 2. – С. 72–77.

13. **Тарарычкин, И.А.** Компьютерное моделирование развития аварий и повреждения структурных элементов систем трубопроводного транспорта [Текст] / И.А. Тарарычкин // Технологии нефти и газа. – 2019. – № 2. – С. 53–59.

14. **Тарарычкин, И.А.** Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур [Текст] / И.А. Тарарычкин, С.П. Блинов // Мир транспорта. – 2017. – Том 15. – № 2. – С. 6–19.

15. **Зарубин, В.С.** Математическое моделирование в технике [Текст]: Учеб. для вузов / В.С. Зарубин: под

ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко: 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с.

16. **Куприяшкин, А.Г.** Основы моделирования систем [Текст]: учебное пособие / А.Г. Куприяшкин. – Норильск: Норильский индустр. ин-т, 2015. – 135 с.

17. **Строгалева, В.П.** Имитационное моделирование [Текст]: Учебное пособие / В.П. Строгалева, И.О. Толкачева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 280 с.

18. **Охорзин, В.А.** Компьютерное моделирование в системе Mathcad [Текст] / В.А. Охорзин. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 144 с.

19. **Тарарычкин, И.А.** Моделирование процесса прогрессирующего повреждения трубопроводных транспортных систем с защищенными линейными элементами [Текст] / И.А. Тарарычкин, С.П. Блинов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Вып. 1 (111). – С. 75–85.

20. **Тарарычкин, И.А.** Особенности повреждения сетевых структур и развития аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта [Текст] / И.А. Тарарычкин, С.П. Блинов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 35–39.

21. **Худсон, Д.** Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике [Текст]. / Д. Худсон: пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 295 с.

Сведения об авторе

Игорь А. Тарарычкин – доктор технических наук, профессор, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск, e-mail: donbass_8888@mail.ru

Вклад автора в статью

Автором выполнен анализ стойкости систем трубопроводного транспорта в условиях развития процесса смешанного повреждения структурных элементов. Определены статистические характеристики процесса и условия сопоставимости систем при случайном повреждении линейных и точечных элементов.

Проведено имитационное компьютерное моделирование процесса смешанного повреждения и установлены характеристики, позволяющие оценить способность различных систем противостоять развитию этого процесса. Предложен метод сравнительной оценки стойкости сопоставимых сетевых структур при возможном развитии аварийной ситуации по механизму смешанного повреждения.

План испытаний с добавлением. Эффективные оценки показателей надежности

Виктор С. Михайлов, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева», Российская Федерация, Москва
Mvs1956@list.ru



Виктор С.
Михайлов

Резюме. Цель работы – повышение эффективности оценок показателей надежности для плана испытаний с добавлением: вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа. Исходя из экономических соображений, для определительных испытаний на надежность высоконадежных, дорогостоящих изделий выставляют минимум изделий, планируя получить безотказные испытания или испытания с одним отказом, тем самым минимизируя количество испытуемых изделий. Наиболее интересен последний случай. Выбирая конкретные величины приемочного числа Q и количества испытуемых изделий, испытатель делает предварительную оценку показателя надежности, а выбирая $Q = 1$, испытатель минимизирует риски от возникновения маловероятного случайного отказа. Однако с ростом величины Q растет и количество испытуемых изделий, что делает испытания дорогостоящими. Поэтому сокращение количества изделий при испытаниях на надежность является проблемой номер один и, в связи с этим, потребность в экономичном плане испытаний с добавлением возрастает. Будем рассматривать биномиальные испытания (первоначальная выборка) с добавлением одного изделия (дополнительная выборка) на испытания при отказе любого из первоначально выставленных испытуемых изделий. Испытания заканчиваются, когда заканчиваются испытания всех выставленных изделий с любым исходом (в первичной и дополнительной выборках). Здесь и далее имеется в виду, что время испытаний одно и то же для всех изделий. Испытания с приемочным числом отказов больше нуля ($Q > 0$), проводимые по схеме испытаний с добавлением, позволяют сократить число испытуемых изделий за счет успешно проведенных испытаний на первоначальной выборке. **Методы.** В основе поиска эффективных оценок лежит интегральный подход сформулированный во многих работах. В основе интегрального подхода лежит построение правила выбора эффективной оценки $\hat{\theta}_0(\tau; n; k, m)$, заданного на сумме значений абсолютных (или относительных) смещений оценок $\hat{\theta}(n; k, m)$, выбранных из некоторого множества, от параметра закона распределения, где n – количество изделий, первоначально выставленных на испытания. Критерий выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) на множестве оценок $\hat{\theta}(\tau; n; k, m)$, основан на суммарном квадрате абсолютных (или относительных) смещений математического ожидания оценок $E\hat{\theta}(\tau; n; k, m)$ от вероятности отказа p для всех возможных значений p , n . **Выводы.** Проведено исследование оценок вероятности безотказной работы для плана испытаний с добавлением. Для варианта $n > 3$ оценки $\hat{P} = 1 - \hat{p} = 1 - \frac{r}{n+k}$ и составная оценка $1 - \bar{p}(\hat{v}(\beta = 0,5))$ являются более эффективными в сравнении с оценкой $1 - \hat{v}(\beta = 0,5)$. Составную оценку вероятности безотказной работы $1 - \bar{p}(\hat{v}(\beta = 0,5))$ следует использовать для безотказных испытаний. Для варианта $n > 3$ испытания с приемочным числом отказов больше нуля ($Q > 0$), проводимые по схеме испытаний с добавлением, позволяют сократить число испытуемых изделий за счет успешно проведенных испытаний на первоначальной выборке. Составная оценка средней наработки до отказа $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \bar{p}(k, m, n, \beta = 0,6))}$ является эффективной по смещению среди предложенных оценок средней наработки до отказа. Полученные составные оценки $\bar{p}$ и $\hat{T}_1$ имеют направленность практического применения для безотказных испытаний, проводимых по плану испытаний с добавлением.

Ключевые слова: схема Бернулли, план испытаний, точечная оценка, вероятность безотказной работы, эффективная оценка, средняя наработка до отказа.

Для цитирования: Михайлов В.С. План испытаний с добавлением. Эффективные оценки показателей надежности // Надежность. 2020. №1. С. 12-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-12-19>

Поступила 09.09.2019 г. / После доработки 14.12.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

Введение

Исходя из экономических соображений, для определенных испытаний на надежность высоконадежных, дорогостоящих изделий выставляют минимум изделий, планируя получить безотказные испытания (приемочное число $Q = 0$) или испытания с одним отказом ($Q = 1$), тем самым минимизируя количество испытываемых изделий. Наиболее интересен последний случай. Выбирая конкретные величины приемочного числа Q и количества испытываемых изделий, испытатель делает предварительную оценку показателя надежности, а выбирая $Q = 1$, испытатель минимизирует риски от возникновения маловероятного случайного отказа. Однако, с ростом величины Q растет и количество испытываемых изделий, что делает испытания дорогостоящими. Поэтому сокращение количества изделий при испытаниях на надежность является проблемой номер один и, в связи с этим, потребность в экономичном плане испытаний с добавлением возрастает [1].

Формулировка плана испытаний с добавлением

Будем рассматривать биномиальные испытания (первоначальная выборка) [1, 2] с добавлением одного изделия (дополнительная выборка) на испытания при отказе любого из первоначально выставленных испытываемых изделий. Испытания заканчиваются, когда заканчиваются испытания всех выставленных изделий с любым исходом (в первичной и дополнительной выборках). Здесь и далее имеется в виду, что время испытаний одно и то же для всех изделий.

Испытания с приемочным числом отказов больше нуля ($Q > 0$), проводимые по схеме испытаний с добавлением, позволяют сократить число испытываемых изделий за счет успешно проведенных испытаний на первоначальной выборке.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности оценок показателей надежности для плана испытаний с добавлением: вероятности безотказной работы (далее – ВБР), средней наработки до отказа (далее – СНДО).

Свойства оценок вероятности безотказной работы для плана испытаний с добавлением

Пусть n – число испытываемых однотипных изделий, первоначально выставленных на испытания, а $R=r$ – число отказавших изделий, включающее k отказов из n первоначально выставленных на испытания изделий и m отказов из k вторично выставленных на испытания изделий, т.е. $r=k+m$. Тогда число испытываемых изделий составит $N=n+k$. Для удобства написания формул в некоторых случаях (там, где это возможно) обозначения случайных

величин и их реализаций будут совпадать. Пусть отказы являются независимыми событиями, тогда вероятность возникновения ровно r отказов за испытания (далее – $P_n(R=r)$) выразится формулой, которая получается из следующей процедуры ($n \geq k \geq m; r = k + m \leq 2n$):

$$P_k(m) := C_k^m p^m q^{k-m};$$

$$P_n(k) := C_n^k p^k q^{n-k} \sum_{m=0}^k P_k(m) = C_n^k p^k q^{n-k},$$

где $q=1-p$, p – вероятность отказа, C_n^k – число сочетаний k из n элементов.

$$P_n(k, m) := P_n(k) P_k(m) = C_n^k C_k^m p^{k+m} q^{n-m},$$

$$P_n(R=r) = \sum_{k=0}^n \sum_{m: m+k=r, m \leq k} P_n(k, m),$$

$$r = k + m = 0, 1, 2, \dots, 2n; k = 0, 1, 2, \dots, n; \\ m : m + k = r, m \leq k.$$

Из определения вероятности $P_n(k=x, m=y) = P_n(k=x) P_n(m=y)$, где $x, y = 0, 1, 2, \dots, n$ и $P_n(R=r)$ легко получить вероятностную функцию плана испытаний с добавлением:

$$P_n \sum (k \leq x, m \leq y) = \sum_{k=0}^x \sum_{m: m+k \leq x+y, m \leq k, m \leq y} P_n(k, m). \quad (1)$$

Среднее число испытываемых изделий за время испытаний с добавлением состоит из количества первоначально выставленных на испытания изделий и среднего числа отказавших из первоначально выставленных на испытания изделий, т.е. $N=n+np$. Тогда среднее число за время испытаний с добавлением составит $E(R, n) = Np = E(k, n) + E(m, n) = np + np \cdot p = (n+np)p = n(p+p^2)$.

Оценка ВБР $\hat{p} = \frac{r}{n+k}$ является эффективной для плана испытаний с добавлением [1]. Изучим свойства полученной оценки $\hat{p} = \frac{r}{n+k}$ и, как следствие, оценки ВБР $\hat{P} = 1 - \hat{p} = 1 - \frac{r}{n+k} = \frac{n-m}{n+k}$ [1].

Пусть $k+m=r>1$, $\hat{p} = \frac{r}{n+k} = \frac{r}{n+r-m}$, тогда для различных $m_1 > m_2$ выполняется неравенство

$$\hat{p}(k_1 + m_1 = r; k_1, m_1) = \frac{r}{n+r-m_1} > \\ > \hat{p}(k_2 + m_2 = r; k_2, m_2) = \frac{r}{n+r-m_2}. \quad (2)$$

Т.е. надежность контролируемой партии изделий по результатам испытаний выборки, в которой количество отказавших из первоначально выставленных испытываемых изделий больше, чем в выборке сравниваемой партии изделий при одном и том же количестве отказов,

всегда будет выше, чем у этой сравниваемой партии изделий. Т.е. при сравнении результатов двух окончательно сформированных выборок (при равенстве в количестве отказов) приоритет в надежности отдается тем изделиям, чьи отказы в основном произошли в первоначально выставленной выборке, а не в дополнительной. И, в этом смысле, дополнительная выборка дает шанс на реабилитацию при неудачных первичных испытаниях. И в этом преимущество плана испытаний с добавлением.

Несмещенные оценки

Математическое ожидание оценки $\hat{p}(n; k, m) = \frac{r}{n+k}$ выразится формулой [1]:

$$E(\hat{p}(n; k, m)) = \sum_{r=0}^{2^n} \frac{r}{n+k} P_n(r).$$

Оценка $\hat{p}(n; k, m) = \frac{r}{n+k}$ – в общем виде смещенная $E(\hat{p}(n; k, m)) \neq p$ [1].

Приравняв математическое ожидание оценки $\hat{p}(n=1)$ параметру p легко получить несмещенную оценку вероятности отказа $\hat{p}_1$ для случая $n=1$ [1]:

$$\hat{p}_1 = \begin{cases} 0, r=0 \\ 1, r>0 \end{cases} = \begin{cases} 0, r=0, k=0, m=0; \\ 1, r=1, k=1, m=0; \\ 1, r=2, k=1, m=1. \end{cases}$$

Несмещенная оценка представляет из себя индикаторную функцию, т.е. в случае появления отказов оценка $\hat{p}_1$ становится равной единице, в противном случае – нулю. Вариант, когда $n=1$, для практики не интересен, т.к. совпадает с биномиальным планом, и, поэтому, в настоящей работе, далее рассматриваться не будет.

Математическое ожидание оценки $\hat{p}(n=2) = \frac{r}{2+k}$:

$$n=2: E(\hat{p}) = \sum_{r=0}^4 \hat{p}(r) P(n=2, R=r).$$

Несмещенная оценка для параметра p в случае $n=2$ выразится формулой [1]:

$$\hat{p}_2(k, m) \equiv \begin{cases} p_{00} = 0, r=0, k=0, m=0; \\ p_{10} = 1/2, r=1, k=1, m=0; \\ p_{11} = 5/8, r=2, k=1, m=1; \\ p_{20} = 6/8, r=2, k=2, m=0; \\ p_{21} = 7/8, r=3, k=2, m=1; \\ p_{22} = 1, r=4, k=2, m=2. \end{cases}$$

Эта оценка не единственная. Второй вариант оценки параметра p для случая $n=2$ [1]:

$$\begin{aligned} \hat{w}_2(r): \hat{w}_2(0) &= 0; \hat{w}_2(1) = \frac{1}{2}; \\ \hat{w}_2(2) &= \frac{2}{3}; \hat{w}_2(3) = \frac{5}{6}; \hat{w}_2(4) = 1. \end{aligned}$$

Несмещенная оценка вероятности отказа для случая $n=3$ ($\hat{w}_3(r)$) [1]:

$$\begin{aligned} \hat{w}_3(r): \hat{w}_3(0) &= 0; \hat{w}_3(1) = \frac{1}{3}; \hat{w}_3(2) = \frac{1}{2}; \hat{w}_3(3) = \frac{9}{14}; \\ \hat{w}_3(4) &= \frac{65}{84}; \hat{w}_3(5) = \frac{75}{84}; \hat{w}_3(6) = 1. \end{aligned}$$

Оценки $\hat{p}, \hat{p}_2, \hat{w}_2(r), \hat{w}_3(r)$ становятся бесполезными, когда необходимо оценить неизвестный параметр p величиной отличной от нуля и единицы.

Введем понятие центрируемой оценки [1, 7] (не путать с центральными оценками [4]), а именно: пусть оценка вероятности отказа (далее – $\hat{v}$) центрирует вероятностную функцию (в нашем случае – $P_n \Sigma(x, y)$)

относительно предельных границ изменения ее значений. Это означает, что интервалы $[0; \hat{v}]$ и $[\hat{v}; 1]$ значений этих оценок с вероятностью равной 0,5 накрывают оцениваемый параметр p . Такие оценки будем называть центрируемыми. Заметим, что центрируемые оценки для некоторых планов испытаний близки к эффективным оценкам [7]. В нашем случае центрируемая оценка $\hat{v}(\beta = 0,5)$ находится из выражения: $P_n \Sigma(x, y) = \beta = 0,5$, где β уже не несет в себе смысл доверительной вероятности. Заметим также, что закон распределения статистики $\hat{v}$ определяется законом распределения случайной величины R , что позволяет определять доверительные границы.

Из определения центрируемой оценки следует, что она определяет нижнюю (верхнюю) доверительную границу (далее – НДГ (ВДГ)) интервала неизвестного параметра p с доверительной вероятностью $\gamma = 0,5$ или уровнем значимости $\alpha = 0,5$. С другой стороны, любую оценку НДГ (ВДГ) интервала неизвестного параметра p можно трактовать как точечную оценку параметра p с сильным смещением вниз (вверх). НДГ (далее – $\hat{p}_n$) (ВДГ (далее – $\hat{p}_e$)) интервала неизвестного параметра p с доверительной вероятностью $\gamma = 1 - \alpha$ вычисляются по формулам (случай монотонного убывания [1]):

$$P_n \Sigma(x, y, \hat{p}_n) = \gamma, P_n \Sigma(x, y, \hat{p}_e) = \alpha. \quad (3)$$

Заметим, что центрируемые оценки близки по своей эффективности к лучшим оценкам [7-9], и что, несмотря на оптимистическое определение центрируемой оценки $\hat{v}(\beta = 0,5)$, эта оценка является смещенной относительно оцениваемого параметра $L(\hat{v}(n; r; \beta = 0,5)) > 0$. Однако это смещение можно уменьшить, а значит и улучшить эффективность [9]. Для этого достаточно минимизировать функционал $L(\hat{v}(n; r))$ варьируя величиной вероятности $\beta = 0,5 + x$ в выражении $P_n \Sigma = 0,5 + x$, где $x > 0$ – некоторое положительное вещественное число. Полученная таким образом оценка (далее – $\hat{v}(\beta = 0,5 + x)$)

) уже не является центрируемой, но имеет меньшее смещение в сравнении с центрируемой оценкой $\hat{v}(\beta = 0,5)$, а следовательно, от оценки $\hat{v}(\beta = 0,5 + x)$ можно ожидать и большую эффективность.

Заметим, что функция $P_{n\Sigma}$ монотонно убывает с ростом p (доказано для случаев $n < 3$) [1], а следовательно, уравнение

$$P_{n\Sigma} = \beta = 0,5 + x$$

имеет единственное решение. Заметим еще раз, что вероятность β уже не несет в себе смысл доверительной вероятности и не может организовать двусторонний доверительный интервал, т.к. его границы «перехлестывают» друг друга во встречных направлениях. Вероятность β является маркирующим параметром, который выделяет оценку среди множества подобных по методу построения $\beta \geq 0,5$.

Кроме того, доверительная граница ($\beta \leq 0,5$) представляет из себя точечную оценку с сильным смещением относительно оцениваемого параметра. С ростом доверительной вероятности $\beta > 0$ двусторонний доверительный интервал вырождается сначала в точку, а потом перестает существовать. Односторонний доверительный интервал с ростом доверительной вероятности $\beta > 0,5$ перестает считаться таковым, т.к. с большой вероятностью $\beta > 0,5$ не накроет оцениваемый параметр. А множество оценок с маркирующим параметром $\hat{v}(\beta = 0,5 + x)$ становится потенциальным носителем эффективной оценки.

Сформулируем критерий выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР), построим на основе сформулированного критерия улучшенную (но смещенную) оценку вероятности отказа (и, следовательно, оценку ВБР) для плана испытаний с добавлением для $n > 3$ и выберем среди предложенных оценок эффективную.

Методы исследования оценок показателей надежности

В основе поиска эффективных оценок лежит интегральный подход сформулированный в работах [6–11]. В основе интегрального подхода лежит построение правила выбора эффективной оценки $\hat{\theta}_0(n; k, m)$, заданного на сумме значений абсолютных (или относительных) смещений оценок $\hat{\theta}(n; k, m)$, выбранных из некоторого множества, от параметра закона распределения, где n – количество изделий, первоначально выставленных на испытания.

Критерий выбора эффективной оценки для ВБР

Критерий выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) на множестве оценок $\hat{\theta}(n; k, m)$, основан на суммарном квадрате абсолютных (или относительных) смещений математического ожидания оценок $E\hat{\theta}(n; k, m)$ от вероятности отказа p для всех возможных значений p, n .

Пусть τ – время испытания одного изделия, тогда для выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) потребуется только понятие абсолютно эффективной оценки по смещению и изменение параметра p в пределах $0 \leq p \leq 1$. Поэтому для простоты, в качестве критерия получения эффективной оценки $\hat{\theta}_0(n; k, m)$ строится функционал (далее – $L(\hat{\theta}(n; k, m))$) на ограниченном множестве $1 \leq n \leq I$ [7–9]:

$$L(\hat{\theta}(n; k, m)) = \frac{1}{I} \sum_{n=1}^I \int_0^1 \{E\hat{\theta}(n; k, m) - p\}^2 dp. \quad (4)$$

Оценка $\hat{\theta}_0(n; k, m)$ минимизирующая функционал $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ на заданном множестве оценок называется эффективной оценкой по смещению на заданном множестве смещенных оценок. Среди оценок, доставляющих примерно один и тот же минимум функционалу $L(\hat{\theta}(n; k, m))$, следует выбрать оценку, которая имеет минимальное отклонение в среднеквадратическом смысле (классическое определение эффективной несмещенной оценки [2]). Данную оценку будем называть как более эффективную в сравнении с выбранными.

Для выбора оценок, обладающих минимальным отклонением, строится функционал (далее – $D(\hat{\theta}_0(n; k, m))$) основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных отклонений оценок $\hat{\theta}_0(n; k, m)$ от параметра p для всех возможных значений p, n [7–9]:

$$D(\hat{\theta}(n; k, m)) = \frac{1}{I} \sum_{n=1}^I \int_0^1 E\{\hat{\theta}(n; k, m) - p\}^2 dp. \quad (5)$$

Оценку, которая доставляет нуль функционалу $L(\hat{\theta}_0(n; k, m)) = 0$ (несмещенная оценка) и минимум функционалу $D(\hat{\theta}_0(n; k, m))$, будем называть абсолютно эффективной по смещению.

Ограничим объем испытаний $4 \leq n \leq 10$, что для высоконадежных и сложных изделий является пределом затрат. Тогда формула (4) примет вид:

$$L(\hat{\theta}(n; k, m)) = \frac{1}{7} \sum_{n=4}^{10} \int_0^1 E\{\hat{\theta}(n; k, m) - p\}^2 dp.$$

А формула (5) примет вид:

$$D(\hat{\theta}(n; k, m)) = \frac{1}{7} \sum_{n=4}^{10} \int_0^1 E\{\hat{\theta}(n; k, m) - p\}^2 dp.$$

Проведенные расчеты показали, что оценке $\hat{v}(\beta = 0,5 + x)$, минимизирующей функционалы $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ и $D(\hat{\theta}(n; k, m))$, соответствует $\beta = 0,5 + x = 0,5$, т.е. $x = 0$ и следовательно $\hat{v}(\beta = 0,5) = \hat{v}(\beta = 0,5 + x)$.

В таблице 1 приведены результаты подстановки в функционалы $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ и $D(\hat{\theta}(n; k, m))$, в соответствии с формулами (1) и (2), следующих оценок вероятности отказа $\hat{\theta}$: $\tilde{v}, \hat{p}, \bar{p}$ [1], где

$$\bar{p} = \begin{cases} \tilde{v}(0, n, \beta = 0,5), & r = 0; \\ \frac{r}{n+k}, & r > 0. \end{cases}$$

Вычисления функционалов $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ и $D(\hat{\theta}(n; k, m))$ проводилось с шагом $\partial p = 10^{-3}$. А вычисления неявно заданных оценок $\tilde{v}$ и $\bar{p}$ проводилось с точностью 10^{-4} . Объем испытаний ограничивался интервалом $4 \leq n \leq 10$.

Таблица 1 – Результаты подстановки предложенных оценок вероятности отказа в функционалы $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ и $D(\hat{\theta}(n; k, m))$

Вид функционала	$\tilde{v}(\beta = 0,5)$ $4 \leq n \leq 10$	$\hat{p} = \frac{r}{n+k}$ $4 \leq n \leq 10$	$\bar{p}(\tilde{v}(\beta = 0,5))$ $4 \leq n \leq 10$
$L(\hat{\theta}(n; k, m))$	0,00229	0,000219	0,000805
$D(\hat{\theta}(n; k, m))$	0,0205	0,0186	0,0164

Из таблицы 1 следует, что для объема испытаний $4 \leq n \leq 10$ преобладают оценки $\hat{p}$ и составная оценка $\bar{p}(\tilde{v}(\beta = 0,5))$, приобретая минимальные смещения.

Из таблицы 1 так же следует, что оценка $\hat{p}$ и составные оценки $\bar{p}$ примерно равносильны по уклонению своих значений от параметра p и незначительно превосходят в этом качестве оценку $\tilde{v}$. Поэтому оценку $\hat{p}$ можно принять в качестве искомой оценки эффективной по смещению среди предложенных, когда объем испытаний $n > 3$. Однако когда необходимо оценить неизвестный параметр p величиной отличной от нуля и единицы, следует использовать оценку $\bar{p}$.

Заметим, что при вычислениях варьирование шагом суммирования ($\partial p = 10^{-3}$) приводит к изменению результата функционала, но не меняет сути вещей – результат сравнения оценок не меняется.

Пример 1. Изделия входят в состав агрегата и применяются по схеме с резервированием. Требуется сделать точечную оценку ВБР изделий по результатам биномиальных испытаний на надежность этих изделий.

При планировании определительных испытаний на надежность испытатель при расчете объема выборки ($N=n+k=5$) учел один отказ ($Q=k=1$), минимизируя риски от возникновения этого маловероятного случайного отказа.

Для расчетов прогнозируемого значения ВБР использована эффективная по смещению составная оценка [9]:

$$\dot{p} = \begin{cases} 1 - \tilde{b}(0, N, \beta = 0,86), R = 0; \\ 1 - \frac{R}{N}, R > 0, \end{cases}$$

где $\tilde{b}(0, N, \beta = 0,86)$ – неявно заданная оценка биномиального плана испытаний [9]. При этом прогнозируемое значение ВБР составило $\dot{p}(r=1) = 1 - \frac{r}{N} = \frac{4}{5} = 0,8$,

что соответствует требованиям технического задания (ТЗ) (ВБР должна быть не менее 0,8) на изделия. Учитывая, что за время испытаний отказ изделия маловероятен, было принято решение испытания на надежность проводить по схеме испытаний с добавлением с целью сокращения издержек. В процессе испытаний допустимы два исхода: безотказные испытания и испытания с одним отказом (планируемые). В случае безотказных испытаний отпадает необходимость в испытаниях дополнительной выборки. Результаты расчета вариантов оценок ВБР приведены в таблицах 2 и 3.

Заметим, что в случае проведения биномиальных испытаний по сокращенной выборке $N=n=4$, $Q=0$ и когда при этом возникнет один отказ $r=1$, то по правилам потребуется проведение повторных испытаний по тем же правилам, т.к. $\dot{p} = 1 - \frac{r}{N} = \frac{3}{4} = 0,75 < 0,8$ [3].

Причем в повторном биномиальном испытании отказы не допускаются. Для проведения безотказных биномиальных испытаний при приемочном числе отказов $Q=1$

Таблица 2 – Результаты безотказных испытаний примера 1.

ВБР (безотказные испытания с добавлением) $r=0, n=4, N=n+k=4+0=4, Q=1$			ВБР (биномиальные испытания) $r=0, N=n=4, Q=0$ $\dot{p} = 1 - \tilde{b}(0, N, \beta = 0,86)$
$1 - \tilde{v}$ $\beta=0,5$ [1]	$1 - \hat{p} = 1 - \frac{r}{n+k}$	$1 - \bar{p}(\tilde{v})$ $\beta=0,5$	
0,871	1	0,871	0,963

Таблица 3 – Результаты испытаний с одним отказом примера 1.

ВБР (безотказные испытания с добавлением) $r=1, n=4, N=n+k=5, Q=1$			ВБР (биномиальные испытания) $r=1, N=n=5, Q=1$ $\dot{p} = 1 - \frac{r}{N}$
$1 - \tilde{v}$ $\beta=0,5$	$1 - \hat{p}$	$1 - \bar{p}(\tilde{v})$ $\beta=0,5$	
0,687	0,8	0,8	0,8

потребуется выборка объема $N=5$, что больше первичной выборки испытаний с добавлением $N=4$.

В этом и есть преимущество испытаний с добавлением, которые позволяют сделать вывод о соответствии ТЗ по результатам только одних испытаний с различными исходами: $N=n+k=4, r=0$ и $N=n+k=5, r=1$ (без проведения повторных испытаний в том же объеме $N=n+k=4, r=0$ как в случае биномиальных испытаний, где допустим один исход $Q=0$).

Пример 2. В рамках примера 1 испытатель при расчете объема выборки ($N=4$) учел один отказ ($Q=k=1$). При этом прогнозируемое значение ВБР составило $\dot{P} = 1 - \frac{r}{N} = \frac{3}{4} = 0,75$, что соответствует требованиям ТЗ (ВБР должна быть не менее 0,75) на изделия. Учитывая, что за время испытаний отказ изделия маловероятен, было принято решение испытания на надежность проводить по схеме испытаний с добавлением с целью сокращения издержек. Результаты расчета вариантов оценок ВБР приведены в таблицах 4 и 5.

Критерий выбора эффективной оценки для средней наработки до отказа

Будем считать, что наработка до отказа изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения вероятностей (далее – з.р.) с параметром T_0 , где последний совпадает со средней наработкой до отказа (далее – СНДО). Тогда расчетное значение ВБР одного изделия за заданное время τ будет определяться равенством:

$$P_0(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{T_0}\right)}.$$

В качестве критерия получения эффективной оценки СНДО строится функционал (далее – $V(\hat{\theta})$), основанный на суммировании квадратов относительных смещений математических ожиданий оценок $\hat{\theta}(k, m, n, \tau)$ от параметра t экспоненциального з.р. (СНДО) для всех возможных значений t, n [6]:

$$V(\hat{\theta}(k, m, n, \tau)) =$$

$$= \frac{1}{3} \sum_{i=3}^5 \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{t}\right)^2 \{E\hat{\theta}(k, m, n, \tau = 10^i) - t\}^2 \partial t. \quad (3)$$

Интегрирование ведется по всем возможным величинам параметра (СНДО) $t \in [0; \infty]$.

Рассмотрим функционал (далее – $H(\hat{\theta})$), основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных уклонений оценок $\hat{\theta}(k, m, n)$ от параметра t экспоненциального з.р. (СНДО) для всех возможных значений t, n [6]:

$$H(\hat{\theta}(k, m, n, \tau)) =$$

$$= \frac{1}{3} \sum_{i=3}^5 \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{t}\right)^2 E\{\hat{\theta}(k, m, n, \tau = 10^i) - t\}^2 \partial t. \quad (4)$$

Задачей функционалов $H(\hat{\theta}(k, m, n, \tau))$ является определение степени разброса значений предложенных оценок.

Оценка, минимизирующая предлагаемые функционалы, является эффективной среди предложенных оценок СНДО.

Выбор эффективной оценки СНДО

Определим оценку СНДО ($\hat{T}_2$) для плана испытаний с добавлением как:

$$\hat{T}_2 = \frac{S(k, m, \tau, s_i, n)}{R},$$

где s_i – моменты отказов, $i=1, 2, \dots, R>0$, S – суммарная наработка. Доопределим оценку $\hat{T}_2$ при $R=0$ величиной $\hat{T}_2 = S(k, m, \tau, n)$.

Другой вариант. Чтобы уйти от деления на ноль для оценки СНДО $\hat{T}_2$ представим ее в виде:

$$\hat{T}_3 = \frac{S(k, m, \tau, s_i, n)}{R+1}.$$

Таблица 4 – Результаты безотказных испытаний примера 2.

ВБР (безотказные испытания с добавлением) $r=0, k=0, n=3, N=n+k=3+0=3, Q=1$				ВБР (биномиальные испытания) $r=0, N=n=3, Q=0$ $\dot{P} = 1 - \tilde{b}(0, N, \beta = 0,86)$
$1 - \tilde{v}, \beta=0,5$	$1 - \hat{p} = 1 - \frac{r}{n+k}$	$1 - \hat{w}_3(0)$	$1 - \bar{p}(\tilde{v}), \beta=0,5$	
0,841	1	1	0,841	0,951

Таблица 5 – Результаты испытаний с одним отказом примера 2.

ВБР (безотказные испытания с добавлением) $r=1, k=1, n=3, N=n+k=4, Q=1$				ВБР (биномиальные испытания) $r=1, N=n=4, Q=1$ $\dot{P} = 1 - \frac{r}{N}$
$1 - \tilde{v}, \beta=0,5$	$1 - \hat{p}$	$1 - \hat{w}_3(1)$	$1 - \bar{p}(\tilde{v}), \beta=0,5$	
0,616	0,75	0,642	0,75	0,75

Будем рассматривать простой случай и сократим число переменных для оценок $\hat{T}_3$ и $\hat{T}_2$. Для этого будем предполагать, что разброс s_i происходит симметрично относительно $\tau/2$. Это выполнимо для высоконадежных изделий $\frac{\tau}{T_0} < 0,1$ [3]. Поэтому $S(k, m, \tau, n) = (n-k)*\tau + (k+m)*\tau/2$.

Определим следующие оценки СНДО для плана испытаний с добавлением как:

$$\hat{T}_0 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{v}(k, m, n, \beta = 0, 5))},$$

$$\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \bar{p}(k, m, n, \beta = 0, 6))}.$$

Таблица 6 – Результаты подстановки в функционалы $V(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$ и $H(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$ оценок СНДО: $\hat{T}_0, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{T}_3$

Вид функционала	$\hat{T}_0(\tilde{v})$ $\beta=0,5$	$\hat{T}_1(\bar{p})$ $\beta=0,6$	$\hat{T}_2 = \frac{S}{R}$	$\hat{T}_3 = \frac{S}{R+1}$
$V(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$	10,89	10,80	2363	1836
$H(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$	27,47	25,54	2373	1845

Таблица 7 – Результаты безотказных испытаний примера 3.

СНДО (безотказные испытания с добавлением) $r=0, k=0, n=4, N=n+k=4+0=4, Q=1$ $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \bar{p}(k=0, m=0, n, \beta=0,5))}$	СНДО (биномиальные испытания) $r=0, N=n=4, Q=0$ $\hat{T}_{БИ} = \begin{cases} \frac{\tau}{-\ln(1 - \hat{b})}, R > 0; \\ \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{b}(R, n, \beta=0,6))}, R=0, \end{cases}$
$\frac{10000}{-\ln(1 - \tilde{v}(k=0, m=0, n=4, \beta=0,5))} = 72411$	$\frac{10000}{-\ln(1 - \tilde{b}(r=0, n=4, \beta=0,6))} = 78304$

Таблица 8 – Результаты испытаний с одним отказом примера 3.

СНДО (безотказные испытания с добавлением) $r=1, k=1, n=4, N=n+k=4+1=5, Q=1$ $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \bar{p}(k, m, n, \beta=0,5))}$	СНДО (биномиальные испытания) $r=1, N=n=5, Q=1$ $\hat{T}_{БИ} = \begin{cases} \frac{\tau}{-\ln(1 - \frac{r>0}{n})}, \\ \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{b}(r=0, n, \beta=0,6))} \end{cases}$
$\frac{10000}{-\ln(1 - \frac{k+m}{n+k})} = 44814$	$\frac{10000}{-\ln(1 - \frac{1}{5})} = 44814$

Вычисления функционалов $V(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$ и $H(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$ проводилось с шагом $\partial p = 10^{-3}$. А вычисления неявно заданных оценок $\tilde{v}$ и $\bar{p}$ проводилось с точностью 10^{-4} .

В таблице 6 приведены результаты подстановки в функционалы $V(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$ и $H(\hat{\theta}(\tau; n; k, m))$, в соответствии с формулами (3) и (4), следующих оценок СНДО: $\hat{T}_0, \hat{T}_3, \hat{T}_1, \hat{T}_2$.

Из таблицы 6 следует, что оценка $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \bar{p}(k, m, n, \beta=0,6))}$ является эффективной среди предложенных оценок.

Пример 3. В рамках примера 1 изделия испытывались 10 000 час. Воспользуемся классической эффективной оценкой СНДО $\hat{T} = \frac{\tau}{-\ln(1 - \hat{b}(r, n))}, \hat{b}(r, n) = \frac{r}{n}$ для биномиального плана [7] и эффективной оценкой СНДО $\hat{T}_b = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{b}(R=0, N, \gamma=0,6))}$ [9], и построим на их основе следующую составную оценку СНДО для биномиальных испытаний:

$$\hat{T}_{БИ} = \begin{cases} \frac{\tau}{-\ln(1 - \hat{b})}, R > 0; \\ \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{b}(R, n, \beta=0,6))}, R=0, \end{cases}$$

где $\tilde{b}(r, n, \beta=0,6)$ – неявно заданная оценка вероятности отказа биномиального плана испытаний [9].

Испытатель определил прогнозируемое значение СНДО

$$\hat{T}_{БИ}(r=1, n=5) = \frac{\tau}{-\ln(1-\tilde{b}(r,n))} = \frac{10000}{-\ln(1-\frac{r}{n})} = \frac{10000}{-\ln(1-\frac{1}{5})} = 44814 \text{ час},$$

что соответствует требованиям ТЗ ($T_0 \geq 40000$) на изделия. Учитывая, что за время испытаний отказ изделия маловероятен, было принято решение испытания на надежность проводить по схеме испытаний с добавлением с целью сокращения издержек.

Выводы

Проведено исследование оценок ВБР для плана испытаний с добавлением. Для варианта $n > 3$ оценки

$$\hat{P} = 1 - \hat{p} = 1 - \frac{r}{n+k} \text{ и } 1 - \bar{p}(\tilde{v}(\beta = 0,5)) \text{ (составная оценка)}$$

являются более эффективными в сравнении с оценкой $1 - \tilde{v}(\beta = 0,5)$. Составную оценку ВБР $1 - \bar{p}(\tilde{v}(\beta = 0,5))$ следует использовать для безотказных испытаний.

Для варианта $n > 3$ испытания с приемочным числом отказов больше нуля ($Q > 0$), проводимые по схеме испытаний с добавлением, позволяют сократить число испытуемых изделий за счет успешно проведенных испытаний на первоначальной выборке.

Составная оценка СНДО $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1-\bar{p}(k,m,n,\beta=0,6))}$ является эффективной по смещению среди предложенных оценок СНДО.

Полученные составные оценки $\bar{p}$ и $\hat{T}_1$ имеют направленность практического применения для безотказных испытаний, проводимых по плану испытаний с добавлением.

Библиографический список

1. Михайлов, В.С. План испытаний с добавлением [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность. – 2019. – № 3. – С. 12-20.
2. Боровков, А.А. Математическая статистика [Текст] / А.А. Боровков. – Новосибирск: Наука; Издательство Института математики, 1997. – 772 с.
3. Барзилович, Е.Ю. Вопросы математической теории надежности [Текст] / Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев,

В.А. Каштанов и др.: Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.

4. Шуленни, В.П. Математическая статистика. Часть 1. Параметрическая статистика [Текст] / В.П. Шуленни. – Томск.: Издательство НТЛ, 2012. – 540 с.

5. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы [Текст] / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1966. – 228 с.

6. Михайлов, В.С. Исследование интегральных оценок потока отказов [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 3-10.

7. Михайлов, В.С. Неявные оценки для плана испытаний типа НБт [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 64-71.

8. Юрков, Н.К. Оценки показателей надежности для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану [Текст] / Н.К. Юрков, В.С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 29-39.

9. Юрков, Н.К. Частный случай нахождения эффективных оценок [Текст] / Н.К. Юрков, В.С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 6 (26). – С. 103-113.

10. Михайлов, В.С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность. – 2016. – № 4. – С. 40-42.

11. Михайлов, В.С. Оценка гамма-процентного срока для биномиального плана испытаний [Текст] / В.С. Михайлов. // Надежность. – 2019. – № 2. – С. 18-21.

Сведения об авторе

Виктор С. Михайлов – ведущий инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева» ФГУП «ЦНИИХМ», Российская Федерация, Москва, e-mail: Mvs1956@list.ru

Вклад автора в статью

Автором статьи выполнено построение эффективных оценок для плана испытаний с добавлением, таких как вероятность безотказной работы $\bar{p}$ и средняя наработка до отказа $\hat{T}_1$. Полученные оценки $\bar{p}$ и $\hat{T}_1$ имеют направленность практического применения для испытаний, не давших отказов и проводимых по плану испытаний с добавлением.

Об учете прогрессирующего разрушения при проектировании

Андрей И. Долганов, ООО «SEVERIN DEVELOPMENT», Российская Федерация, Москва
dolganov-58@mail.ru



Андрей И.
Долганов

Резюме. Нагрузки, действующие на конструкции, а также механические и геометрические параметры конструкций, являются случайными величинами. Поэтому надежность строительного объекта (технической системы) в общем смысле оценивается вероятностью безотказной работы в течение расчетного срока эксплуатации. Показана возможность анализа надежности строительных систем при их проектировании с помощью логико-вероятностных методов, приведены алгоритмы регулирования их надежности. Рассмотрена возможность обеспечения надежности строительного объекта на примере двухпролетной неразрезной шарнирной балки. При этом установлена необходимость учета всех возможных схем разрушения строительной системы. Надежность двухпролетной неразрезной шарнирной балки оценивается вероятностью того, что не реализуется ни одна из возможных схем разрушения или образования одного из множества вариантов кинематического механизма. Кинематический механизм образует цепь пластических шарниров или цепь прогрессирующих разрушений расчетных сечений. То есть, задача недопущения прогрессирующего обрушения сводится к обеспечению требуемой надежности как всего сооружения, так и отдельных его элементов (расчетных сечений) путем варьирования качественными и количественными составляющими структуры надежности. Под надежностью элемента понимается его способность сохранять внутренние усилия в расчетном сечении не меньше внешних усилий. Показано, что правильные конструктивные решения, рациональный выбор материалов и обеспеченностей нагрузок позволяют добиться заданной надежности строительной системы. Это приводит в одних случаях к экономии материалов, в других – к уменьшению вероятности отказов. Построение структуры надежности технической системы позволяет количественно оценить наиболее опасные расчетные схемы разрушения, рациональным образом регулировать выбор запасов прочности несущих элементов, перераспределять эти запасы между ними и в результате не допускать прогрессирующего обрушения. Введенные дифференциальные характеристики элементов «вес», «значимость», «вклад» и «удельный вклад» позволяют наглядно увидеть распределение роли всех элементов на заданной структуре при решении конкретных задач, включая учет возможности прогрессирующего обрушения. Исследование показало, что изъятие ненадежных вертикальных несущих конструкций не решает проблему надежности строительного объекта, в том числе и защиту от прогрессирующего обрушения. Установлено, что при проектировании сооружений, в том числе и от прогрессирующего обрушения, обязательно необходимо на основе кинематического анализа построить структуру надежности системы, выявить наиболее важные и значимые элементы этой структуры и специальными приемами регулирования добиться требуемой надежности сооружения. Это позволит добиться существенной экономии ресурсов и снижения затрат по разработке конструктивных мероприятий.

Ключевые слова: вероятность, кинематический механизм, надежность, пластический шарнир, прогрессирующее обрушение, схема разрушения, техническая система.

Для цитирования: Долганов А.И. Об учете прогрессирующего разрушения при проектировании // Надежность. 2020. №1. С. 20-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-20-24>

Поступила 28.08.2019 г. / После доработки 15.02.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

Вводные замечания

В данной статье рассматривается проблема учета прогрессирующего разрушения при проектировании. Необходимость расчета на прогрессирующее обрушение обуславливается п. 5.2.6 ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Целью данных расчетов является недопущение прогрессирующего (лавинообразного) разрушения зданий и сооружений.

Согласно существующим «Рекомендациям по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения» и «Рекомендациям по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения», разработанным в Москомархитектуре соответственно в 2006 и 2005 гг., а также СТО 008-02495342-2009 «Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий. Проектирование и расчет», при проектировании рекомендуется рассматривать разрушение (удаление) вертикальных конструкций одного (любого) этажа здания:

- 1) двух пересекающихся стен на участках от места их пересечения (в частности, от угла здания) до ближайшего проема в каждой стене или до следующего вертикального стыка со стеной другого направления (но на суммарной длине не более 7 м);
- 2) отдельно стоящей колонны (пилона);
- 3) колонны (пилона) с участками примыкающих стен суммарной длиной 7 м.

При этом допускается нормативные характеристики сопротивлений материалов умножать на дополнительный коэффициент условий работы особого предельного состояния, принимаемый от 1,1 до 1,25.

При таком подходе к проектированию увеличивается в два раза пролет изгибаемых элементов и одновременно снижается обеспеченность расчетных сопротивлений.

Так, при умножении нормативного сопротивления (500 МПа) арматуры класса А500 на 1,15 получается значение 575 МПа, что превышает среднее значение 550 МПа. То есть, обеспеченность сопротивления арматуры стала меньше 0,5.

Согласно указанным выше рекомендациям, нормативное сопротивление бетона допускается умножать на 1,25. Например, для бетона класса В40 расчетное сопротивление будет: $29 \times 1,25 = 36,25$ МПа. При этом среднее значение при коэффициенте вариации 0,1 равно 34,69 МПа. То есть, обеспеченность расчетного сопротивления стала 0,326.

Таким образом, запроектированная по указанным выше рекомендациям конструкция изначально имеет недопустимо низкую надежность одновременно с необоснованным перерасходом материалов, например, арматуры (что получилось бы, например, если у авиалайнера убрать одно крыло или гипотетически уменьшить размеры крыла в полете).

Основное содержание

Большой вклад в вопросы оценки надежности сложных технических систем и исследований структурного резервирования внесли работы [1–3]. В [4] задача оценки надежности и построение ее структуры решалась рекуррентным логико-вероятностным методом.

Суть предлагаемого ниже метода оценки возможности прогрессирующего разрушения заключается в рациональном управлении надежностью отдельных элементов технической системы. При этом рассматривается простой пример – двухпролетная неразрезная балка (рис. 1), и используется, как более наглядный, логико-вероятностный метод ортогонализации [1, 5].

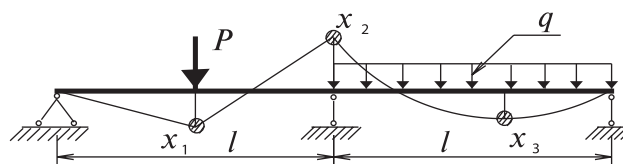


Рисунок 1. Простейшая техническая система

Как показывает кинематический анализ, система (рис. 1) разрушится, если одновременно откажут сечения x_1 и x_2 или x_1 и x_3 , или x_2 и x_3 , то есть, когда реализуется одна из возможных схем кинематического механизма. Перечисленные сочетания x_i ($i = 1, 2, 3$) фактически и представляют собой структуру надежности технической системы. Значения x_i могут быть связаны как с вероятностями безотказной работы системы R_i , так и с вероятностями отказов Q_i .

Вопросы назначения уровня надежности для элементов x_i и способы определения вероятностей безотказной работы технических систем R_i рассматриваются в [6, 7]. То есть, количественно надежность системы оценивается с помощью одного из ее показателей – вероятности ненаступления ни одной из возможных схем разрушения технической системы или вероятности образования одного из множества кинематического механизма.

Так как кинематический механизм образует цепь пластических шарниров (разрушений элементов, расчетных сечений), то задача недопущения прогрессирующего обрушения сводится к обеспечению требуемой надежности отдельных его элементов (расчетных сечений).

Для случаев, когда встает вопрос, с какого сечения (элемента) лучше начать регулировать надежность, чтобы получить наиболее рациональное построение структуры технической системы, используются специальные количественные характеристики: «вес», «значимость» и «вклад» элемента в структуре надежности системы. С помощью названных характеристик возможно выявить «слабые места» в технической системе, выбрать оптимальное резервирование и рационально регулировать ее надежность.

Известно, что начальный уровень надежности технической системы определяют внутренние и внешние факторы. Например, для строительной конструкции

внутренними факторами являются случайность геометрических параметров, случайность механических характеристик материалов и др. Внешние факторы – случайность гравитационных, температурных нагрузок, случайность неравномерных осадок грунта и т.п. Поэтому при регулировании надежности учитывается, что внешние и внутренние факторы не зависимы. Например, изменение гравитационных нагрузок не меняет обеспеченности механических характеристик материалов.

Ниже приведен алгоритм регулирования надежности технической системы. Формулы даны без выводов. Теоретическое обоснование формул имеется в работе [1].

1. Строится структурная схема расчета надежности строительной системы

1.1. Выделяются все элементы системы (расчетные сечения), в которых допускается образование пластических шарниров: x_i , $i = 1, 2, 3$ (рис. 1).

1.2. На основе кинематического анализа указываются все возможные схемы разрушений технической системы и записываются через конъюнкции K_i :

$$y(x_1, x_2, x_3) = \begin{vmatrix} x_1 x_2 \\ x_1 x_3 \\ x_2 x_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

1.3. Выражение (1) стандартными методами преобразуется в ортогональную дизъюнктивно-нормальную форму (2):

$$y(x_1, x_2, x_3) = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_1' K_2 \\ K_1' K_2' K_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_2 \\ x_1 x_2' x_3 \\ x_1' x_2 x_3 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{где } K_1' K_2 = \begin{vmatrix} x_1' \\ x_1 x_2' \end{vmatrix} | x_1 x_3 = | x_1 x_2' x_3 |,$$

$$K_1' K_2' K_3 = \begin{vmatrix} x_1' \\ x_1 x_2' \end{vmatrix} | \begin{vmatrix} x_1' \\ x_1 x_2' \end{vmatrix} | x_2 x_3 = | x_1' x_2 x_3 |.$$

1.4. Записывается окончательная формула структуры надежности для рассматриваемой технической системы:

$$R_c = R_1 R_2 + R_1 Q_2 R_3 + Q_1 R_2 R_3. \quad (3)$$

Вопросы назначения уровня надежности для элементов x_i и способы определения вероятностей безотказной работы технических систем R_c рассматриваются в [6, 7]. В рассматриваемом примере надежности сечений (вероятности безотказной работы) назначим одинаковыми: $R_1 = R_2 = R_3 = 0,9$. Тогда надежность системы будет:

$$R_c = R^2 \times (1 + 2 \times Q) = 0,9^2 \times [1 + 2 \times (1 - 0,9)] = 0,972.$$

2. Определяются параметры структурной схемы: «вес», «значимость» и «вклад»

2.1. «Вес» элементов

$$g_{x_i} = \frac{G\{\Delta_{x_i} y(x_1, \dots, x_n)\}}{2^n} = \sum_{j=1}^l 2^{-(r_j-1)} - \sum_{f=1}^k 2^{-(r_f-1)}, \quad (4)$$

где r_j – ранг конъюнкции с x_i ; r_f – ранг конъюнкции с x_i' .

Для рассматриваемого примера нормированный «вес» элементов x_i , $i = 1, 2, 3$ равен:

$$g_{x_1} = \frac{G\{\Delta_{x_1} y(x_1, x_2, x_3)\}}{2^3} = \frac{4}{8} = 0,5,$$

$$g_{x_2} = \frac{G\{\Delta_{x_2} y(x_1, x_2, x_3)\}}{2^3} = \frac{4}{8} = 0,5,$$

$$g_{x_3} = \frac{G\{\Delta_{x_3} y(x_1, x_2, x_3)\}}{2^3} = \frac{4}{8} = 0,5.$$

Из примера видно, что «веса» элементов x_i , $i = 1, 2, 3$ совпадают. Следовательно, «вес» элементов в структуре надежности системы одинаков. «Вес» элемента характеризует относительное число таких критических работоспособных состояний системы, в которых отказ данного элемента приводит к отказу системы (и, наоборот, его восстановление приводит к восстановлению системы).

2.2. «Значимость» элементов

«Значимость» показывает влияние элемента на надежность системы

$$\zeta_{x_i} = \frac{\partial P\{y(x_1, \dots, x_n) = 1\}}{\partial P\{x_i = 1\}} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i}. \quad (5)$$

Для элемента 1 «значимость» равна:

$$\zeta_{x_1} = \frac{\partial y_c}{\partial x_1} = x_2 + x_2' x_3 - x_2 x_3 = 0,1 + 0,9 \cdot 0,1 - 0,1^2 = 0,180.$$

2.3. «Вклад» элементов

«Вклад» элемента x_i в системе $y(x_1, \dots, x_n)$ есть произведение вероятности безотказной работы элемента R_i на его «значимость», то есть

$$B_{x_i} = R_i \frac{\partial R_c}{\partial R_i}. \quad (6)$$

Для элемента 1 «вклад» равен:

$$B_{x_1} = x_1' \frac{\partial y_c}{\partial x_1} = 0,9 \cdot 0,18 = 0,162.$$

Критерий «вклад» характеризует приращение надежности системы после восстановления элемента x_i из неработоспособного или условно неработоспособного

состояния в работоспособное с фактической вероятностью его безотказной работы, равной R_i .

2.4. «Удельный вклад» элементов

«Удельный вклад» элемента x_i в системе $y(x_1, j, x_n)$ есть нормированный «вклад» этого элемента, то есть

$$b_{x_i} = B_{x_i} / \sum_{i=1}^n B_{x_i} = 0,162 / (3 \times 0,162) = 0,333. \quad (7)$$

Критерий «вклад» позволяет рационально определять очередность восстановления элементов в системе.

3. Определяются структурные составляющие надежности системы

3.1. «Качественные» составляющие надежности

«Качественными» $DR_{c,q}$ структурными составляющими надежности технической системы являются: качество материалов, уровень технологии, обеспеченности расчетных сопротивлений материалов, нагрузок и т.п.:

$$\begin{aligned} \Delta R_{c,q} = & \sum_{i \in M_1} \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_i + \sum_{i,j \in M_2} \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j} \Delta R_i \Delta R_j + \dots \\ & \dots + \sum_{i,j,\dots,k \in M_l} \frac{\partial^l R_c}{\partial R_i \partial R_j \dots \partial R_k} \Delta R_i \Delta R_j \dots \Delta R_k + \dots \\ & \dots + \Delta R_1 \Delta R_2 \dots \Delta R_n \end{aligned} \quad (8)$$

или при одинаковых приращениях надежности в расчетных сечениях DR_i

$$\Delta R_{c,q} = \sum_{j=1}^n C_n^j \frac{\partial^j R_c}{\partial R_1 \dots \partial R_k} (\Delta R_j)^j. \quad (9)$$

Проведем качественное постепенное повышение надежности сечений, например, до значения 0,99. Этого можно добиться, например, за счет снижения расчетных нагрузок. Разница между заданным, новым (0,99) и начальным (0,9) уровнем надежности сечений ΔR_i , $i = 1, 2, 3$ будет: $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = 0,99 - 0,9 = 0,09$.

По формуле (8) или (9) определим качественное приращение надежности:

$$\begin{aligned} \Delta R_{c,q} = & \Delta R \times [2R(1+2Q-R)] + \Delta R^2 \times [(1-2R) + 2 \times (Q-R)] \\ & + \Delta R^3 \times (-2) = 0,09 \times [2 \times 0,9 \times (1 + 2 \times 0,1 - 0,9)] + 0,09^2 \times [(1 - 2 \times 0,9) + 2 \times (0,1 - 0,9)] + 0,09^3 \times (-2) = 0,0277. \end{aligned}$$

Надежность системы с учетом качественного приращения стала: $0,972 + 0,0277 = 0,9997$.

Такой же результат получим, если требуемые надежности сечений (0,99) подставим в формулу (3):

$$R_c = 0,99^2 \times [1 + 2 \times (1 - 0,99)] = 0,9997.$$

Если следовать «Рекомендациям по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения» и «Рекомендациям по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения», разработанным в Москомархитектуре соответственно в 2006 и 2005 гг., а также СТО 008-02495342-2009 «Предотвращение прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных конструкций зданий. Проектирование и расчет», то мы, наоборот, снижаем обеспеченности материалов,

когда умножаем их на дополнительный коэффициент условий работы для особого предельного состояния. Поэтому качественное приращение надежности в этом случае будет со знаком минус: $-0,0277$. То есть, надежность сечений станет: $0,9 - 0,0277 = 0,8723$. А надежность системы станет $R_c = 0,8723^2 \times [1 + 2 \times (1 - 0,8723)] = 0,9552$.

3.2. «Количественные» составляющие надежности

«Количественными» составляющими $\Delta R_{c,v}$ структуры надежности технической системы являются: резервирование материалов, нахлесты арматуры, дополнительные опоры, связи и т.п.

При количественном изменении надежности, например, при дублировании i -го элемента однотипным элементом x_i , надежность такого звена возрастет на ΔR_z [1]:

$$\Delta R_z = (2R_i - R_i^2) - R_i \quad (10)$$

а надежность всей системы возрастет на $\Delta R_{c,n}$:

$$\Delta R_{c,v} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_z = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} R_i Q_i \quad (11)$$

где $Q_i = 1 - R_i$ есть вероятность отказа i -го сечения.

Из (11) видно, что количественное приращение надежности системы зависит от «значимости» и от надежности дублирующего элемента.

В общем случае, при дублировании нескольких элементов вплоть до максимально возможного их числа n , получим

$$\begin{aligned} \Delta R_{c,v} = & \sum_{i \in M_1} R_i Q_i \frac{\partial R_c}{\partial R_i} + \sum_{i,j \in M_2} R_i R_j Q_i Q_j \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j} + \dots \\ & \dots + \sum_{i,j,\dots,k \in M_l} R_i R_j \dots R_k Q_i Q_j \dots \rightarrow \\ \rightarrow & \dots Q_k \frac{\partial^l R_c}{\partial R_i \partial R_j \dots \partial R_k} + \dots + R_1 R_2 \dots R_n Q_1 Q_2 \dots Q_n. \end{aligned} \quad (12)$$

Количественно изменить надежность можно, например, варьируя структурной избыточностью. Например, как было указано выше, нахлестами арматуры, постановкой дополнительных опор или связей.

Предусмотрим в сечении 2 (рис. 1) в стыке дополнительные металлические накладки на балках или нахлест арматуры (для железобетонных балок), способные воспринимать расчетный момент. Тем самым мы дублируем элемент 2. Количественное приращение надежности системы получим по формуле (11):

$$\Delta R_{c,v} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_z = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} R_i Q_i = 0,9997 \times$$

$$\times (1 + 0,0003 - 0,9997) \times 0,9997 \times 0,0003 = 1,8 \times 10^{-7}.$$

Как видно из расчетов, постановка дополнительных опор, нахлест арматуры или других связей не дает существенного приращения надежности для рассматриваемой системы.

Кроме того, при переармировании железобетонных конструкций (случай «разрушения по бетону») мы можем ожидать обратный эффект – снижение надежности. Это получается потому, что при переармировании в работе элемента участвует один материал – бетон. Коэффициент вариации прочности бетона много больше коэффициента вариации прочности арматуры.

Надежность системы с учетом качественного и количественного приращения будет равна: $R_c = 0,972 + 0,0277 + 0,00000018 = 0,9997$. Это примерно составляет 3,43 стандарта, что соответствует современным представлениям о значении надежности для строительных систем. В настоящее время надежность сечений строительных конструкций объектов нормального уровня ответственности составляет около 0,99865 [6].

Заключение

В актуальных нормативных документах по расчету на прогрессирующее обрушение изъятие вертикальных несущих элементов и резервирование в связи с этим дополнительного материала, например, арматуры, не решает проблему обеспечения требуемой надежности для технической системы. Следовательно, такие мероприятия являются бесполезными, а такой способ регулирования надежности являются самообманом.

Недопущение прогрессирующего обрушения можно достичь рациональным регулированием выбора запасов прочности несущих элементов и перераспределением этих запасов между ними с помощью обязательного при проектировании построения структуры надежности технической системы. Кроме того, построение структуры надежности технической системы позволяет количественно оценить наиболее опасные расчетные схемы разрушения, наглядно увидеть распределение роли всех элементов на заданной структуре при решении задач на прогрессирующее обрушение.

Было также показано, что с уменьшением надежности элемента увеличивается его значимость и вклад в структуру надежности рассматриваемой технической системы, и наоборот. Надежность системы изменяется не пропорционально изменению надежности элементов (сечений).

Таким образом, при проектировании сооружений, в том числе и от прогрессирующего обрушения, необходимо обязательно (так же, как и выполнить расчеты по двум группам предельных состояний) построить структуру надежности технической системы, выявить наиболее важные и значимые элементы этой структуры и специальными приемами регулирования обеспечить требуемую надежность сооружения. Это

позволит добиться существенной экономии ресурсов и снижения затрат.

Библиографический список

1. **Рябинин, И.А.** Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
2. **Шебе, Х.** Предельная надежность структурного резервирования [Текст] / Х. Шебе, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2016. – Т. 16. – №1. – С. 3-13. doi:10.21683/1729-2646-2016-16-1-3-13
3. **Шубинский, И.Б.** Структурная надежность информационных систем. Методы анализа [Текст] / И.Б. Шубинский. – Ульяновск: Печатный двор, 2012. – 216 с.
4. **Долганов, А.И.** Оценка надежности монолитных многоэтажных зданий [Текст] / А.И. Долганов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №8. – С. 50–51.
5. **Долганов, А.И.** Надежность стержневых железобетонных конструкций [Текст] / А.И. Долганов. – Магадан: ОАО «МАОБТИ», 2001. – 209 с.
6. **Долганов, А.И.** О назначении уровня надежности [Текст] / А.И. Долганов, А.В. Сахаров // Надежность. – 2018. – Т. 18. – №3. – С. 18-21.
7. **Долганов, А.И.** О надежности сооружений массового строительства [Текст] / А.И. Долганов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №11. – С. 66-68.

Сведения об авторе

Андрей И. Долганов – доктор технических наук, технический директор ООО «SEVERIN DEVELOPMENT», Российская Федерация, Москва, e-mail: dolganov-58@mail.ru

Вклад автора в статью

Автором статьи выполнен анализ строительных аварий, случившихся в России в 2001 – 2018 гг., разработана методика, построенная на основе вероятностной модели и позволяющая регулировать надежность технической системы, не допуская тем самым прогрессирующего обрушения с вероятностью, принятой в промышленно-гражданском строительстве. Показана применимость методики для любой строительной системы. Предложено развитие показателя вероятности безотказной работы при проектировании технических систем с помощью таких параметров, как значимость, важность и вклад каждого элемента (конструкции) в структуру надежности здания или сооружения.

К вопросу об организации службы надежности на машиностроительном предприятии

Мария В. Белоусова¹, Виталий В. Булатов^{2*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Российская Федерация, Санкт-Петербург

* bulatov-vitaly@yandex.ru



Мария В.
Белоусова



Виталий В.
Булатов

Резюме. Исторически службы надежности стали появляться внутри конструкторских подразделений предприятий. Инженер-конструктор имел свое представление о контроле качества выпускаемой продукции. Он понимал, что наличие ошибок и недоработок изделия может привести к катастрофическим последствиям [1], так как первоначальными областями применения теории надежности были авиационная и космическая промышленности. Параллельно с подразделением надежности развивалась служба качества и технического контроля, основными задачами которой является организация и проведение приемо-сдаточных испытаний, проведение входного контроля и предотвращение выпуска продукции, не соответствующей требованиям технической документации. На определенном этапе возник конфликт между двумя направлениями, что привело к взаимному непониманию ответственности и дезорганизации контроля за надежностью продукции. В результате, как пример, на одних предприятиях служба надежности объединена со службой качества, на других подчинена – конструкторскому бюро. Помимо этого, при оценке эксплуатационной надежности необходимо иметь постоянную и достоверную информацию об уровне безотказности и ремонтпригодности оборудования. Качество этой информации зависит от взаимодействия службы надежности и сервисной службы. Последняя должна составлять акты ремонта изделий с указанием времени восстановления и наработки изделия и в максимально короткие сроки предоставлять эти данные для расчета надежности. Таким образом, возникают следующие вопросы: какие работы должна проводить служба надежности, кто и кому должен подчиняться, кто является владельцем процессов, связанных с оценкой параметров надежности? Важным моментом является понимание, с какой целью организуется группа надежности на производстве, какими полномочиями наделены сотрудники такого подразделения, какой результат хочет видеть руководство. Присутствует проблема формализации полученных результатов исследований. На данный момент нет единого подхода в оформлении расчетов, составлении протоколов надежностного анализа. Результаты проведенных исследований должны быть разосланы всем заинтересованным подразделениям предприятия, поэтому требуется доступная форма представления информации. Следует обратить особое внимание на подготовку кадров в направлении надежности технических систем. С каждым годом изделия усложняются, разрабатываются новые технологии, и заявленные в советские годы подходы к расчету и анализу надежности не всегда дают удовлетворительный результат. И это неудивительно, так как значимость применения достоверных и методологически обоснованных методов оценки надежности очень занижена. Это обусловливается тем, что достаточно часто можно встретить мнение, что основой теории надежности является подход, основанный на исследовании физических, конструктивных причин отказов, физико-химических процессов и т.д., подразумевая под этим, что инженер по надежности – в первую очередь инженер-конструктор или инженер-технолог. Однако не стоит забывать, что общая теория надежности подразделяется на математическую (математические методы теории вероятностей), статистическую (методы математической статистики) и физическую (исследование изменения свойств материалов). Следовательно, в службе надежности необходимо осуществлять анализ, основанный на грамотном применении математического аппарата помимо деятельности, направленной на исследование конструкции изделия. Требуются новые предложения и концепции для развития данного направления, в том числе и в образовательной среде. **Цель.** Предложить подход в организации службы надежности на современном машиностроительном предприятии с учетом современных методик и представлений об анализе надежности на всех этапах жизненного цикла изделия. **Выводы.** Предложена организационная структура подразделения надежности предприятия транспортного машиностроения. Рассмотрена взаимосвязь службы надежности с другими подразделениями предприятия. Выделен ряд факторов, влияющих на эффективную работу службы надежности.

Ключевые слова: теория надежности, служба надежности, машиностроение, организационная структура, производственная эффективность, управление персоналом.

Для цитирования: Белоусова М.В., Булатов В.В. К вопросу об организации службы надежности на машиностроительном предприятии // Надежность. 2020. №1. С. 25-31. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-25-31>

Поступила 04.11.2019 г. / После доработки 18.02.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

Введение

В последнее время проблема оценки надежности выпускаемой продукции на предприятиях возрастает и приобретает большое значение. Организация служб надежности на предприятиях является необходимой и востребована в таких направлениях, как транспортное машиностроение, автомобилестроение, авиастроение. Однако освещение данного вопроса не находит широкого отображения в зарубежной и отечественной литературе. Например, в [2] рассматриваются функции службы надежности только при разработке изделий. А в [3] рассматриваются вопросы и подходы к обработке данных эксплуатации изделий, но не предлагается алгоритм управления этим процессом.

В источнике [4] дается следующее представление о функциях бюро надежности: «Бюро надежности осуществляет методическое руководство деятельностью ключевых подразделений предприятия и координирует мероприятия по повышению надежности выпускаемых изделий. Задачи, которые решает служба надежности, являются обязательной частью общей технической политики предприятия».

А тем временем, по мере увеличения объемов производства и номенклатуры изделий возрастают требования к уровню знаний сотрудников подразделений, связанных с расчетом и контролем показателей надежности. Группа надежности, состоящая из способных людей, но входящая в отдел предприятия и находящаяся на положении такого отдела, который не имеет авторитета или достаточного веса, представляет собой nepозволительную роскошь [5].

Руководство предприятия должно быть заинтересовано в правильном функционировании службы надежности, наделяя ее соответствующими полномочиями и привлекая сотрудников отдела к актуальным задачам надежности при проектировании и эксплуатации.

Обладая в своем составе квалифицированной службой надежности, предприятие может воздействовать на свою экономическую эффективность следующим образом:

- уменьшать объем дорогостоящих испытаний или даже заменять определенные пункты из методик на равноценные по результативности и корректности итоги расчетов показателей надежности из эксплуатации;
- осуществлять регистрацию точной информации об отказах автоматизированной системой сбора данных, что в дальнейшем дает возможность в максимально короткие сроки производить необходимый ремонт (в

зависимости от места эксплуатации объекта заранее определены ЗИП, НИП и т.д.) и вводить изменения в конструкцию изделия;

- прогнозировать показатели надежности на разных этапах жизненного цикла с целью возможности варьирования плана производства и выбора оптимальной стратегии ТО и Р (технического обслуживания и ремонтов);
- снижать издержки, обусловленные срывом поставок, на основе прогнозирования надежно-ориентированного спроса на различные типы элементов, входящих в состав выпускаемой продукции.

Функции службы надежности

Одной из возможных проблем на этапе становления службы надежности является нечеткость в распределении ответственности за процессы. Это связано с тем, что вопросы надежности затрагивают интересы, как минимум, ремонтной (сервисной) службы, конструкторского отдела, технологического бюро и отдела, занимающегося проведением испытаний.

Нередко отсутствует понимание в различии оценки надежности и качества продукции. Они часто рассматриваются как одно и то же, потому что у них есть общие аналитические инструменты. Например, анализ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis – анализ видов и последствий отказов) может быть выполнен инженерами по качеству и инженерами по надежности, однако полученные результаты будут разными. Роль службы качества заключается в оценке процесса (технологических операций) производства изделий, контроля поставщиков комплектующих. Инженер по надежности же рассматривает механизмы отказа, которые влияют на работоспособность изделия; выявляет закономерности в периодике отказов на основе статистических методов; проводит анализ зависимых отказов элементов, которые влияют на другие части системы. Поэтому, хотя каждый использует общий инструмент FMEA, применяется он для различных целей: инженер по качеству оценивает производственный процесс, а инженер по надежности оценивает конструкцию изделия.

Для максимизации эффективности организации контроля надежности необходимо обозначить основные функции службы надежности на машиностроительном предприятии:

- расчет надежности изделий;
- разработка структурных схем надежности;
- разработка программ и методик эксплуатационных испытаний на надежность;

- введение в планы работ по разработке любого изделия оценки надежности;
- обоснование предельных значений средней наработки на отказ (до отказа) и времени восстановления;
- анализ общей базы результатов ресурсных испытаний на надежность;
- контроль заполнения и оптимизация структуры журнала рекламаций;
- информирование сотрудников предприятия об отказах и разработка рекомендаций для различных подразделений, влияющих на формирование итоговых характеристик надежности изделия.

Требуется, чтобы был установлен определенный порядок поступления информационных материалов в подразделение надежности. Рекомендуется внедрение обязательного рецензирования представителями службы надежности таких документов, как: технические условия, руководства по эксплуатации, программы и методики проведения испытаний и др. [1].

Организационная структура

Если предприятие позиционирует себя как организация, которая проводит анализ надежности, то следует разделять ответственность за конструирование, системную инженерию, расчет жизненного цикла и ответственность за проведения оценки качества и надежности изделий. Очень важно, с точки зрения управления проектом, не упустить этап разработки, где проводится надежность анализ конструкции. В противном случае сам проект (по изготовлению опытного образца / постановке в серийное производство и т.д.) может потерять целесообразность, так как расчет надежности на этапе проектирования является не чем иным, как анализом рисков, а некорректно просчитанные риски – шаткий фундамент любого проекта. Зачастую сталкиваются с проблемой того, что инженера по надежности начинают нагружать выполнением тех функций, к которым он не имеет отношения. Примером является расчет стоимости жизненного цикла продукции (Life Cycle Cost – LCC), владельцем процесса которого зачастую делают инженера по надежности, в то время как подразделение надежности ответственно только за два вида параметров (из более чем 10, участвующих в расчете) – параметр потока отказов и среднее время восстановления узлов и элементов конструкции.

В [6] делается акцент на то, что именно руководство предприятия должно нести ответственность за все результаты в области надежности, а также приводится перечень основных требований для успешной организации процессов управления надежностью.

В [7] рассмотрено три схемы по организации работы инженеров по надежности на предприятии: функциональная (линейная), проектно-ориентированная и матричная. Линейная схема подразумевает непосредственное подчинение инженера по надежности руководителю того подразделения, которому он назначен. Это может

быть как служба качества, так и конструкторское бюро. Данный подход подразумевает наличие одного-двух инженеров по надежности и менеджера-координатора по вопросам надежности. Очевидным недостатком данного подхода является получение производственных и полевых данных, которое требует содействия со стороны других подразделений предприятия. В проектно-ориентированной структуре инженер по надежности назначается в рамках определенного проекта и осуществляет поддержку только одного изделия. Таким образом, служба надежности децентрализована, что приводит к увеличению поддержки продукта с уникальными проблемами, которым уделяется особое внимание. С другой стороны, с децентрализацией возникает дублирование функций и процессов по каждому типу изделий. Также может отсутствовать единый подход к проведению надежности анализа, например, FMEA. В матричной организации сотрудники службы надежности относятся к одной структуре, например, к конструкторскому бюро, но при необходимости временно привязываются к конкретным изделиям или проектам. Таким образом, данный подход совмещает рассмотренные выше структуры. В матричной организации подразумевается наличие менеджера-координатора по надежности и стандартизации процессов анализа надежности. Структура является гибкой, но в тоже время могут возникать конфликты, связанные с подчинением – сотрудникам может ставиться задача менеджером проекта, а не их конкретным руководителем.

Один из подходов к организационной структуре службы надежности рассмотрен в [8]. Он подразумевает трехуровневую систему, наверху которой располагается ведущий инженер, на втором уровне располагаются менеджеры по конструкции, логистической поддержке и системной инженерии, а на нижнем уровне – инженер-конструктор со знаниями в проектной надежности, инженер сервисной службы со знаниями по оценке ремонтпригодности и RCM (Reliability centered maintenance – техническое обслуживание, направленное на обеспечение надежности) и системный инженер, которой обладает знаниями в системной надежности.

Однако эта структура с трудом реализуется на отечественном предприятии: инженер-конструктор загружен разработкой моделей и выпуском чертежей, инженер сервисной службы занят ремонтом и финансовой стороной по осуществлению гарантийных обязательств, поиск системного инженера также является трудной задачей. Кроме того, не учитывается то, что необходимо постоянно осуществлять сбор и анализ данных, для чего требуется разработка и администрирование баз данных.

В [9] также поднимается вопрос о роли отдела надежности на предприятии. Отмечается близость отдела к службе качества. Однако в представленной схеме [9, с. 45] отдел надежности является независимым подразделением, подчиненным директору по выполнению гарантийных обязательств. Следует отметить, что в струк-



Рисунок 1. Организационная структура службы надежности

туре отсутствуют линии взаимосвязи отдела надежности с конструкторским бюро и службой качества.

Таким образом, предлагается следующая организационная структура бюро надежности (рис. 1). Данная структура подразумевает независимость подразделения надежности в отношении ключевых технических подразделений предприятия и прямое подчинение техническому директору предприятия. Службой надежности решается широкий круг вопросов, поэтому требуется как минимум два инженера, что даст возможность распараллеливания задач. Оптимально, когда один из инженеров имеет базовое техническое образование, а второй – математическое. В процессе функционирования службы надежности помимо инженеров должен участвовать IT-специалист для разработки программ и приложений для автоматизации расчета надежности, а также сопровождения и постоянной модернизации баз данных.

Отдельно хочется отметить взаимосвязь сервисных служб и отдела надежности. Очень важно четко определить владельцев процессов на каждом уровне обработки информации об отказах, в противном случае работа по анализу причин возникновения отказов и оценке параметров может быть затруднена или вообще не выполнима. Ключевым звеном здесь являются специалисты, которые вводят информацию по актам гарантийного и постгарантийного ремонта, проводят детальный анализ и дают заключение по каждому рекламационному заявлению. Предлагается следующая схема взаимодействия сервисных служб и службы надежности (рис. 2). В данной структуре сервисная служба отвечает за следующие процессы: ведение журнала рекламаций, внесение информации в акты выполненных работ и передача данных в службу надежности, контроль за наличием ЗИП на складах на основе расчетных данных.

Система сбора данных по надежности должна эффективно воздействовать на все бизнес-процессы на

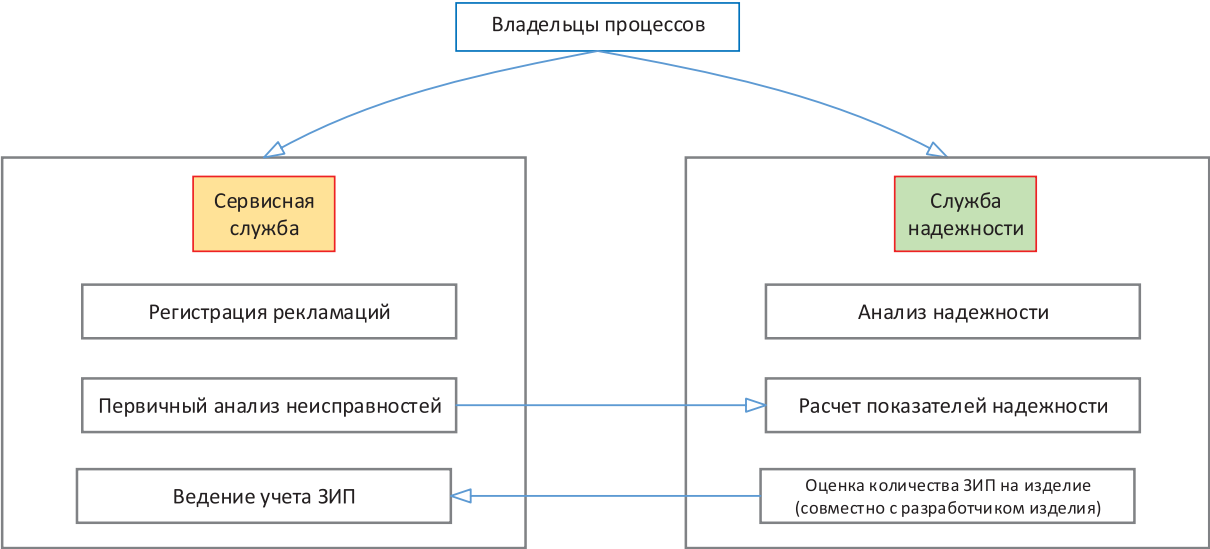


Рисунок 2. Взаимодействие между сервисной службой и службой надежности

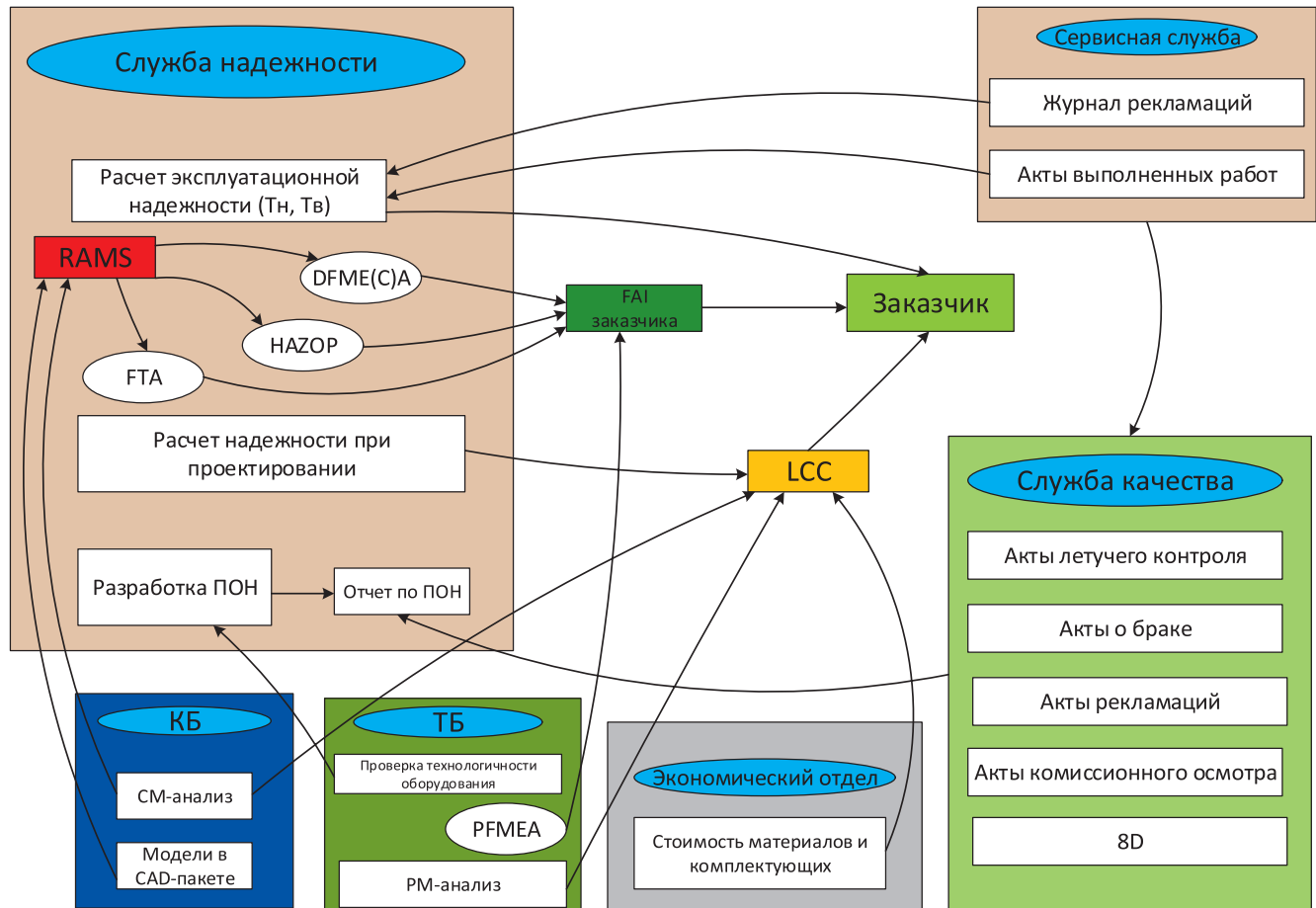


Рисунок 3. Взаимосвязь службы надежности с подразделениями предприятия

предприятию и повышать надежность выпускаемой продукции. Данная система должна обеспечивать разработчика полными данными об истории отказов узлов и элементов в доступной форме, отображать причины возникновения и меры, предпринятые для устранения отказов [1].

Следует максимально автоматизировать процесс сбора и обработки первичной информации о неисправностях. Данный процесс подробно рассмотрен в [10] на примере формы журнала рекламаций при многоуровневой структуре каталога выпускаемой продукции предприятия транспортного машиностроения.

Взаимодействие службы надежности со структурами предприятия представлено на рис. 3. В центре разработанной схемы располагается блок LCC. Таким образом, мы подчеркиваем, что расчет стоимости жизненного цикла является важнейшей задачей предприятия, которая решается совместно специалистами перечисленных структур, но владельцем процесса является генеральный директор предприятия.

Формализация видов работ службы надежности

Бюро надежности играет ключевую роль в обеспечении многих процессов предприятия, в результате чего

выпускает значительное количество документации: FTA (Fault Tree Analysis – Анализ дерева неисправностей), протоколы исследований FME(C)A и HAZOP (Hazard and operability – Исследование опасности и работоспособности), расчеты показателей надежности, программы и методики эксплуатационных испытаний на надежность. Расчет надежности можно разделить на проектный и эксплуатационный (рис. 4). Каждый из них имеет свои особенности, но при этом они должны быть связаны между собой: закладываемые на основе данных изделий-аналогов или рассчитанные с помощью специализированных программных сред на этапе проектирования показатели надежности должны верифицироваться на этапе эксплуатации и принципом обратной связи вновь возвращаться на вход проектного расчета. При наличии обратной связи есть возможность целенаправленно проводить работы по выявлению слабых элементов конструкции, анализировать причины появления отказов и своевременно проводить конструктивно-технологические мероприятия по предупреждению причин повторяющихся отказов [11].

Как расчеты и анализ надежности при проектировании, так и расчеты эксплуатационной надежности должны быть формализованы в виде документов.

На данный момент отсутствуют как полноценные методики для реализации данных исследований, так и



Рисунок 4. Оценка параметров надежности на машиностроительном предприятии

четкие правила оформления данных документов. Если расчет надежности при проектировании можно представить как конструкторский документ по ГОСТ 2.102-68 с кодом РР (расчеты), то анализ дерева отказов (FTA) не имеет единой формы представления и опирается на рекомендации ряда переведенных зарубежных стандартов.

Кадровый вопрос

Вследствие вышесказанного, к существующим проблемам стоит отнести нехватку квалифицированных кадров, занимающихся оценкой надежности изделий. В ФГОС ВО отсутствует специальность или направление, связанное с надежностью технических систем, а в Едином квалификационном справочнике должностей руководителей, специалистов, служащих (ЕКСД 2019) не существует должности «инженер по надежности» (помимо ракетно-космической промышленности). Поэтому предлагается разработать магистерскую программу по данному направлению, при этом у поступающих бакалавриат должен быть закончен по техническому или математическому направлению. Студентам магистратуры должен быть предложен расширенный курс математических предметов, рассмотрение надежности сложных систем, а также дисциплины, связанные с технической диагностикой.

Заключение

В статье представлена организационная структура подразделения надежности предприятия транспорт-

ного машиностроения и рассмотрена взаимосвязь службы надежности с другими подразделениями предприятия.

Данный подход был предложен авторами на основе как непосредственного функционирования в действующей службе надежности предприятия, производящего компоненты подвижного состава, так и по опыту взаимодействия с отделами надежности предприятий-заказчиков.

Неоспоримым плюсом работы инженером по надежности является возможность разработки новых методов при оценке надежности выпускаемых изделий, реализации планов по оптимизации расчетов и систематизации данных об отказах. Однако реализация данного потенциала может быть затруднительна в силу упомянутых выше факторов таких, как:

- отсутствие значимого веса и компетенций в принятии решений;

- невыстроенные связи взаимодействия отдела надежности с подразделениями предприятия (рис. 3), что делает координацию мероприятий по повышению надежности невозможной;

- недостаточность междисциплинарного подхода в масштабе предприятия в решении вопросов надежности. Иными словами, происходит присвоение инженеру по надежности в большей мере обязанностей инженера-конструктора, специалиста сервисной службы, IT-специалиста и т.д., нежели обязанностей, связанных с непосредственным расчетом и анализом надежности технических систем.

Представленный подход в организации службы надежности является разъяснением для руководителей и менеджеров проектов машиностроительных предприятий роли, которую занимает надежность на всех этапах жизненного цикла. Необходимо понимать, что ошибки, которые допускаются на ранних этапах формирования подразделения надежности, непонимания целей и взаимодействий между подразделениями предприятия могут привести к финансовым потерям. Правильное же представление о функционале службы надежности дает возможность эффективно использовать ресурсы предприятия.

Библиографический список

1. Справочник по надежности [Текст] / Под. ред. Б.Е. Бердичевского, в 3-х томах. Том 3. – М.: Мир, 1970. – 378 с.
2. **Шишмарев, В.Ю.** Надежность технических систем [Текст] / В.Ю. Шишмарев. – М.: Издательский дом «Академия», 2010. – 304 с.
3. **Когге, Ю.К.** Основы надежности авиационной техники [Текст] / Ю.К. Когге, Р.А. Майский. – М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.
4. **Проников, А.С.** Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
5. **Ллойд, Д.** Надежность. Организация исследования, методы, математический аппарат [Текст] / Давид К. Ллойд, Мирон Липов; пер. с англ. Н.Н. Коваленко и Г.А. Русакова; под. ред. Н.П. Бусленко. – М.: Советское радио, 1964. – 688 с.
6. **ГОСТ Р 51901.3-2007** Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надежности [Текст]. – Введ. 2008-09-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 50 с.
7. **Ebeling, C.** An introduction to reliability and maintainability engineering [Text] / Charles E. Ebeling. – McGraw-Hill, 1997. – 486 p.
8. **Wessels, W.** Affordable reliability engineering. Life-Cycle Cost analysis for sustainability and logistical support [Text] / William R. Wessels, Daniel S. Sillivant. – CRC Press, 2015. – 351 p.

9. **Van Valkenburg, M.** Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computers and Communications [Text] / Mac E. Van Valkenburg. – Newnes, 2002. – 1672 p.

10. **Белоусова, М.В.** Автоматизация процесса обработки данных рекламаций на предприятиях машиностроения [Текст] / М.В. Белоусова, В.В. Булатов // Труды XIV международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения 2019»: сб. докл.: ГУАП, 2019. – С.135-140.

11. Надежность машиностроительной продукции [Текст] / Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 328 с.

Сведения об авторах

Мария В. Белоусова, аспирант кафедры моделирования экономических систем, Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, Санкт-Петербург, e-mail: 27bmw1993@mail.ru

Виталий В. Булатов, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Российская Федерация, Санкт-Петербург, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

Вклад авторов в статью

Белоусова М.В. Разработала структуру службы надежности, проанализировала процессы взаимодействия службы надежности с сервисной службой и рассмотрела кадровый вопрос; выполнила обзор отечественного опыта в организации служб надежности на предприятии, резюмировала основные функции службы надежности на предприятии и потенциал ее развития.

Булатов В.В. Провел анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, выполнил обзор зарубежного опыта в организации служб надежности на предприятии, предложил организационную структуру службы надежности, описал взаимодействие службы надежности с другими подразделениями предприятия.

Расчет комплекта ЗИП с использованием комплекса имитационных программ «Диалог»

(Часть 1. Общие положения для расчета комплекта ЗИП)

Борис А. Долгополов^{1*}, Юрий Г. Зайко¹, Виктор А. Михайлов¹, Александр В. Трахтомиров²

¹ ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, НПП «АВТ», Украина, Харьков

* dolgopolov@module.ru



Борис А.
Долгополов



Юрий Г. Зайко



Виктор А.
Михайлов



Александр В.
Трахтомиров

Резюме. Описываются принципы построения комплекса имитационных программ (КИП) «ДИАЛОГ», предназначенного для расчета показателей надежности радиоэлектронных систем (РЭС) произвольной конфигурации, а также для решения вопросов, связанных с обеспечением надежности функционирования РЭС. В КИП «ДИАЛОГ» используется специально разработанная технология «ДИАЛОГ-СИНТЕЗ», позволяющая автоматически синтезировать событийные имитационные модели в виде программ на выбранном языке программирования. Исходными данными для синтеза в КИП «ДИАЛОГ» служат следующие сведения: состав системы в виде комбинации условных блоков; критерии возникновения событий отказов и ремонтов; параметры случайных величин (отказы элементов системы в различных режимах эксплуатации, запросы к ЗИП и т. д.); этапы работы системы и виды ремонтов; перечень рассчитываемых показателей. Для получения необходимых показателей имитационные модели проходят статистические испытания при измененных значениях случайных величин в каждом новом испытании. На основании накопленных результатов по всем прошедшим испытаниям выполняются расчеты необходимых показателей. КИП «ДИАЛОГ» состоит из четырех составных частей: «ДИАЛОГ-НРС» предназначена для расчета показателей надежности неремонтопригодных резервированных систем; «ДИАЛОГ-РРС» предназначена для расчета показателей надежности ремонтпригодных резервированных систем, а также количества и стоимости гарантийных ремонтов; «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» предназначена для расчета комплектов ЗИП для простых нерезервированных систем; «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» предназначена для расчета комплектов ЗИП, работающих с любыми резервированными системами. Расчет комплектов ЗИП производится обычно по типовым методикам, описанным в нормативных документах. При решении прямой задачи расчета оптимального комплекта ЗИП в качестве исходных данных используют требуемое значение одного из двух показателей достаточности (ПД) ЗИП и вид затрат, которые требуется оптимизировать (минимизировать) при достижении заданных значений ПД. При решении обратной задачи расчета оптимального комплекта ЗИП требуется обеспечить заданные затраты на начальные запасы в ЗИП. В качестве ПД запасов в комплекте ЗИП используют среднее время задержки в удовлетворении заявок на запасные части (ЗЧ) комплектом ЗИП $t_{з.зип}$ и коэффициент готовности ЗИП $K_{г.зип}$. Оптимизация комплекта ЗИП с помощью КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» позволяет увеличить возможности пользователя за счет следующих дополнительных характеристик: учет отказов ЗЧ, входящих в состав комплекта ЗИП; оптимизация количества ЗЧ и учет конкретных особенностей при экстренной доставке (ЭД) ЗЧ; возможность использования изделий с любыми видами резервирования; при работе с групповым комплектом ЗИП-Г возможность включения в состав РЭС изделий с разными структурами. Приведена структурная схема взаимодействия программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» между собой, которая предусматривает три режима работы имитационной модели: расчет ПД для конкретного состава ЗИП; расчет предварительных запасов комплекта ЗИП перед началом процесса оптимизации; расчет оптимального комплекта ЗИП. Рассмотрены вопросы выбора необходимого числа и продолжительности испытаний имитационной модели.

Ключевые слова: имитационное моделирование, комплект ЗИП, показатели достаточности ЗИП, методики для расчета и оценки показателей ЗИП.

Для цитирования: Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А., Трахтомиров А.В. Расчет комплекта ЗИП с использованием комплекса имитационных программ «Диалог» (Часть 1. Общие положения для расчета комплекта ЗИП) // Надежность. 2020. №1. С. 32-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-32-38>

Поступила 06.12.2019 г. / После доработки 17.02.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

Комплекс имитационных программ (КИП) «ДИАЛОГ»

Имитационное моделирование имеет в последнее время широкое распространение для решения задач исследования поведения и определения различных характеристик РЭС [1], [2].

КИП «ДИАЛОГ» предназначен для расчета показателей надежности радиоэлектронных систем (РЭС) любой конфигурации, а также для решения вопросов, связанных с обеспечением надежности функционирования РЭС. Расчеты показателей выполняются с использованием имитационных моделей.

Разработка таких моделей имеет следующую особенность: в модели должны быть достаточно точно представлены детали поведения системы при отказах, ремонтах, управляющих воздействиях и т. д. Это может быть достигнуто путем использования универсальных языков высокого уровня [4] и создания моделей типа «ориентированные на события» [3]. Однако это требует значительных затрат и времени на создание таких моделей.

Для решения этой проблемы в КИП «ДИАЛОГ» используется специально разработанная технология «ДИАЛОГ-СИНТЕЗ», позволяющая на основе описания моделируемой системы автоматически синтезировать событийные имитационные модели в виде исходных текстов программ на выбранном языке программирования.

Создание имитационных моделей с использованием этой технологии основано на следующих свойствах рассматриваемых систем:

- если поведение системы при отказах ее компонентов обуславливается только ее составом, связями между компонентами и критериями появления событий отказа, то структуры событийных моделей и их фрагменты для систем с любыми конфигурациями возможно сделать одинаковыми;
- функциональную схему надежности такой системы можно представить как комбинацию условных блоков, число типов которых ограничено и достаточно для описания систем.

Это позволяет создать основу модели, общую для всех моделей выбранного типа, а исходные данные, которые определяют конфигурацию и специфику поведения конкретной системы, могут быть представлены в виде изменений или добавлений в основу модели.

В качестве инструментов, используемых в технологии «ДИАЛОГ-СИНТЕЗ», выступают:

- шаблон, который представляет собой набор фрагментов модели на выбранном языке программирования;
- программы подготовки исходных данных, сохраняемых в виде текстовых файлов;
- программа для синтеза имитационной модели, которая преобразует текстовые файлы, описывающие систему, во фрагменты модели и объединяет их с шаблоном. Результатом является имитационная модель событийного типа на исходном языке программирования. В комплексе «ДИАЛОГ» для этого используется язык

Фортран и библиотека специальных подпрограмм.

Событийный тип синтезируемых моделей в сочетании с использованием универсального языка программирования позволяет с любой точностью воспроизвести поведение системы, а автоматический синтез, полностью исключая этап программирования, во много раз ускоряет и упрощает создание моделей. Время создания моделей, в основном, определяется временем подготовки исходных данных.

Исходными данными для синтеза в КИП «ДИАЛОГ» служат следующие сведения:

- состав системы в виде комбинации условных блоков;
- критерии возникновения событий отказов и ремонтов;
- параметры случайных величин: отказы элементов системы в различных режимах, запросы к ЗИП и т. д.;
- этапы работы системы и виды ремонтов;
- перечень рассчитываемых показателей.

Для получения необходимых показателей имитационные модели проходят статистические испытания при измененных значениях случайных величин в каждом новом испытании. На основании накопленных результатов за все число испытаний выполняются расчеты необходимых показателей.

КИП «ДИАЛОГ» состоит из четырех составных частей:

- Часть 1 «ДИАЛОГ-НРС» предназначена для расчета показателей надежности неремонтопригодных резервированных систем;
- Часть 2 «ДИАЛОГ-РРС» предназначена для расчета показателей надежности ремонтпригодных резервированных систем, а также количества и стоимости гарантийных ремонтов;
- Часть 3 «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» предназначена для расчета комплектов ЗИП для простых нерезервированных систем;
- Часть 4 «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» предназначена для расчета комплектов ЗИП, работающих с любыми резервированными системами.

КИП «ДИАЛОГ-НРС» позволяет определять следующие показатели надежности:

- а) вероятность безотказной работы (ВБР) за заданное время $t - R(t)$;
- б) средняя наработка до отказа – T_0 ;
- в) гамма-процентная наработка до отказа с заданной вероятностью $\gamma - T_\gamma$;
- г) интенсивность отказов РЭС в конце заданного интервала времени $t - \lambda(t)$;
- д) частота отказов в конце заданного интервала времени $t - a(t)$;
- е) данные для построения графика зависимости ВБР от времени;
- ж) данные для построения графика зависимости интенсивности отказов от времени;
- з) данные для построения графика зависимости частоты отказов от времени.

Определения перечисленных показателей надежности приведены в монографии [5].

Структура и результаты работы КИП «ДИАЛОГ-НРС» описаны в статье [2].

КИП «ДИАЛОГ-РРС» позволяет определять следующие показатели надежности ремонтпригодных РЭС и решать вопросы, связанные с надежностью функционирования РЭС:

- а) средняя наработка между отказами – $T_{\text{ср}}$;
- б) средняя частота отказов в конце заданного интервала времени $t - w(t)$;
- в) суммарная частота отказов в конце заданного интервала времени $t - w_c(t)$;
- г) данные для построения графика зависимости средней частоты отказов от времени;
- д) данные для построения графика зависимости суммарной частоты отказов от времени;
- е) количество гарантийных ремонтов на заданных этапах работы РЭС за заданное время t ;
- ж) стоимость гарантийных ремонтов за заданное время t , включающее один или несколько этапов работы РЭС.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» предназначен для расчета оптимального комплекта ЗИП и его характеристик, к которым в первую очередь относятся два показателя достаточности (ПД):

- коэффициент готовности ЗИП $K_{\text{г.зип}}$;
- среднее время задержки в удовлетворении заявок на запасные части (ЗЧ) комплектом ЗИП $\Delta t_{\text{зип}}$.

При решении прямой задачи оптимизации комплекта ЗИП в качестве исходных данных используют требуемое значение ПД ($K_{\text{г.зип}}^{\text{тр}}$ или $\Delta t_{\text{зип}}^{\text{тр}}$) и вид затрат, которые требуется оптимизировать (минимизировать) при достижении заданных ПД.

При решении обратной задачи в качестве исходных данных используют величину ограничений по затратам $C_{\Sigma \text{зип}}^{\text{огр}}$ и заданный ПД ($K_{\text{г.зип}}^{\text{тр}}$ или $\Delta t_{\text{зип}}^{\text{тр}}$), который требуется оптимизировать при заданных ограничениях по суммарным затратам.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» позволяет рассчитать оптимальный комплект ЗИП и его характеристики для простых нерезервированных изделий. Для этого в КИП создается модель структуры ЗИП, а исходными данными для работы модели являются характеристики составных частей (СЧ), из которых состоит изделие.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» позволяет рассчитать оптимальный комплект ЗИП и его характеристики для любых резервированных изделий. Для этого в КИП используются две модели: модель ремонтпригодной системы, созданной с помощью программ, входящих в состав КИП «ДИАЛОГ-РРС», и модель ЗИП, созданная в КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС». Созданные в результате синтеза обе имитационные модели имеют тип «ориентированные на события» одинаковые элементы структуры и единый язык программирования – Фортран, что позволяет организовать их совместную работу со значительным сокращением времени выполнения программ в сравнении с другими языками.

Поток отказов изделия к ЗИП генерируется моделью системы, его вид может быть любым и определяется структурой резервированного изделия и видами ремон-

тов на различных этапах эксплуатации изделия. Поток отказов также может меняться во времени по мере деградации резервированного изделия.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» может использоваться и для расчета комплектов ЗИП, работающих с нерезервированными системами. Однако если изделие представляет собой нерезервированную систему и обращение к ЗИП происходит сразу после отказа изделия, то в связи со значительно меньшей трудоемкостью подготовки исходных данных для расчета комплекта ЗИП используется КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС». В этом случае для генерации модели требуется только подготовка описания структуры ЗИП, а отказы изделия генерируются специальной программой, входящей в состав КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС».

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» и КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» используются для расчета комплектов ЗИП с любыми структурами:

- одиночных комплектов ЗИП (ЗИП-О);
- групповых комплектов ЗИП (ЗИП-Г);
- двухуровневых систем ЗИП (СЗИП).

Общие положения для расчета комплекта ЗИП

Расчет комплектов ЗИП производится обычно по типовым методикам, описанным в нормативных документах [6–8].

В общем случае рассмотрим изделие, состоящее из N_0 типов СЧ (каждый i -ый тип СЧ может иметь k_i экземпляров) и работающее циклически, когда каждый повторяющийся цикл длительностью $T_{\text{ц}}$ состоит из M этапов, причем каждый j -ый этап ($j = 1, \dots, M$) имеет длительность T_j и интенсивность отказов СЧ i -го типа λ_{ij} .

Цикл эксплуатации изделия включает в себя этапы работы в различных условиях, этапы выключенного состояния, этапы технического обслуживания и т. д.

Тогда интенсивность замен СЧ i -го типа рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{\text{зи(СЧ)}} = k_i \cdot \left[\left(\sum_{j=1}^M T_j \cdot \lambda_{ij} \right) / T_{\text{ц}} \right], \quad (1)$$

где $\sum_{j=1}^M T_j = T_{\text{ц}}$.

Исходные данные по составу СЧ изделия заносятся в колонки 1-2 табл. 1, а исходные данные, входящие в формулу (1), заносятся в колонки 3–6 табл. 1 (в колонках 4-6 вместо конкретных чисел проставлены символы «+»). Рассчитанное по формуле (1) значение $\Lambda_{\text{зи(СЧ)}}$ для каждого i -го типа СЧ заносится в колонку 7 табл. 1.

Обычно используются четыре основных типа стратегий пополнения запасов в комплектах ЗИП:

- периодическое пополнение (условный индекс $\alpha_i = 1$);
- периодическое пополнение с экстренными доставками (ЭД) ($\alpha_i = 2$);
- непрерывное пополнение ($\alpha_i = 3$);

Таблица 1. Расчет интенсивности замен $\Lambda_{zi(CЧ)}$ для СЧ изделия

Номер СЧ, i	Наименование СЧ	Номер этапа, j	Длительность этапа, T_j , ч	k_j , штук	$\lambda_{ij} \times 10^6$, 1/ч	$\Lambda_{zi(CЧ)} \times 10^6$, 1/ч
1	2	3	4	5	6	7
1		1	+	+	+	+
		...	...	...	...	...
		M	+	+	+	+
...	...	...	...	...	...	...
N_o		1	+	+	+	+
		...	...	...	...	...
		M	+	+	+	+

– пополнение по уровню неснижаемого запаса ($\alpha_i = 4$).

Кроме типа (индекс α_i) каждая стратегия пополнения характеризуется одним (T_i) или двумя (T_i и β_i) числовыми параметрами, имеющими значения:

– при $\alpha_i = 1$ $T_i = T_{ni}$ – период планового пополнения i -запаса, $\beta_i = 0$ – параметр не используется;

– при $\alpha_i = 2$ $T_i = T_{ni}$ – период планового пополнения i -запаса, $\beta_i = T_{эи}$ – время ЭД ЗЧ i -типа;

– при $\alpha_i = 3$ $T_i = T_{ди}$ (T_{pi}) – время доставки (ремонта) ЗЧ i -типа, $\beta_i = 0$ – параметр не используется;

– при $\alpha_i = 4$ $T_i = T_{ди}$ – время доставки ЗЧ i -типа, $\beta_i = m_i$ – уровень неснижаемого запаса i -типа.

Каждый отдельный запас в комплекте ЗИП может пополняться в общем случае по своей отдельной стратегии, отличающейся от других как типом (α_i), так и значениями числовых параметров (T_i и β_i).

При периодическом пополнении с ЭД должны быть дополнительно заданы следующие данные по ЭД:

уровень пополнения запасов;

номенклатура пополнения по запасам;

время обращения за ЭД: при отказе запаса или при использовании последней ЗЧ (предотказ).

ПД комплекта ЗИП $K_{г.ЗИП}^{(тр)}$ или $\Delta t_{ЗИП}^{тр}$ определяются через соответствующие ПД каждого i -го запаса Δt_{zi} и $K_{гi}$ ($i = 1 \dots N_o$) по следующим формулам [8]:

$$\Delta t_{3,ЗИП} = \frac{\sum_{i=1}^{N_o} \Lambda_{zi(CЧ)} \cdot \Delta t_{zi}}{\sum_{i=1}^{N_o} \Lambda_{zi(CЧ)}}; \quad (2)$$

$$K_{г.ЗИП} = \prod_{i=1}^{N_o} K_{гi}. \quad (3)$$

Теоретические формулы для расчета ПД Δt_{zi} и $K_{гi}$, полученные на основе математических моделей, предложенных в [9], приведены в табл. 2.

В таблице использованы следующие обозначения:

A_i – среднее число поступающих в комплект ЗИП заявок на ЗЧ i -го типа за время T_i

$$A_i = k_i \cdot \Lambda_{zi(CЧ)} \cdot T_i; \quad (4)$$

L_i – начальный уровень запаса i -го типа в ЗИП;

m_i – уровень неснижаемого запаса i -го типа при пополнении по уровню m_i .

В ГОСТ 27.507-2015 [8, приложение А] приведены результаты оптимизации комплекта ЗИП-О по требуемому ПД $K_{г.ЗИП-О}^{(тр)} \geq 0,95$ для РЭС типа «Памир-1», состоящей из $N_o = 30$ СЧ. Оптимизация проведена по типовой методике с помощью пакетов программ «РОКЗЭРСИЗ» и «АСОНИКА-К-ЗИП».

Оптимизация комплекта ЗИП с помощью КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» позволяет увеличить возможности пользователя по сравнению с указанными пакетами программ за счет следующих дополнительных характеристик:

– учет отказов ЗЧ, входящих в состав комплекта ЗИП;

– оптимизация количества ЗЧ и учет конкретных особенностей при ЭД в случае использования стратегии пополнения с $\alpha_i = 2$;

– возможность использования СЧ с любыми видами резервирования (например, любой способ резервирования из [2]);

Таблица 2. Формулы расчета ПД для запасов i -го типа в комплекте ЗИП-О

Стратегия пополнения	Показатели достаточности
Периодическое пополнение ($\alpha_i = 1$) $T_i = T_{ni}$	$\Delta t_{zi} = T_{ni} \left[\exp(-A_i) \cdot \sum_{\gamma=L_i+2}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma-2}}{\gamma!} (\gamma - L_i - 1) \right]$, $K_{гi} = 1 - \exp(-A_i) \cdot \sum_{\gamma=L_i+2}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma-1}}{\gamma!} (\gamma - L_i - 1)$
Периодическое пополнение с ЭД ($\alpha_i = 2$) $T_i = T_{ni}$	$\Delta t_{zi} = T_{эи} \left[\exp(-A_i) \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\gamma=v-(L_i+1)}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma-1}}{\gamma!} \right]$, $K_{гi} = 1 - \frac{T_{эи}}{T_{ni}} \left[\exp(A_i) \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\gamma=v-(L_i+1)}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma}}{\gamma!} \right]$
Непрерывное пополнение ($\alpha_i = 3$) $T_i = T_{ди}$	$\Delta t_{zi} = T_{ди} \cdot A_i^{L_i} \left[(L_i + 1)! \sum_{\gamma=0}^{L_i+1} \frac{A_i^{\gamma}}{\gamma!} \right]^{-1}$, $K_{гi} = 1 - A_i^{L_i+1} \left[(L_i + 1)! \sum_{\gamma=0}^{L_i+1} \frac{A_i^{\gamma}}{\gamma!} \right]^{-1}$
Пополнение по уровню m_i ($\alpha_i = 4$) $T_i = T_{ди}$	$\Delta t_{zi} = T_{ди} \cdot A_i^{m_i+1} \left[A_i^{m_i+1} + (L_i - m_i)(1 + A_i)^{m_i+1} \right]^{-1}$, $K_{гi} = 1 - A_i^{m_i+2} \left[A_i^{m_i+2} + (L_i - m_i)(1 + A_i)^{m_i+1} \right]^{-1}$

Таблица 3. Перечень методик при расчете и оценке показателей ЗИП

№	Наименование методики	Обозначение и назначение методики для разных видов ЗИП		
		а) ЗИП-О	б) ЗИП-Г	в) СЗИП
1	Оценка запасов по критерию $K_{г.ЗИП}$	1а. Оценка величины $K_{г.ЗИП-О}$	—	1в. Оценка величины $K_{г.СЗИП}$
2	Оценка запасов по критерию $\Delta t_{з.ЗИП}$	2а. Оценка величины $\Delta t_{з.ЗИП-О}$	2б. Оценка величины $\Delta t_{з.ЗИП-Г}$	2в. Оценка величины $\Delta t_{з.СЗИП}$
3	Оценка запасов по критерию затрат на ЗИП	3а. Оценка величины $C_{ЗИП-О}$	3б. Оценка величины $C_{ЗИП-Г}$	3в. Оценка величины $C_{СЗИП}$
4	Расчет оптимальных запасов по критерию $K_{г.ЗИП}$	4а. Минимизация затрат на ЗИП-О при выполнении требований к $K_{г.ЗИП-О}$	—	4в. Минимизация затрат на СЗИП при выполнении требований к $K_{г.СЗИП}$
5	Расчет оптимальных запасов по критерию $\Delta t_{з.ЗИП}$	5а. Минимизация затрат на ЗИП-О при выполнении требований к $\Delta t_{з.ЗИП-О}$	5б. Минимизация затрат на ЗИП-Г при выполнении требований к $\Delta t_{з.ЗИП-Г}$	5в. Минимизация затрат на СЗИП при выполнении требований к $\Delta t_{з.СЗИП}$
6	Расчет оптимальных запасов по критерию заданных затрат $C_{ЗИП}$	6а. Оптимизация ПД при заданных затратах на начальные запасы в ЗИП-О	6б. Оптимизация ПД при заданных затратах на начальные запасы в ЗИП-Г	6в. Оптимизация ПД при заданных затратах на начальные запасы в СЗИП

– возможность включения в состав РЭС изделий с разными структурами при работе с групповым комплектом ЗИП-Г.

Перечень основных методик, используемых при оценке показателей и расчете основных видов ЗИП, приведен в табл. 3.

Структура КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС»

В состав КИП «ДИАЛОГ» входят следующие части, предназначенные для расчета комплектов ЗИП:

- часть 3 «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» для расчета комплектов ЗИП для простых нерезервированных систем;
- часть 4 «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» для расчета комплектов ЗИП, работающих с любыми резервированными системами.

В настоящей статье описана более подробно методика расчета комплекта ЗИП-О с помощью КИП «ДИАЛОГ».

Методика расчета основана на замене натурных испытаний системы «изделие-комплект ЗИП» их имитацией с помощью событийных моделей. Модели подвергаются статистическим испытаниям, для каждого испытания подсчитывается число успешных и неуспешных запросов к комплекту ЗИП, величины задержек доставки ЗЧ и другие показатели. Далее выполняются следующие действия:

- суммируются все запросы к каждому запасу за заданное число испытаний;
- суммируются все успешные запросы к запасу за заданное число испытаний;
- суммируются задержки доставки ЗЧ;
- определяются средние числа обращений к запасу, успешных обращений, задержек доставки и др.;
- на основе этих результатов вычисляются необходимые показатели.

При использовании «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» создается модель, имитирующая работу изделия, работу ЗИП и их взаимодействие.

Такая модель может использоваться как для нерезервированных изделий, так и резервированных с любыми видами резервирования, при использовании любых видов ремонтов на разных этапах эксплуатации системы.

КИП позволяет спроектировать оптимальный состав ЗИП, а также получить следующие показатели для ЗИП с любой структурой для резервированных и нерезервированных изделий при использовании любых видов ремонтов:

- коэффициент готовности и другие показатели с учетом собственных отказов ЗЧ, входящих в ЗИП;
- оптимальный состав ЗИП по критерию минимума затрат при заданных ПД;
- оптимальный состав ЗИП при ограничении по заданным затратам.

В случае использования запросов к ЗИП, полученных путем генерации простейшего потока отказов, эти показатели могут быть получены только для нерезервированного изделия и при использовании срочного полного ремонта.

Структурная схема взаимодействия программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» показана на рис. 1.

По функциональному признаку программы КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» разбиты на 3 раздела.

Раздел А. Исходные данные.

Программа 3.1 «Имитация запросов изделия к ЗИП».

Эта программа предназначена для генерации запросов от изделия к комплекту ЗИП в случае использования нерезервированных изделий. В случае резервированных изделий используется информация от КИП «ДИАЛОГ-РРС».

В результате работы программы создаются случайные последовательности запросов к каждому запасу для промежутка времени, равного запланированному времени

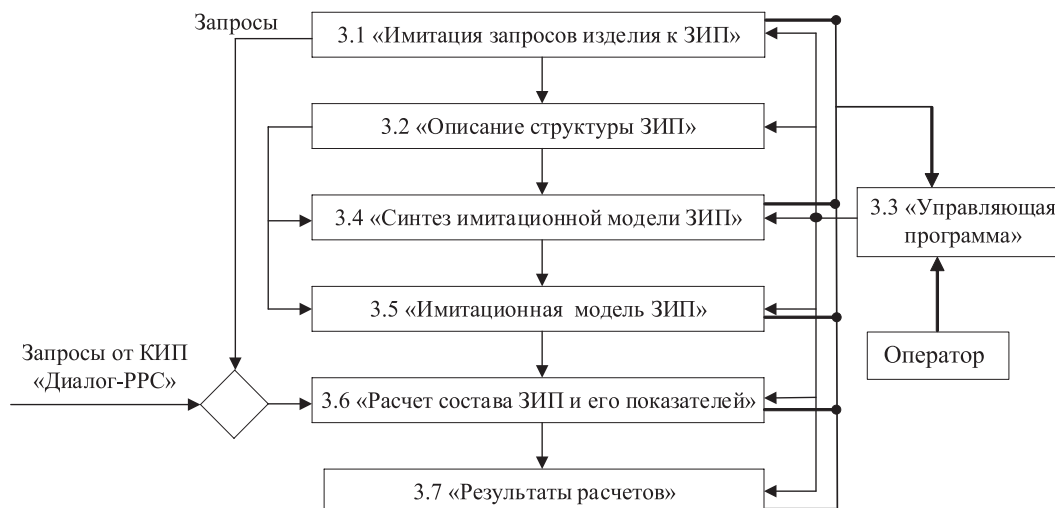


Рисунок 1. Структурная схема взаимодействия программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС»

моделирования. Время между запросами к запасу – это дискретная случайная величина с экспоненциальным законом распределения и средним значением, равным среднему времени между отказами СЧ.

Для генерации времени запросов применяется подпрограмма, использующая логарифмический способ получения случайных дискретных последовательностей с экспоненциальным законом распределения [10].

Пример программы, использующей этот способ, показан в [3].

Программа 3.2 «Описание структуры ЗИП».

Программа служит для описания комплекта ЗИП с любой структурой.

Полученные данные используются при автоматическом синтезе имитационной модели ЗИП.

Программа также служит для формирования исходных данных для расчета показателей достаточности и выполнения оптимизации комплекта ЗИП. Данные представляются в виде таблицы и сохраняются как текстовый файл.

В дальнейшем эти данные используются в программе 3.4 «Синтез имитационной модели ЗИП» и в программе 3.5 «Имитационная модель ЗИП» при проведении расчетов и оптимизации.

Раздел Б. Расчет показателей и оптимизация.

Программа 3.3 «Управляющая программа».

Эта программа служит для запуска КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» и управления выполнением программ. Управляющая программа получает информацию о результатах работы программ, выполняет запуск очередной программы, устанавливает режимы работы имитационной модели, режимы вывода и сохранения информации в программе 3.7 «Результаты расчетов».

Выполнение программ комплекса может выполняться в автоматическом режиме либо с участием оператора: по его команде работа комплекса может быть приостановлена и возобновлена через промежуток времени, режимы работы программ при запуске могут быть изменены, отдельные программы могут выполняться повторно.

Программа 3.4 «Синтез имитационной модели ЗИП».

На основе данных, полученных от программы 3.2 «Описание структуры ЗИП» и служебных файлов, синтезируется имитационная событийная модель ЗИП на языке Фортран с параметрами, указанными в описании структуры ЗИП. После трансляции формируется исполняемый файл модели.

Программа 3.5 «Имитационная модель ЗИП».

Синтезированная модель относится к типу «Ориентированная на события» и формируется в виде исходного текста и исполняемого файла. Модель может иметь самостоятельное применение вне КИП «ДИАЛОГ-ЗИП».

Принцип работы модели основан на имитации следования в течение времени моделирования следующих видов событий, происходящих в ЗИП:

- запросов от изделия на замену отказавших СЧ;
- пополнения ЗИП;
- запросов на доставку ЗЧ;
- отказов ЗЧ, находящихся в ЗИП.

При появлении события выполняются действия, которые относятся к типу события: изменяются составы запасов и, при наступлении соответствующих условий, планируются времена поступления пополнений ЗИП.

Для выполнения действий, связанных с событием, используются специальные подпрограммы, где в качестве параметра указан запас, для которого предназначены действия.

Предусмотрено 3 режима работы имитационной модели, которые устанавливаются управляющей программой:

1. Расчет показателей. В этом режиме рассчитываются ПД для существующего состава ЗИП.
2. Расчет нулевого запаса. Рассчитываются начальные уровни запасов перед оптимизацией.
3. Расчет оптимального состава ЗИП.

После установки режима выполняются испытания имитационной модели.

При этом используются параметры, полученные от программы 3.2 «Описание структуры ЗИП», а входными данными при испытаниях являются запросы, полученные от программы 3.1 «Имитация запросов изделия к ЗИП».

Программа 3.6 «Расчет состава ЗИП и его показателей».

В результате обработки результатов испытаний этой программой рассчитываются ПД или, если задан режим оптимизации, кроме показателей обрабатываются и выводятся данные об оптимальном составе ЗИП.

Раздел В Результаты расчетов.

Программа 3.7 «Результаты расчетов».

Программа служит для сохранения результатов расчетов для каждого этапа и всего времени работы системы, а также потоков запросов и описаний структур ЗИП.

Для функционирования имитационной модели должны быть определены следующие характеристики:

- продолжительность одного испытания (время моделирования);
- число испытаний имитационной модели.

Продолжительность одного испытания в единицах модельного времени равна длительности выбранного промежутка времени работы системы «изделие – комплект ЗИП», для которого рассчитываются показатели ЗИП. Длительность этого промежутка равна времени моделирования, которое задается в описании структуры ЗИП и может быть изменено при запуске модели.

Рекомендованное минимальное число испытаний модели $n_{\text{исп}}^{(\min)}$ вычисляется при формировании описания комплекта ЗИП. Расчет выполняется исходя из условия, что для получения приемлемой точности вычислений для СЧ с минимальной интенсивностью отказов число произошедших отказов за все время испытаний должно быть не менее 1000.

Библиографический список

1. Дыкина Т.К. Принципы построения диалоговой имитационной системы моделирования для исследования надежности ВК [Текст] / Т.К. Дыкина, Ю.Г. Зайко, В.Н. Иванов и др. // Проблемы управления движением и навигации. – 1989. – № 24. – С. 29-36.
2. Зайко, Ю.Г. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем [Текст] / Ю.Г. Зайко, Л.Н. Искандарова, А.В. Трахтомиров // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 8-17.
3. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки моделирования и базы данных [Текст] / Под ред. М. Брейера. – М.: Мир, 1979. – 463 с.
4. Schmidt, Bernd. GPSS-Fortran. Version II. Einführung in die Simulation diskreter Systeme mit Hilfe eines FORTRAN-Programmpaketes [Text] / B. Schmidt. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1978. – 535 p.
5. Половко, А.М. Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 446 с.

6. РД В 319.01.19-98. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП. – Введ. 1999-06-15. – М.: Изд. Технический комитет по военной стандартизации № 319, 1998.

7. ГОСТ РВ 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – Введ. 2006-01-01. – М., Стандартинформ, 2005. – IV, 38 с.

8. ГОСТ 27.507-2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов [Текст]. – Введ. 2017-03-01. – М., Стандартинформ, 2016. – III, 48 с.

9. Головин, И.Н. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем [Текст] / И.Н. Головин, Б.В. Чуварыгин, А.Э. Шура-Бура. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.

10. Кнут, Д.Э. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 2. Получисленные методы [Текст] / Д.Э. Кнут. – М.: Мир, 1977. – 728 с.

Сведения об авторах

Борис А. Долгополов – ведущий инженер ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: dolgoplov@module.ru

Юрий Г. Зайко – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, начальник отдела ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: y.zayko@module.ru

Виктор А. Михайлов – доктор технических наук, заместитель Генерального директора по бортовым разработкам ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: vmikh@module.ru

Александр В. Трахтомиров – директор НПП «АВТ», Украина, Харьков, e-mail: vehxbr39@ukr.net

Вклад авторов в статью

Долгополов Б.А. Анализ различных вопросов построения оптимальной системы изделие – комплект ЗИП, оформление результатов исследований.

Зайко Ю.Г. Общее описание КИП «ДИАЛОГ». Анализ и определение требований к построению оптимальной системы ЗИП, вывод основных формул, описание различных вариантов построения ЗИП и рекомендации по их использованию.

Михайлов В.А. Общее руководство постановкой задачи построения оптимальной системы обслуживания РЭС комплектом ЗИП и выбора требований к построению оптимальной системы ЗИП.

Трахтомиров А.В. Разработка программных средств для проведения имитационного моделирования, его реализация и обработка результатов, позволяющих получить оценку работы системы изделие – комплект ЗИП. Описание функционирования программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС».

Влияние половых различий на надежность профессионального психологического отбора авиационных специалистов

Ольга В. Ариничева^{1*}, Татьяна В. Зюба¹, Алексей В. Малишевский¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Российская Федерация, Санкт-Петербург

* 2067535@mail.ru



Ольга В.
Ариничева



Татьяна В. Зюба



Алексей В.
Малишевский

Резюме. Цель. В данной работе рассмотрена проблема надежности действующего в настоящее время в гражданской авиации профессионального психологического отбора с точки зрения его унифицированной пригодности для лиц мужского и женского пола. Ставилась задача оценить некоторые профессионально важные качества у мужчин и женщин, уже успешно прошедших профессиональный психологический отбор при поступлении в авиационное учебное заведение, и определить наличие или отсутствие различий между полученными результатами. С этой целью было проведено исследование, в котором приняли участие 60 студентов-диспетчеров третьего курса Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (35 мужчин и 25 женщин). **Методы.** В качестве психодиагностических методик были использованы разработанные в ВМА им. Кирова опросники «Прогноз-1» и «Прогноз-2» для оценки нервно-психической устойчивости, тест Г.Ю. Айзенка (H.J. Eysenck) для определения уровня развития интеллекта, опросник А. Басса и А. Дарки (A. Buss & A. Durkee) для диагностики состояния агрессии. Использованы также данные более ранних исследований, проведенных авторами. Для статистической обработки результатов были применены методы корреляционного анализа и критерий согласия Пирсона (χ^2). **Результаты.** Анализ результатов психодиагностического обследования показал, что достоверных различий по уровню развития интеллекта мужчин и женщин в обследованной группе не выявлено. В целом уровень интеллекта участников исследования достаточно высок (средний IQ мужчин – 121,17, а женщин – 123,04). Оценка нервно-психической устойчивости обследованной группы, выполненная на основе двух различных модификаций опросника «Прогноз», также не выявила достоверных различий между мужчинами и женщинами (нервно-психическая устойчивость женщин несколько ниже, чем у мужчин, но выявленная разница явно не принципиальна). Однако и среди мужчин (1 чел.), и среди женщин (1 чел.) были выявлены представители, для которых прогноз по обоим диагностическим методикам оказался «неблагоприятным». Достоверные различия между обследованными мужчинами и женщинами выявлены по склонности к физической агрессии (тест А. Басса и А. Дарки). **Выводы.** По результатам использованных в работе психодиагностических методик принципиальных различий по половому признаку не выявлено. Исключение – это склонность к физической агрессии. У женщин данный показатель явно ниже, хотя девушки с высокой агрессивностью тоже присутствуют. Основная масса участников эксперимента показала хорошую нервно-психическую устойчивость и достаточно высокий уровень развития интеллекта. И хотя в обследованной группе достоверных различий по IQ нет (и есть основания считать, что чем больше обследованная группа, тем меньше достоверных различий между мужчинами и женщинами по уровню развития интеллекта), однако тенденция, что у женщин-авиаспециалистов IQ в целом выше, просматривается. Необходимо продолжить данные исследования, расширяя спектр оценочных методик, в том числе и за счет альтернативных подходов, не использующих тесты типа «личный опросник», а также параллельно провести оценку выраженности психологических профессионально важных качеств авиационных специалистов, но не по критерию половой принадлежности, а в соответствии с идентифицируемым гендерным типом личности кандидатов.

Ключевые слова: профессиональный психологический отбор, половые различия, интеллект, нервно-психическая устойчивость, агрессивность.

Для цитирования: Ариничева О.В., Зюба Т.В., Малишевский А.В. Влияние половых различий на надежность профессионального психологического отбора авиационных специалистов // Надежность. 2020. № 1. С. 39-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-39-46>

Поступила 06.11.2019 г. / После доработки 24.01.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

Введение. Одним из путей снижения дестабилизирующего влияния человеческого фактора (ЧФ) на безопасность полетов [1, 2] является грамотная организация профессионального психологического отбора (ППО) авиационных специалистов [3], что уже на начальном этапе может позволить отсеять тех, кто по различным причинам не пригоден к работе в авиации. Особенно это касается лиц операторских профессий – пилотов и диспетчеров управления воздушным движением (УВД).

Действительно, действия тех же пилотов в аварийных ситуациях выглядят совершенно по-разному. В одном случае [4] мы наблюдаем четкие, грамотные действия в по-настоящему тяжелой ситуации, в других [5-8] мы видим панику и действия, приводящие к катастрофическим последствиям.

Как пишет известный авиационный психолог Н.В. Якимович о катастрофе RRJ-95B RA-89098: «После разрушительного приземления и начала сильнейшего пожара с угрозой ежесекундного взрыва самолета, психика пилотов неизбежно перешла в последнюю стадию стресса – в состояние паники. Это доказывает тот факт, что пилоты после приземления прекратили свои профессиональные действия и не выключили работающие двигатели. Они бросились спасать пассажиров и свои собственные жизни, как им подсказывал инстинкт самосохранения. Психика человека подчиняется законам, заложенным природой, и пересилить эти законы не всегда возможно! Поэтому нельзя требовать от людей невозможного, т.е. того, что они не в состоянии сделать, пребывая в неблагоприятных психических состояниях!» [9]. Можно, разумеется, согласиться с мнением Н.В. Якимович о том, что невозможного от людей требовать нельзя, но факт остается фактом – то, что для одного невозможно, для другого возможно вполне. Дамир Юсупов посадил самолет с отказавшими двигателями на кукурузное поле [4]. Безусловно, элемент везения здесь тоже присутствует, но, в первую очередь, присутствуют высокий профессионализм и высокая нервно-психическая устойчивость командира воздушного судна (КВС). А вот в отчете Межгосударственного авиационного комитета (МАК) по результатам расследования катастрофы Ан-148-100B RA-61704 [7] прямо говорится о том, что среди причин катастрофы есть и: «индивидуальные психологические особенности пилотов (для КВС – снижение интеллектуальной и поведенческой гибкости, фиксация на собственной позиции с неспособностью (невозможностью) «слышать» подсказки со стороны второго пилота; для второго пилота – нарушение организованности и последовательности действий), которые в стрессовой ситуации при отсутствии должного уровня управления ресурсами экипажа вышли на первый план; потеря работоспособности КВС в психологическом плане (психологический ступор, psychological incapacitation), что привело к полной потере им пространственной ориентировки и не позволило отреагировать на правильные подсказки и действия второго пилота, в том числе при срабатывании предупреждения системы EGPWS типа PULL UP» [7].

В процессе катастроф Boeing 737 в Казани [6] и в Ростове-на-Дону [8] экипажи не смогли уйти на второй круг на исправных (!!!) самолетах. В обоих случаях на борту имела место паника. А вот у Tammie Jo Shults, пилотирующей такой же Boeing 737 с «взорвавшимся» двигателем и в условиях разгерметизации, даже голос не дрогнул. И она успешно посадила поврежденный самолет [10]. То есть, люди все разные, с разной психологической устойчивостью и другими важными психологическими качествами. И задача ППО разработать надежные критерии отбора. Если мы действительно ставим во главу угла безопасность полетов, то задача повышения надежности ППО, безусловно, является важной и актуальной.

Постановка проблемы. Действующее ныне «Руководство» [3], где оговорены вопросы ППО авиационных специалистов, фактически является ухудшенной копией советского «Руководства» [11]. В «Отчете» [12] прямо говорится о том, что некоторые вопросы, конкретно прописанные в «Руководстве» [11], в «Руководстве» [3] оказались забытыми. Подробно авторы поднимали этот вопрос в статье [2].

Но еще один важный момент, это то, что и «Руководство» [11], а соответственно и «Руководство» [3], были, в силу тогдашней ситуации в авиационной отрасли, «заточены» исключительно под мужчин. Авторы разбирали ряд возникающих при этом проблем в своей работе [1].

Ни в коей мере авторы не ставят под сомнение, что есть женщины, которые способны быть отличными пилотами. Да, разумеется, не все, но ведь и далеко не все мужчины способны ими быть. Что касается женщин, ставших выдающимися пилотами, то кроме упомянутой Tammie Jo Shults можно вспомнить и Amelia Mary Earhart и множество советских и российских выдающихся женщин-летчиц: Л.В. Звереву, В.С. Гризодубову, П.Д. Осипенко, М.М. Раскову, М.Л. Попович, Л.М. Уланову, М.В. Попович, С.Е. Савицкую, С.В. Капанину и многих других.

Другой вопрос, должен ли ППО мужчин отличаться от ППО женщин? По здравому смыслу – должен. Хотя бы по тем причинам, которые рассмотрены в работе [1]. Но не все так просто. В настоящей статье и ставилась задача исследовать некоторые профессионально важные качества у мужчин и женщин и определить наличие или отсутствие различий между полученными результатами.

Материал и методы. В рамках исследования влияния половых различий на надежность профессионального психологического отбора авиационных специалистов было проведено исследование, в котором приняли участие 60 студентов третьего курса факультета летной эксплуатации специализации «Использование воздушного пространства» (ИВП) Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУ ГА), то есть, будущих диспетчеров УВД. Мужчин из них было 35, а женщин – 25 человек.

В качестве психодиагностических методик были использованы:

- опросник «Прогноз-1» для оценки нервно-психической устойчивости (НПУ) (N_1 – НПУ в баллах) [13];
- опросник «Прогноз-2» также для оценки НПУ (N_2 – НПУ в баллах) [14];
- тест Hans Jürgen Eysenck для определения уровня развития интеллекта [15] (IQ – коэффициент интеллекта);
- Тест Arnold H. Buss & Ann Durkee (для определения A_{Φ} – физической агрессии, A_K – косвенной агрессии, A_p – раздражительности, A_H – негативизма, A_O – обидчивости, A_{Π} – подозрительности, A_B – вербальной агрессии и A_A – аутоагрессии) [16];
- Тест Kenneth W. Thomas & Ralph H. Kilmann (для определения стилей поведения в конфликте: $T_{СП}$ – соперничества, $T_{СТ}$ – сотрудничества, $T_{КМ}$ – компромисса, $T_{ИЗ}$ – избегания, $T_{ПР}$ – приспособления) [16];
- Тест А. Ассингера (для определения уровня агрессивности – $\mathcal{Q}_{ACC}$) [16];
- Тест В.И. Андреева (для определения уровня конфликтности личности – $\mathcal{Q}_{АНДР}$) [17];
- Тест Walter W. Cook & Donald M. Medley (для определения уровня Y_B – враждебности, Y_{Π} – цинизма, Y_A – агрессии) [18].

Кроме того для анализа были использованы ранее полученные данные, опубликованные авторами в работах [19-22].

Для анализа результатов использовался язык программирования R, который широко применяется как статистическое программное обеспечение для анализа данных и фактически стал стандартом для статисти-

ческих программ [23] (доступен под лицензией GNU GPL [24]). В работе были использованы методы корреляционного анализа [25] и критерий согласия Пирсона (χ^2) [25].

Исследование проводилось в соответствии с основными биоэтическими правилами [26] на добровольной основе.

Результаты и обсуждение. Полученные результаты оказались не вполне ожидаемыми. На рис. 1 и в табл. 1 показано распределение участников данного исследования по уровню развития интеллекта. Как можно видеть, интеллект участников примерно одинаков.

Уровень развития интеллекта у обследованных участников достаточно высок – средний IQ по группе 121,95. При этом средний IQ мужчин – 121,17, а женщин – 123,04. Достоверных различий не выявлено (для числа степеней свободы $v = 2$ эмпирическое значение $\chi^2_{\text{эмп}}$ критерия Пирсона [25] меньше его критического значения для уровня $p < 0,05$ $\chi^2_{0,05} = 5,991$).

Если сравнить результаты настоящего исследования с результатами, полученными авторами ранее [22, 27, 28], то картина получается достаточно схожей, хотя и имеющей некоторые отличия. Так, у другой группы таких же третьекурсников СПбГУ ГА специализации ИВП, принимавшей участие в эксперименте, описанном в работе [27], аналогичные показатели по этому же тесту [15] (см. табл. 2) получились схожими: средний по группе IQ = 119,15 и у мужчин и женщин – 115,00 и 124,48 соответственно. Здесь различия между мужчинами и женщинами вышли на достоверный уровень ($\chi^2_{0,01} = 9,210 > \chi^2_{\text{эмп}} = 7,8652 > \chi^2_{0,05} = 5,991$ для $v = 2$), но это скорее исключение, нежели правило.

Таблица 1 – Распределение участников исследования по уровню развития интеллекта

Уровень развития интеллекта		В целом		Мужчины		Женщины	
		чел.	%	чел.	%	чел.	%
сверхнизкий	$70 > IQ$	0	0	0	0	0	0
низкий	$90 \geq IQ \geq 70$	1	1,7	0	0	1	4,0
средний	$110 \geq IQ > 90$	13	21,7	8	22,9	5	20,0
высокий	$130 \geq IQ > 110$	26	43,3	16	45,7	10	40,0
сверхвысокий	$IQ > 130$	20	33,3	11	31,4	9	36,0

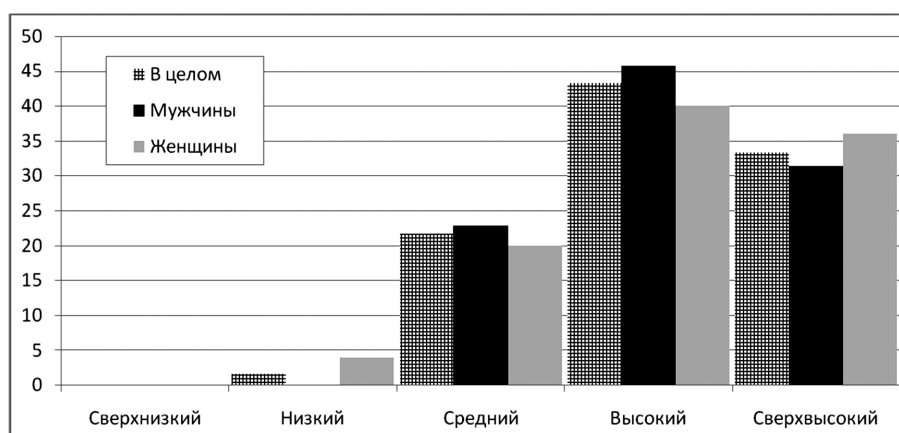


Рисунок 1. Распределение (%) обследованных участников по уровню развития интеллекта (по тесту Hans Jürgen Eysenck)

Таблица 2 – Распределение коэффициента интеллекта (IQ) по признаку пола у студентов-диспетчеров УВД (по данным эксперимента, описанного в работе [27])

Студенты-диспетчеры	IQ				
	сверх-низкий	низкий	сред-ний	высо-кий	сверх-высокий
	< 70	70-100	101-110	111-130	> 130
женщины	0	1	3	9	8
мужчины	0	5	11	6	5

Так, в работе [28], где приводятся данные о 1294 студентах СПбГУ ГА 1-2 курсов различных специализаций, обследованных с помощью теста Rudolf Amthauer [29], изучено наличие различий по уровню развития интеллекта у мужчин и женщин. При этом по критерию Пирсона были выявлены достоверные различия для диспетчеров УВД и организаторов авиационных перевозок, а для инженеров, гуманитариев (PR и HR) и юристов достоверных различий по половому признаку не наблюдалось. Следует отметить, что наличие до-

стоверных различий в выборке диспетчеров выглядит скорее как флуктуация, поскольку женщин в выборке всего 18 против 50 мужчин. А как видно из табл. 3, где приведены более полные данные по этому тесту из [22], по всем категориям кроме юристов IQ женщин несколько выше.

Еще одним важным психологическим качеством оператора является его нервно-психическая устойчивость.

Если в эксперименте, описанном в работе [27], в целом все участники имеют НПУ не ниже удовлетворительной (см. табл. 4), хотя разброс и достаточно велик – от 3 до 10. (Обычно по данным, полученным в СПбГУ ГА, он бывает от 4 до 8, большие отклонения встречаются нечасто. Оценка 3 достаточно низка. Это предел, при котором прогноз еще считается благоприятным для операторской деятельности.) Между выборками мужчин и женщин по оценкам НПУ ($O_{НПУ}$) достоверных различий по критерию Пирсона не выявлено ($\chi^2_{эмп} = 0,7385 < \chi^2_{0,05} = 5,991$ для $v = 2$).

В настоящем же исследовании (см. табл. 5 и рис. 2 и 3) и среди мужчин, и среди женщин попало по участнику с $O_{НПУ} = 1$, то есть с неблагоприятным прогнозом. Трудно сказать, что это – правда или неадекватное выполнение

Таблица 3 – Результаты 1697 студентов СПбГУ ГА, выполнивших тест R. Amthauer (распределение по группам развития интеллекта для наглядности приведено в %) [22]

Студенты	IQ								Средний балл
	< 100	100-105	106-110	111-115	116-120	121-125	126-130	130 <	
Пилоты									
Муж. (245 чел.)	4,49	7,36	11,02	21,63	26,12	16,73	11,02	1,63	114,74
Жен. (0 чел.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Диспетчеры									
Муж. (60 чел.)	1,67	10,00	10,00	30,00	25,00	16,66	5,00	1,67	114,10
Жен. (25 чел.)	-	-	8	16	24	40	12	-	118,08
Техники									
Муж. (371 чел.)	2,43	2,96	6,47	28,84	29,38	21,56	6,74	1,62	115,73
Жен. (43 чел.)	2,33	4,65	6,97	23,26	30,23	11,63	18,6	2,33	116,54
Организаторы перевозок									
Муж. (130 чел.)	7,69	3,85	16,15	24,62	19,23	18,46	6,92	3,08	113,69
Жен. (125 чел.)	4,00	4,80	8,80	21,60	30,40	21,60	8,00	0,80	115,17
Экономисты									
Муж. (102 чел.)	1,96	2,94	11,77	33,33	28,43	13,73	6,86	0,98	114,59
Жен. (330 чел.)	1,52	3,03	11,21	28,78	32,12	17,58	4,55	1,21	114,97
Гуманитарии									
Муж. (44 чел.)	-	-	6,82	45,45	22,73	22,73	2,27	-	115,41
Жен. (156 чел.)	1,28	0,64	0,64	34,62	38,46	14,10	9,62	0,64	116,44
Юристы									
Муж. (28 чел.)	7,14	7,14	32,14	21,43	14,29	17,86	-	-	110,96
Жен. (38 чел.)	13,16	13,16	13,16	39,47	13,16	5,26	2,63	-	109,08

Таблица 4 – Распределение оценок НПУ ($O_{НПУ}$) по признаку пола у участников эксперимента, описанного в работе [27]

$O_{НПУ}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
женщины	0	0	1	3	3	5	4	3	1	1
мужчины	0	0	0	3	3	8	8	3	1	1

теста (о проблемах тестов типа личностный опросник авторы неоднократно писали в целом ряде работ, например в [1, 2, 20]), но результат настораживает. Хотя, если брать ситуацию в целом, то по опроснику «Прогноз-1» получен средний балл по группе $N_1 = 12,97$ (у мужчин $N_1 = 11,89$, а у женщин $N_1 = 14,48$), соответствующий хорошей НПУ ($O_{НПУ} = 6$). По опроснику «Прогноз-2» получен средний балл по группе $N_2 = 15,08$ (у мужчин $N_2 = 14,37$, а у женщин $N_2 = 16,08$), соответствующий высокой НПУ ($O_{НПУ} = 7$).

Таблица 5 – Распределение оценок НПУ ($O_{НПУ}$) по признаку пола у участников настоящего исследования

$O_{НПУ}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прогноз-1										
женщины	1	0	2	2	10	3	3	1	2	1
мужчины	1	0	1	1	6	8	10	4	2	2
Прогноз-2										
женщины	1	0	1	0	3	5	4	5	0	6
мужчины	1	1	0	0	0	5	7	11	4	6

С точки зрения наличия достоверных различий по критерию Пирсона, то в настоящем исследовании их также не выявлено. По опроснику «Прогноз-1» получен эмпирический критерий Пирсона $\chi^2_{\text{эмп}} = 5,6327 < \chi^2_{0,05} = 5,991$ для $v = 2$. По опроснику «Прогноз-2» получен эмпирический критерий Пирсона $\chi^2_{\text{эмп}} = 1,7763 < \chi^2_{0,05} = 7,815$ для

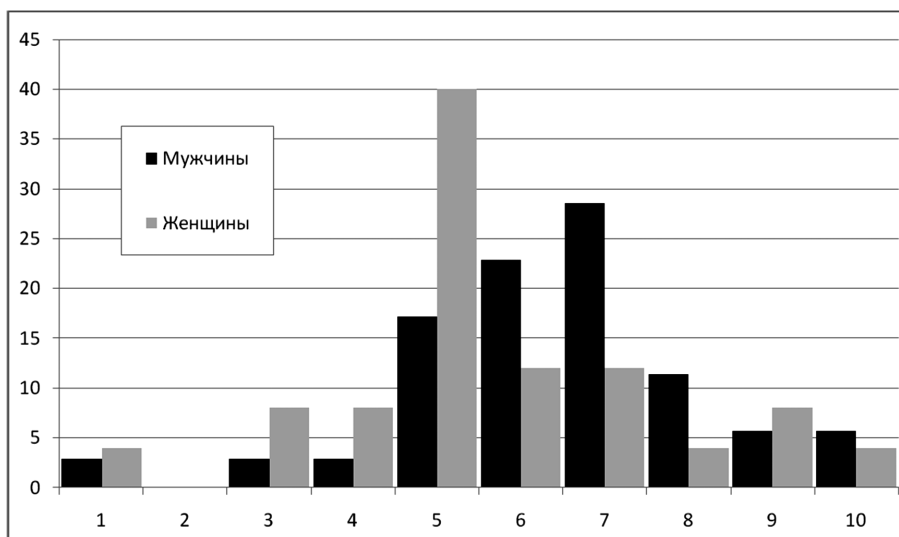


Рисунок 2. Распределение (%) участников исследования по уровню нервно-психической устойчивости ($O_{НПУ}$ – по результатам опросника «Прогноз-1»)

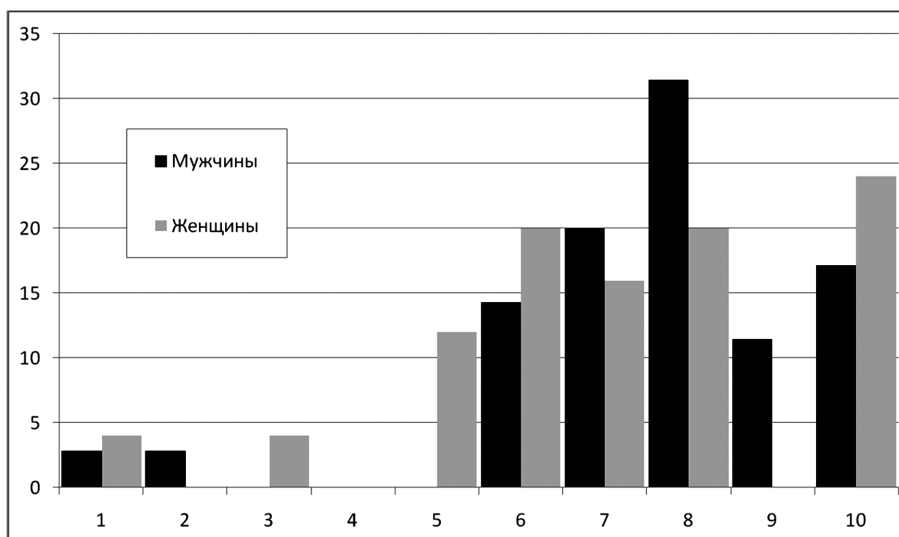


Рисунок 3. Распределение (%) участников исследования по уровню нервно-психической устойчивости ($O_{НПУ}$ – по результатам опросника «Прогноз-2»)

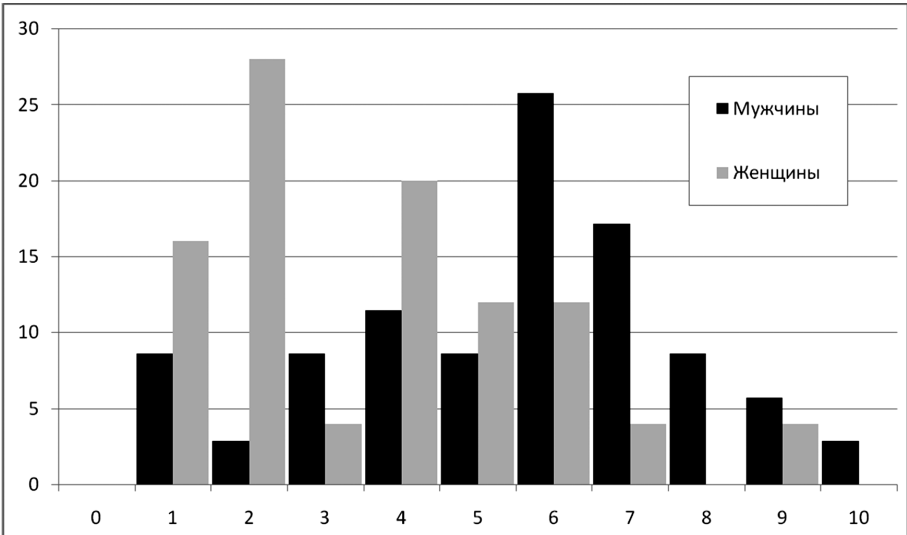


Рисунок 4. Распределение (%) результатов участников исследования по шкале «Физическая агрессия» (А_ф) теста Arnold H. Buss & Ann Durkee

$v = 3$. В целом у женщин нервно-психическая устойчивость несколько ниже, чем у мужчин, но разница явно непринципиальна.

Выводы. Анализ итогов проведенного исследования показал, что по результатам использованных нами психодиагностических методик принципиальных различий по половому признаку не выявлено. Исключение – это склонность к физической агрессии, определенная по тесту Arnold H. Buss & Ann Durkee [16], где нами выявлены достоверные различия по критерию Пирсона ($\chi^2_{0,01} = 11,345 > \chi^2_{\text{эмп}} = 11,1289 > \chi^2_{0,05} = 7,815$ для $v = 3$). У женщин данный показатель явно ниже (см. рис. 4), хотя девушки с высокой агрессивностью тоже наличествуют.

Почти все студенты, принявшие участие в настоящем исследовании, обладают достаточно хорошей нервно-психической устойчивостью, однако наличие трех человек с неблагоприятным прогнозом требует обратить при ППО внимание на этот момент.

Основная масса участников исследования обладала достаточно высоким уровнем развития интеллекта. В целом он оказался несколько выше, чем обычно характерно для контингента студентов СПбГУ ГА. (Здесь не имеются в виду результаты, приведенные в табл. 3, поскольку результаты, полученные по тестам Rudolf Amthauer и Hans Jürgen Eysenck несколько отличаются. Достаточно

большой массив данных по тесту Hans Jürgen Eysenck, полученный в рамках исследовательской работы, подробно описанной в [21], представлен в табл. 6).

В данной группе достоверных различий по IQ нет, и есть основания считать, что чем больше обследованная группа, тем меньше достоверных различий между мужчинами и женщинами по уровню развития интеллекта, хотя тенденция того, что у женщин – авиационных специалистов IQ в целом выше просматривается давно. Возможно, женщины вступают в конкурентную борьбу в авиационной отрасли, только если ощущают определенные конкурентные преимущества. Но это пока находится исключительно на уровне предположений.

Закключение. Объем статьи не позволяет обсудить все аспекты проблемы, вскрытые в ходе исследования. И хотя, опираясь на здравый смысл, мы полагаем, что ППО для мужчин и женщин, желающих освоить профессию пилота и диспетчера УВД, все же по некоторым критериям должен иметь отличия, несмотря на то, что анализ полученных нами результатов психодиагностического обследования студентов, уже отобранных на указанные специальности, свидетельствует, что процедура существующего ППО, «заточенного» под мужчин, в большинстве своем (за исключением некоторых результатов, например склонности к физической

Таблица 6 – Распределение результатов тестирования участников обследования [21] на определение IQ по тесту Hans Jürgen Eysenck

Выборка \ IQ		70 и менее баллов	71-90 баллов	91-110 баллов	111-130 баллов	более 130 баллов
Выборка в целом	603 чел.	0	38	232	246	87
Мужчины	344 чел.	0	26	152	127	39
Женщины	259 чел.	0	12	79	117	51
Пилоты	232 чел.	0	17	110	92	13
Диспетчеры УВД	141 чел.	0	11	52	50	28
Специалисты ОрАНО	36 чел.	0	2	13	16	5
Гуманитарии	194 чел.	0	8	57	88	41

агрессии, как это было показано в настоящей статье, или темперамента, как это было показано в [27]), вполне успешно отбирает по «мужским» критериям и женщин, поскольку по выраженности исследованных личностных характеристик, вне зависимости от половой принадлежности кандидатов, различия не были выявлены. Полученные нами результаты (а также анализ мировых научных исследований по данной проблематике [30-34]) наводят на мысль, что для повышения надежности ППО необходимо провести исследования различий в выраженности требуемых психологических и личностных ПВК у авиационных специалистов не по критерию половой принадлежности, а, скорее, в соответствии с идентифицируемым гендерным типом личности.

Необходимо продолжить данную работу и, по возможности, переориентировать ее на поиск методов, не использующих тесты типа «личностный опросник», например, как это было сделано в [27].

Библиографический список

1. **Ариничева, О.В.** Актуальные вопросы снижения негативного влияния человека на надежность авиационной системы [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский, М.С. Шкунтик // Проблемы безопасности полетов. – 2018. – № 12. – С. 24-35. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37283956>
2. **Ариничева, О.В.** Недостатки существующего профессионального отбора пилотов и проблема его совершенствования [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 6. – С. 41-51. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26254884>
3. Руководство по психологическому обеспечению отбора, подготовки и профессиональной деятельности летного и диспетчерского состава гражданской авиации Российской Федерации [Текст]: утв. Министерством транспорта РФ. – М.: Воздушный транспорт, 2001. – 279 с.
4. **Панюшкин, К.** Самолет с неработающими двигателями летчики А321 посадили в кукурузное поле [Электронный ресурс] / К. Панюшкин / Первый канал. 15.08.2019. – URL: https://www.1tv.ru/news/2019-08-15/370505-samolet_s_nerabotayuschimi_dvigatelyami_letchiki_a321_posadili_v_kukuruznoe_pole (дата обращения 25.10.2019).
5. Предварительный отчет по результатам расследования авиационного происшествия / RRJ-95B RA-89098 05.05.2019 [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 14.06.2019. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report_ra-89098_pr.pdf (дата обращения 25.10.2019).
6. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия с самолетом Boeing 737-500 (53A) ОАО «Авиакомпания «Татарстан» 17.11.2013 на территории международного аэродрома Казань [Текст]: утв. Председателем комиссии по расследованию авиационного происшествия Б.А. Горюновым 15.12.15. – М.: МАК, 2015. – 288 с.
7. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия / Ан-148-100B RA-61704 11.02.2018 [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 11.06.2019. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/560/report_ra-61704.pdf (дата обращения 25.10.2019).
8. Авиакатастрофа в Ростове-на-Дону: 62 жертвы трагического крушения [Электронный ресурс] / AVIA.PRO. 19.03.2016. – URL: <http://avia.pro/blog/aviakatastrofa-v-rostove-na-donu-flydubai?page=1> (дата обращения 25.10.2019).
9. **Якимович, Н.В.** Ошибки пилотов – это следствие их стрессового состояния. Кто создает предпосылки для стресса у пилотов? [Электронный ресурс] / Н.В. Якимович / AviaSafety – Международное консультативно-аналитическое агентство «Безопасность полетов». 13.05.2019. – URL: <http://aviasafety.ru/23824/> (дата обращения 25.10.2019).
10. Southwest Airlines Flight 1380 [Электронный ресурс] / Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Southwest_Airlines_Flight_1380 (дата обращения 25.10.2019).
11. Руководство по профессиональному психофизиологическому отбору в гражданской авиации [Текст] / Под ред. И.В. Ряполова. – М.: Воздушный транспорт, 1986. – 102 с.
12. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия с самолетом Ту-154М RA85185 авиакомпании «Пулково» 22.08.2006 в районе п. Сухая балка Константиновского района Донецкой области, Украина [Текст]: утв. Зам. Председателя Межгосударственного авиационного комитета – Председателем Комиссии по расследованию авиационных происшествий А.Н. Морозовым 12.02.2007. – М.: МАК, 2007. – 143 с.
13. Практикум по психологии состояний [Текст]: учеб. пособ. / Под ред. проф. А.О. Прохорова. – СПб.: Речь, 2004. – 480 с.
14. **Берг, Т.Н.** Нервно-психическая неустойчивость и способы ее выявления [Текст]: учеб. пособие. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2005. – 63 с.
15. **Айзенк, Г.Ю.** Новые IQ тесты [Текст] / Ганс Юрген Айзенк. – М.: ЭКСМО-Пресс, 2003. – 192 с.
16. **Карелин, А.А.** Большая энциклопедия психологических тестов [Текст] / А.А. Карелин. – М.: Эксмо, 2007. – 416 с.
17. **Андреев, В.И.** Деловая риторика [Текст]: Практический курс делового общения и ораторского мастерства / В.И. Андреев. – М.: Народное образование, 1995. – 208 с.
18. **Фетискин, Н.П.** Социально-психологическая диагностика развития личности и малых групп [Текст] / Н. П. Фетискин, В. В. Козлов, Г. М. Мануйлов. – М.: Изд-во Института Психотерапии, 2002. – 490 с.
19. **Ариничева, О.В.** Повышение надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский // Надежность. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 40-47. – DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-1-40-47>

20. **Ариничева, О.В.** Ответственность в системе ценностей авиационных специалистов [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский, И.А. Акимов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2018. – № 6. – С. 20-25. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35093752>

21. **Ариничева, О.В.** Предикторы конфликтного поведения авиационных специалистов [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2018. – № 4 (21). – С. 20-34. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36580852>

22. **Ариничева, О.В.** Анализ диагностики интеллектуальных способностей будущих авиационных специалистов [Текст] / О.В. Ариничева // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. – № 2. – С. 15-22. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28422668>

23. Research & Statistical Support Services [Электронный ресурс] / University Information Technology. – URL: <http://it.unt.edu/research> (дата обращения 25.10.2019).

24. Free Software Foundation [Электронный ресурс] / FSF. – URL: <https://fsf.org/> (дата обращения 25.10.2019).

25. **Bock, D.E.** Stats: modeling the world [Text] / David E. Bock, Paul F. Velleman, Richard D. De Veaux. – 4th Edition. – Boston, USA, Pearson Addison Wesley, 2015. – 932 p.

26. **Ушаков, Е.В.** Биоэтика [Текст]: учебник и практикум для вузов / Е.В. Ушаков. – М.: Юрайт, 2018. – 306 с.

27. **Ариничева, О.В.** Возможные пути повышения надежности профессионального психологического отбора диспетчеров управления воздушным движением [Текст] / О.В. Ариничева, А.Е. Герасименкова, А.В. Малишевский, М.Г. Чепик // Надежность. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 38-45. – DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-1-38-45>

28. **Ариничева, О.В.** Коэффициент интеллекта: критерий отбора или апокрифичный показатель оценки интеллектуальных способностей [Текст] / О.В. Ариничева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2015. – № 1 (8). – С. 49-63. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24346536>

29. **Истратова, О.Н.** Психодиагностика [Текст]: лекция лучших тестов / О.Н. Истратова, Т.В. Эксакусто. – 3-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 375 с.

30. **Dillon, K.M.** Sex roles, gender, and fear [Text] / Kathleen M. Dillon, Edward Wolf, Helen Katz // The Journal of Psychology. – 1985. – Vol. 119. – Issue 4. – P. 355-359. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00223980.1985.9915454>

31. **Fowler, S.L.** Concept priming and pain: an experimental approach to understanding gender roles in sex-related pain differences [Text] / Stephanie L. Fowler, Heather M. Rasinski, Andrew L. Geers, Suzanne G. Helfer, Christopher R. France // Journal of Behavioral Medicine. – 2011. – Vol. 34. – Issue 2. – P. 139-147. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10865-010-9291-7>

32. **Muris, P.** The relation between gender role orientation and fear and anxiety in nonclinic-referred children [Text] /

Peter Muris, Cor Meesters, Miranda Knoop // Journal of Clinical Child and Adolescent Psychology. – 2005. – Vol. 34. – Issue 2. – P. 326-332. – DOI: https://doi.org/10.1207/s15374424jccp3402_12

33. **Колос, Ю.В.** Взаимосвязь самоактуализации и эмоционально-личностных характеристик у студентов [Текст] / Ю.В. Колос, М.В. Данилова // Научные исследования выпускников факультета психологии СПбГУ. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 115-122. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20255612>

34. **Азарных, Т.Д.** Посттравматические стрессы, женский пол и гендер [Текст] / Т.Д. Азарных // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. Серия: Педагогика. Психология. Социальная работа. Ювенология. Социокинетика. – 2014. – Т. 20. – № 3. – С. 160-164. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22287308>

Сведения об авторах

Ольга В. Ариничева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Летная эксплуатация и безопасность полетов в гражданской авиации», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», e-mail: 2067535@mail.ru, адрес: ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210.

Татьяна В. Зюба – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», e-mail: zuba57@mail.ru, адрес: ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210.

Алексей В. Малишевский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Летная эксплуатация и безопасность полетов в гражданской авиации», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», e-mail: 9909395@bk.ru, адрес: ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210.

Вклад авторов в статью

Ариничева О.В. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, сбор психодиагностических данных по летному и диспетчерскому составу для статистической обработки. Теоретическая составляющая работы.

Зюба Т.В. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, сбор психодиагностических данных для статистической обработки по авиационным специалистам, не связанным с операторской деятельностью.

Малишевский А.В. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, сбор психодиагностических данных по летному и диспетчерскому составу для статистической обработки. Обработка полученных результатов.

Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределенностей

Николай А.Махутов¹, Дмитрий О.Резников^{1*}

¹ Институт машиноведения РАН, Российская Федерация, Москва

* mibsts@mail.ru



Николай А.Махутов



Дмитрий О.
Резников

Резюме. Цель. Целью статьи является проведение сопоставительной оценки двух базовых подходов к обеспечению конструкционной прочности и безопасности потенциально опасных объектов: детерминистического, основанного на обеспечении нормативных значений запасов прочности по основным механизмам достижения предельных состояний, и вероятностного, при котором критерием выполнения условий прочности является не превышение расчетными значениями вероятности разрушения по различным модам разрушения нормативных предельно допустимых значений. **Методы.** Ключевой проблемой при обеспечения конструкционной прочности является высокий уровень неопределенностей, которые принято разделять на два типа: (1) неопределенности, обусловленные естественной вариативностью параметров, определяющих несущую способность системы и действующие на нее нагрузки, и (2) неопределенности, связанные с человеком (ограниченность человеческих знаний о системе и возможность совершения человеком ошибок на различных этапах цикла эксплуатации системы). Методы компенсации неопределенностей зависят от используемого подхода к обеспечению прочности: при детерминистическом подходе случайные переменные «нагрузка» и «несущая способность» заменяются на детерминированные величины – их математические ожидания, а выполнение условия прочности с учетом неопределенностей обеспечивается путем введения условия, что отношение математических ожиданий несущей способности и прочности должно превышать нормативную величину запаса прочности, который, в свою очередь, должен быть больше единицы. В рамках вероятностного подхода конструкционная прочность считается обеспеченной, если расчетная вероятность разрушения по рассматриваемому механизму достижения предельного состояния не превосходит нормативно установленного значения вероятности разрушения. **Выводы.** Говорить об эквивалентности двух (детерминистического и вероятностного) подходов можно лишь в определенных частных случаях. Недостатком обоих подходов является их ограниченные возможности по компенсации неопределенностей второго типа, определяемых действием человеческого фактора, а также отсутствие корректной процедуры учета тяжести последствий, наступающих в случае достижения предельного состояния. Указанные недостатки могут быть преодолены путем привлечения к решению задачи по обеспечению конструкционной прочности и безопасности методического инструментария теории рисков, который позволяет включить в рассмотрение неопределенности второго типа и в явном виде учитывать критичность последствий, наступающих при разрушениях на объекте.

Ключевые слова: конструкционная прочность, безопасность, неопределенность, запас прочности, вероятность разрушения, риск.

Для цитирования: Махутов Н.А., Резников Д.О. Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределенностей // Надежность. 2020. №1. С. 47-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-47-56>

Поступила 02.11.2019 г. / После доработки 12.02.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

1. Введение

Конструкционная прочность представляет собой исходную комплексную характеристику технической системы, которая описывается сочетанием дифференцированных показателей статической, динамической, циклической прочности и прочностной надежности и определяется способностью системы противостоять достижению различных предельных состояний в реальных условиях эксплуатации. Выполнение требований конструкционной прочности потенциально опасных объектов (ПОО) является ключевым элементом решения задачи обеспечения техногенной безопасности [1, 2]. Конструкционная прочность считается обеспеченной, если для всех расстраиваемых механизмов достижения предельных состояний выполняется условие:

$$Q_i^C / Q_i^3 > 1 \quad (\forall i = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

где Q_i^C и Q_i^3 – параметры несущей способности и нагрузки при i -ом механизме достижения предельных состояний, имеющих негативные последствия, которые характеризуются экономическими ущербами и человеческими жертвами; m – количество механизмов достижения предельных состояний. Такая трактовка конструкционной прочности, как показывает анализ отечественной и зарубежной информации о сценариях возникновения техногенных аварий и катастроф, дает основу для исследования, регулирования и обеспечения техногенной безопасности.

В число базовых вопросов обеспечения конструкционной прочности и безопасности ПОО для всех стадий их жизненного цикла входят три главных:

- расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний с учетом механических Q_m^3 , термических Q_t^3 , аэрогидродинамических Q_{ah}^3 , электромагнитных Q_{em}^3 , радиационных и химических Q_r^3 воздействий. При этом локальные напряжения $\sigma_{\max}^3$ и деформации $e_{\max}^3$ зависят от эксплуатационного числа циклов нагружения N^3 , времени τ^3 и температуры t^3 :

$$\{\sigma_{\max}^3, e_{\max}^3\} = F_3 \{P^3, Q_t^3, Q_{ah}^3, Q_{em}^3, Q_r^3, N^3, \tau^3, t^3\}; \quad (2)$$

- анализ закономерностей циклического упругого и упругопластического деформирования в зонах и вне зон концентрации для варьируемых частот f_τ^3 , амплитуд напряжений σ_a^3 и деформаций e_a^3 , температур t^3 и времени τ^3 :

$$\{\sigma_a^3, e_a^3\} = F_{13} \{f_\tau^3, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\}; \quad (3)$$

- анализ критериев и условий накопления повреждений d^3 , а также определение циклической долговечности N_C^3 для стадий образования и развития трещин, возникновения разрушений:

$$\{d^3, N_C^3\} = F_{23} \{f_\tau^3, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\}. \quad (4)$$

Задачи обеспечения конструкционной прочности

потенциально опасных объектов приходится решать в условиях высокого уровня неопределенности относительно параметров эксплуатационного нагружения, с одной стороны, а также несущей способности элементов ПОО на различных этапах цикла его эксплуатации, с другой [3-5]. Источниками неопределенностей являются: естественная вариативность параметров объекта (геометрических размеров, механических свойств материала); стохастический характер деградационных процессов и режимов нагружения; ограниченность знаний о событиях и процессах, протекающих в несущих элементах; ограниченность имеющихся статистических данных; несовершенство используемых математических моделей; неточность имеющегося измерительного оборудования.

Конструкционная прочность ПОО на различных этапах его жизненного цикла может обеспечиваться в рамках двух принципиально различных подходов [3, 4, 7, 8]:

- 1) Детерминистический (нормативный) подход к обеспечению конструкционной прочности, основанный на обеспечении запасов по основным механизмам достижения предельных состояний.

- 2) Вероятностный подход к обеспечению конструкционной прочности, основанный на снижении вероятности достижения предельного состояния до уровня, который на данном этапе развития техники принимается в качестве приемлемого.

Исторически, в течение многих столетий, развивался первый подход, при котором неопределенности, с которыми приходилось сталкиваться при проектировании, строительстве и эксплуатации технических систем, учитывались с помощью введения системы коэффициентов запаса, по различным механизмам достижения предельных состояний. Второй подход получил распространение в середине XX столетия с развитием таких дисциплин как теория вероятности и теория надежности, позволяющих оценивать неопределенности с помощью вероятности достижения системой предельных состояний. Этот подход стал важным элементом развития теории техногенных рисков и техногенной безопасности. Ниже будет проведена сопоставительная оценка детерминистического и вероятностного подходов и рассмотрены условия, при которых эти подходы могут считаться эквивалентными.

2. Неопределенности задачи

Неопределенности, связанные с обеспечением конструкционной прочности технических систем ПОО, могут быть разделены на два принципиально различных типа [9-14]:

- 1) Неопределенности естественного, материально-технического характера, обусловленные недетерминированностью параметров, событий и процессов реального мира. К этому типу относятся неопределенности, связанные с вариативностью параметров системы и

воздействий на нее, со стохастической природой процессов деградации ее характеристик, а также неопределенности, обусловленные возможными отклонениями от номинальных значений интенсивности воздействия внешних и внутренних силовых факторов, режимов эксплуатации, геометрических размеров элементов системы, механических и физических свойств материалов, условий внешней среды и т.д.

2) Неопределенности, связанные с человеческим фактором (в широком толковании этого понятия), которые подразделяются на: (а) неопределенности, связанные с ограниченностью знаний проектировщика, изготовителя и эксплуатанта о сложных технических системах ПОО и условиях его функционирования (в частности, о характере сложных процессов достижения предельных состояний системы), (б) неопределенности, обусловленные возможностью совершения персоналом действий, ведущих к нарушению существующих норм проектирования, строительства и эксплуатации ПОО, в результате которых свойства (поведение, характеристики) системы станут отличными от проектных и запланированных (т.е. ошибками на этапе проектирования, строительства и эксплуатации системы), и (в) неопределенности, обусловливаемые возможностью осуществления несанкционированных (диверсионных и террористических) воздействий на рассматриваемый ПОО.

Учитывая, что ограниченность знаний о технических системах ПОО и обусловленный ею неучет важных факторов, равно как и нарушение установленных норм, можно рассматривать как своего рода ошибки, то группу неопределенностей, обусловленных человеческим фактором, можно для краткости называть неопределенностями, связанными с ошибками, совершаемыми проектировщиками, строителями и эксплуатантами ПОО, где термин *ошибка* используется в широком смысле этого слова.

Специфика обеспечения защищенности ПОО от аварий и катастроф заключается в том, что их описание требует учета огромного числа факторов. При этом ряд режимов эксплуатации ПОО становятся недоопределенными [15]. Это происходит вследствие сложных нелинейных взаимодействий между компонентами ПОО, сильной связанности между различными подсистемами, а также тем фактом что ПОО и окружающая среда начинают изменяться быстрее, чем они могут быть описаны и исследованы. Поэтому возникает ситуация недостатка информации о развитии опасных процессов в ПОО и, следовательно, ограниченности возможностей прогнозирования их поведения и управления ими. При этом на определенных режимах становится невозможным детально описать законы функционирования ПОО и разработать правила управления. Отличительной особенностью недоопределенных систем является то, что оказывается невозможным полное описание их поведения и прогнозирования их состояния при различных условиях и на различных режимах эксплуатации. Различие между полностью определенными и

недоопределенными системами становится чрезвычайно важным при разработке комплекса мер по обеспечению безопасности.

Неопределенности первого типа рассматриваются в рамках теории прочностной надежности. Однако опыт эксплуатации технических систем показывает, что расчетные оценки вероятностей разрушения системы, получаемые методами теории надежности, оказываются существенно заниженными и отличаются от наблюдаемых на практике значений как минимум на один порядок. Основной причиной этого несоответствия является то обстоятельство, что теория прочностной надежности не учитывает неопределенности человеческого фактора, которые во многих случаях являются доминирующими. Этот второй тип неопределенностей оценивается в рамках новых подходов, сосредоточивающих свое внимание на исследовании человеческого фактора.

3. Детерминистический подход к обеспечению конструкционной прочности

В рамках детерминистического подхода случайные параметры нагрузки Q_i^C и несущей способности Q_i^3 заменяются на их математические ожидания $E\{Q_i^C\}$ и $E\{Q_i^3\}$, а выполнение условия прочности с учетом неопределенностей обеспечивается путем введения в правую часть неравенства (1) величины нормативного допускаемого запаса $[n_i]$, который должен быть больше единицы:

$$n_i = \frac{E\{Q_i^C\}}{E\{Q_i^3\}} > [n_i] \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Вопрос о выборе $[n_i]$ является весьма сложным. Нормативный запас по рассматриваемому предельному состоянию назначается: исходя из опыта эксплуатации подобных систем; уровня неопределенности; социально-экономических условий страны; точности расчетных моделей и величины ущерба, ожидаемого в случае достижения предельных состояний. Таким образом, величины запасов определяются как объективными

Таблица 1. Количественные значения нормативных запасов прочности.

	Отрасль, тип технической системы	Диапазон значений $[n]$
1	Объекты космической техники	1,00...1,25
2	Авиационная техника (планер самолета)	1,25...2,0
3	Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок	1,07...3,0
4	Сосуды и аппараты, работающие под давлением	1,5...4,0
5	Металлургическое оборудование	2,07...8,0
6	Железнодорожный транспорт	3,33...5,56
7	Подъемно-транспортные машины	1,3...1,6

факторами (уровень неопределенности относительно нагрузок и несущей способности конструкции; критичность последствий, связанных с достижением предельного состояния), так и субъективными обстоятельствами (культура безопасности в отдельных отраслях и стране в целом, восприятие угроз в обществе). Современные значения нормативных запасов для конструктивных элементов технических систем различного назначения изменяются в следующих диапазонах (таблица 1).

Из представленных в табл. 1 данных следует, что значения нормативных запасов варьируются в весьма широких диапазонах (как внутри отдельных отраслей, так и между отраслями). Это свидетельствует не только об отсутствии единой методологической базы их обоснования, но и о разнице в уровнях рисков ПОО различных отраслей. Использование подобного подхода при проектировании новых (уникальных) объектов сопряжено с большими сложностями и высоким уровнем неопределенности, связанным с отсутствием опыта назначения допустимых запасов по предельным состояниям, которые могут реализовываться в системе.

Следует иметь в виду, что для ПОО, состоящих из сложных систем, характерно наличие различных предельных состояний, соответствующих различным механизмам разрушения (однократные перегрузки, кумулятивные механизмы усталостного, длительного, коррозионного, термоциклового разрушения и т.д.). В этом случае принято вводить систему запасов $n_1, n_2, \dots, n_q$ по основным механизмам достижения предельных состояний. Причем запасы по различным предельным состояниям традиционно оказываются не связанными между собой. При этом система может обладать избыточной прочностью по одним предельным состояниям и недостаточной по другим.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований на образцах, моделях и натурных конструкциях дают возможность определить запасы по напряжениям n_σ , деформациям n_ϵ , числу циклов n_N , времени n_τ и размеру дефектов (трещин) n_l :

$$\{n_\sigma, n_\epsilon, n_N, n_\tau, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_C}{\sigma_{\max}^\epsilon}, \frac{\epsilon_C}{\epsilon_{\max}^\epsilon}, \frac{N_C}{N^\epsilon}, \frac{\tau_C}{\tau^\epsilon}, \frac{l_C}{l^\epsilon} \right\}, \quad (6)$$

где индекс «C» относится к критической (предельной) величине соответствующей характеристики прочности, долговечности и трещиностойкости, а индекс «Э» – к соответствующим величинам при эксплуатации.

На основе выражений (2)–(4) строятся обобщенные поверхности предельных (опасных) состояний V^C (рис. 1). Поверхность допускаемых состояний $[V]$ определяется после построения поверхности предельных состояний введением коэффициентов запаса $[n_i]$ для каждого из указанных предельных параметров, по соответствующей координате пространства состояний:

$$[V_i] = V_i^C / [n_i].$$

Условием обеспечения конструкционной прочности и безопасности является то, что варьируемый во времени вектор эксплуатационных состояний V^ϵ остается для

всех стадий жизненного цикла в области допускаемых состояний, располагающейся ниже поверхности допускаемых состояний $[V]$.

Детерминистические подходы обычно используются на начальном этапе конструирования для определения размеров наиболее нагруженных сечений проектируемых конструктивных элементов, когда еще отсутствует достаточный статистический материал для анализа, при существенных изменениях конструкций и условий их эксплуатации. Задача обеспечения прочности конструктивных элементов технических систем традиционно решалась на основе использования детерминистических подходов, при которых неопределенности компенсировались путем введения дифференцированных запасов по основным механизмам достижения предельных состояний, базирующихся на опыте конструирования и эксплуатации ПОО. Однако в условиях бурного развития техники и внедрения новых конструкционных материалов возможности нормативного детерминистического подхода оказываются близкими к исчерпанию.

4. Вероятностные подходы к обеспечению конструкционной прочности

Вероятностные подходы к обеспечению конструкционной прочности базируются на снижении вероятности достижения предельных состояний до предписанного уровня. В рамках вероятностного подхода конструкционная прочность считается обеспеченной, если расчетная вероятность разрушения по i -му механизму достижения предельного состояния $P_{Fi} = P\{Q_i^C / Q_i^\epsilon < 1\}$ не превосходит нормативно установленного значения вероятности разрушения $[P_F]$:

$$P\{Q_i^C / Q_i^\epsilon < 1\} \leq [P_F], \quad \forall i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

Вероятностные подходы оказываются эффективными в тех случаях, когда уже накоплена (или может быть получена) значительная исходная статистическая информация по уровням эксплуатационных нагрузок и вариативности основных механических свойств несущих конструктивных элементов ПОО. Указанные подходы при их численной реализации дают возможность определять вероятностные исходные характеристики прочности, ресурса, живучести и позволяют подойти к количественному определению наиболее важных параметров ущербов U , определению риска R , безопасности S и защищенности Z .

Для высокорисковых ПОО вариации $\tau^\epsilon, N^\epsilon$ достигают 5–8 порядков, l^ϵ – 4 порядков, P – 3 порядка, P – 10 порядков, U – 6 порядков, R – 3–4 порядка, [1, 2]. Величины запасов $[n_i]$ изменяются в пределах одного порядка ($1 \leq [n_i] \leq 10$).

Вероятностные подходы к обеспечению конструкционной прочности получили свое развитие начиная со второй половины XX века, сначала в рамках клас-

сической теории прочности, а затем в рамках теории прочностной надежности. Предельная допустимая величина вероятности разрушения $[P_F]$ устанавливается в зависимости от величины ущерба, который может наступить в случае разрушения, с учетом социальной значимости объекта и срока его эксплуатации. В частности, Международной научно-информационной ассоциацией строительной индустрии (CIRIA-Construction Industry Research and Information Association) для сложных инженерных сооружений (плотин, мостов, шельфовых платформ) предложена следующая интерполяционная формула для оценки предельно допустимой расчетной вероятности разрушения [3]:

$$[P_F] = \frac{10^{-4} \xi_s \cdot \tau}{L \cdot k_{HF}}, \quad (8)$$

где τ – расчетный срок эксплуатации системы; L – среднее количество людей, которые могут погибнуть в случае разрушения системы; k_{HF} – коэффициент, учитывающий разрушения, связанные с человеческим фактором (обычно принимают $k_{HF} = 10$); ξ_s – коэффициент социальной значимости системы (см. табл. 2). Таким образом, величина $[P_F]$ обычно оказывается в диапазоне $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-7}$.

Таблица 2. Коэффициент социальной значимости для различных типов технических систем.

Тип системы	ξ_s
Объекты массового скопления людей (спортивные комплексы, торговые центры)	0,005
Плотины	0,005
Жилые здания, офисные центры, промышленные объекты	0,05
Мосты	0,5
Буровые вышки, шельфовые установки	5

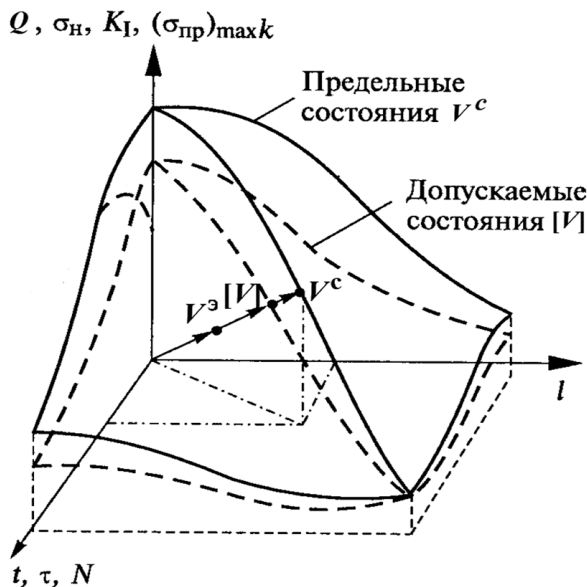


Рисунок 1. Схема построения поверхностей предельных и допускаемых состояний при оценках прочности, ресурса и живучести в трехмерном пространстве состояний объектов

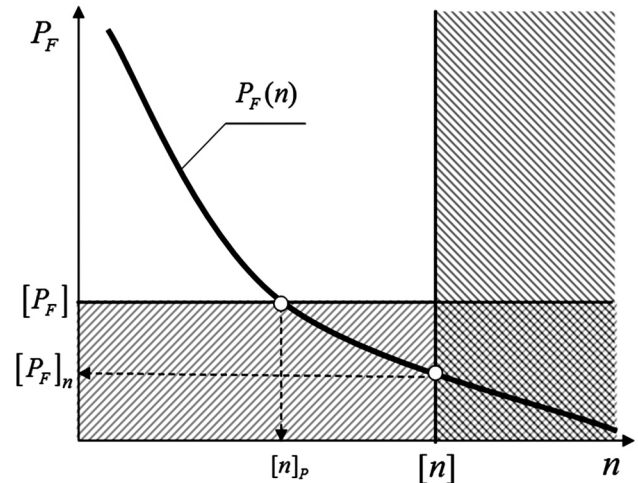


Рисунок 2. Зависимость между запасом прочности и вероятностью разрушения

Следует иметь в виду, что формула (8) учитывает неопределенности, связанные не только со случайным характером нагрузок и несущей способности конструкций, но также и неопределенности, обусловленные человеческим фактором. Это достигается путем введения коэффициента k_{HF} , который, как правило, принимается равным 10. Часто в нормативных документах фигурирует так называемая теоретическая предельно допустимая вероятность разрушения $[P_{FT}]$, которая оценивается без учета возможных ошибок или несанкционированных воздействий со стороны человека и оказывается существенно ниже, чем $[P_F]$. Принято считать, что эти величины различаются на один порядок.

В настоящее время вероятностный подход к обеспечению конструкционной прочности все больше внедряется в практику ряда отраслей, в частности, при проектировании объектов атомной энергетики, гидротехнических сооружений, шельфовых нефтегазодобывающих платформ, судостроении и др.

Необходимо отметить, что наличие коэффициента социальной значимости системы ξ_s в формуле (8) позволяет в неявной форме и весьма приближенно учесть масштаб возможных последствий разрушения при принятии решений о том, можно ли считать рассматриваемую систему защищенной. Более полный и математически корректный способ учета последствий разрушения реализуется в рамках комплексного подхода к обеспечению прочности и безопасности, который базируется на теории рисков.

5. Сопоставление детерминистического и вероятностного подходов

Следует отметить, что проектирование и обеспечение прочности, ресурса и безопасности несущих конструктивных элементов ПОО на основе детерминистического подхода, базирующегося на назначении запасов, является менее трудозатратным, поскольку для того, чтобы

убедиться, что выражение (5) справедливо, необходимо лишь один раз оценить соотношение $E\{Q_i^c\}/E\{Q_i^3\}$, в то время как расчет по вероятностному критерию (7) требует проведения многократной оценки Q_i^c/Q_i^3 . К сожалению, детерминистическому подходу, несмотря на его простоту, недостает строгости и точности анализа и учета неопределенностей. Существенное влияние при оценке прочности и ресурса играют субъективный фактор и наличие опыта эксплуатации систем данного класса в сходных условиях внешней среды. Возможности применения детерминистического подхода при проектировании уникальных объектов, для которых отсутствует релевантная статистическая информация, оказываются весьма ограниченными. Кроме того, детерминистический подход не позволяет решать вопрос оптимизации проектируемой системы, поскольку не дает возможности сопоставить затраты на ее создание с заданным запасом и положительный эффект, связанный с повышением прочности, который невозможно подсчитать, не ответив на вопрос: *До какого уровня может быть снижена вероятность разрушения, если обеспечить выполнение назначенного запаса?* Следовательно, детерминистический подход не позволяет осуществлять выбор оптимального из ряда возможных вариантов системы.

Проектирование и обеспечение конструкционной прочности по критерию надежности, напротив, представляет собой достаточно строгую математическую процедуру учета неопределенностей, связанных с нагрузками и несущей способностью системы. Данный критерий позволяет принимать обоснованные решения при проектировании системы в условиях неопределенности, производить сопоставительные оценки уровня прочности и ресурса при различных параметрах проектируемого элемента и осуществлять оптимизацию. Однако использование вероятностного подхода сопряжено со значительными трудозатратами и требует высокой квалификации проектировщика.

Поэтому было бы весьма полезно объединить достоинства обоих подходов, получив в тех случаях, когда это возможно, зависимость между запасом прочности и вероятностью разрушения. Это позволило бы, в частности, спроектировав конструктивный элемент с заданным запасом прочности, оценить его безопасность по критериям надежности. Сопоставление областей защищенных состояний Ω_n и Ω_p , полученных соответственно по критерию запаса и критерию надежности, является отдельной актуальной задачей.

Исходя из общих положений теории прочности и надежности, можно предположить, что, по крайней мере, в некоторых случаях между запасом прочности n и вероятностью разрушения P_F существует монотонно убывающая зависимость (рис. 2). Когда это предположение оказывается справедливым, можно говорить об эквивалентности детерминистического и вероятностного подходов. Тогда, если исходить из детерминистического подхода, можно определить предельную вероятность

разрушения $[P_F]_n$, соответствующую нормативному запасу $[n]$. Аналогично, в случае использования вероятностного подхода, можно было бы определить предельное значение запаса $[n]_{P_F}$, соответствующее предельно допустимой вероятности разрушения $[P_F]$.

К сожалению, в общем случае не существует взаимно-однозначного соответствия между величинами $[n]$ и $[P_F]$, и, следовательно, нельзя говорить об эквивалентности этих двух подходов. Однако для ряда частных случаев подобные соотношения могут быть получены.

Рассмотрим вопрос об эквивалентности детерминистического и вероятностного подходов для случаев однократного статического нагружения. В рамках детерминистического подхода условие обеспечения прочности (1) и (5) может быть переписано в виде:

$$n \geq [n], \quad (9)$$

где Q_C и Q_3 – параметры, характеризующие статическую прочность и нагрузку; $n = E\{Q_C\}/E\{Q_3\}$ – фактический запас, который должен быть не ниже нормативного предельно допустимого запаса $[n]$. Таким образом, величина запаса n определяется соотношением между математическими ожиданиями величин нагрузки и несущей способности.

Очевидно, что введение запасов не может полностью исключить возможность разрушения системы. Поэтому при использовании детерминистического подхода встает вопрос о том, какая предельная вероятность разрушения $[P_F]$ соответствует заданному нормативному запасу $[n]$.

В рамках детерминистического подхода, опирающегося на назначение запасов, учитывается только соотношение между характеристическими значениями распределений (в рассматриваемом примере математическими ожиданиями нагрузки и несущей способности $E\{Q_C\}/E\{Q_3\}$). Если величины Q_C и Q_3 являются некоррелированными и распределенными по нормальному закону, вероятность разрушения может быть оценена с помощью известного выражения [3, 6]:

$$P_F = \Phi \left(- \frac{E\{Q_C\} - E\{Q_3\}}{\sqrt{(S\{Q_C\})^2 + (S\{Q_3\})^2}} \right), \quad (10)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt$ – нормальная функция распределения.

При введении коэффициентов вариации $v_{Q_3} = \frac{S\{Q_3\}}{E\{Q_3\}}$ и $v_{Q_C} = \frac{S\{Q_C\}}{E\{Q_C\}}$, искомая зависимость приобретает вид:

$$P = \Phi \left(- \frac{n-1}{\sqrt{v_{Q_3}^2 + v_{Q_C}^2 \cdot n^2}} \right). \quad (11)$$

Таким образом, сделав предположение о нормальном характере распределений нагрузки и несущей способ-

ности, и, задавшись фиксированными значениями коэффициентов вариации v_{Q_c} и v_{Q_3} (которые будут считаться неизменными), можно построить зависимости между вероятностью достижения предельного состояния и запасом прочности. Иными словами, если при варьировании параметров системы для рассматриваемого случая нормально распределенных, некоррелированных величин Q_c и Q_3 , коэффициенты вариации v_{Q_c} и v_{Q_3} являются постоянными, то вероятность разрушения зависит только от запаса прочности n .

Иначе говоря, соотношение (11) позволяет сделать вывод, что подходы, базирующиеся на назначении запасов и на теории надежности, являются эквивалентными в том случае, когда коэффициенты вариации v_{Q_c} и v_{Q_3} не меняются при варьировании параметров проектирования.

На рис. 3. представлены построенные в линейных координатах зависимости вероятности достижения предельного состояния $P_F(n | v_{Q_3}, v_{Q_c})$ от запаса n при различных значениях коэффициентов вариации нагрузки v_{Q_3} и прочности v_{Q_c} .

В постановке теории прочностной надежности защищенность системы считается обеспеченной, если расчетная вероятность локального разрушения критического элемента оказывается меньше нормативного значения предельно допустимой вероятности разрушения: $P_F < [P_F]$.

Согласно выражению (11) вероятность разрушения P_F является функцией трех переменных: центрального запаса n , а также коэффициентов вариации нагрузки v_{Q_3} и несущей способности v_{Q_c} . Соответственно могут быть предложены три способа обеспечения конструкционной прочности: увеличение запаса, снижение вариации прочности, снижение вариации нагрузки. Выбор способа обеспечения защищенности осуществляется с учетом специфики отрасли и условий эксплуатации систем. В тех отраслях, где нет жестких ограничений

по весу конструкций (атомная энергетика, строительство) обеспечение защищенности может достигаться преимущественно за счет повышения запасов $n = 2 \dots 5$. В авиационно-космических системах, где требования ограничения веса являются доминирующими и, следовательно, запасы не могут превышать 1,2...1,6, обеспечение защищенности должно фокусироваться на снижении вариации нагрузок и основных механических свойств материалов.

6. Способы компенсации неопределенностей в задачах обеспечения конструкционной прочности и безопасности

Разрушения ПОО, связанные с техническими факторами, рассматриваются в рамках классической теории прочностной надежности. Традиционный способ компенсации неопределенностей, связанных с вариативностью параметров нагрузки и несущей способности системы, заключается во введении запасов n .

Обеспечение запасов не может полностью исключить возможность разрушения системы. Поэтому при использовании нормативного детерминистического подхода встает вопрос о том, какая вероятность разрушения $P(F)$ соответствует расчетному запасу n (рис. 4). В работах [3, 4, 7, 8] был подробно рассмотрен вопрос о соотношении между запасом и вероятностью разрушения (аварии и катастрофы) в условиях, когда существует точная или приближенная зависимость между этими величинами.

Вероятность разрушения вследствие проявления человеческого фактора также может зависеть от запаса. Однако необходимо иметь в виду, что ошибки операторов могут не просто изменять взаимное расположение кривых распределения нагрузки и несущей способности, но и приводить к изменению самой вероятностной модели системы, создавая новые функции предельных состояний или изменяя размерность пространства состояний. При этом увеличение запасов по исходному

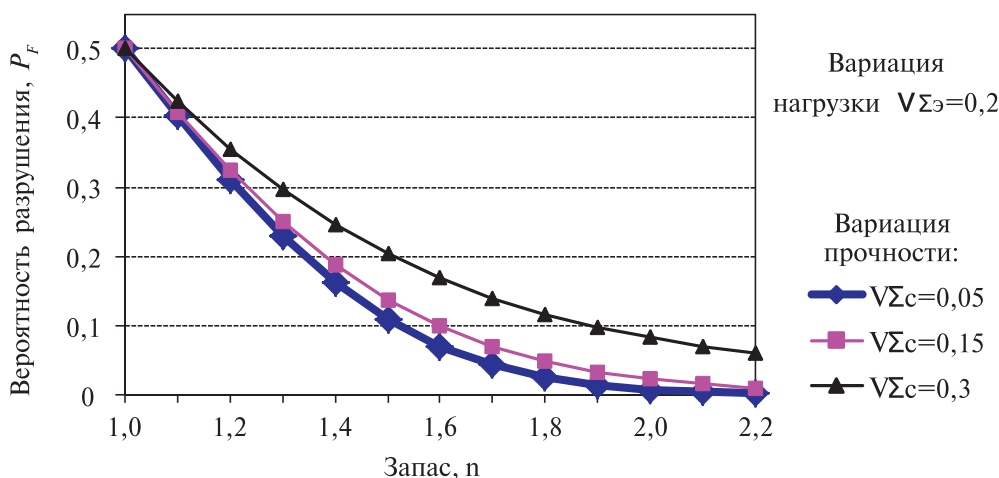


Рисунок 3. Зависимости вероятности локального разрушения от запаса при различных сочетаниях коэффициентов вариации нагрузки и прочности при $v_{Q_3} = 0$

предельному состоянию не может компенсировать неопределенности, вносимые ошибками [9].

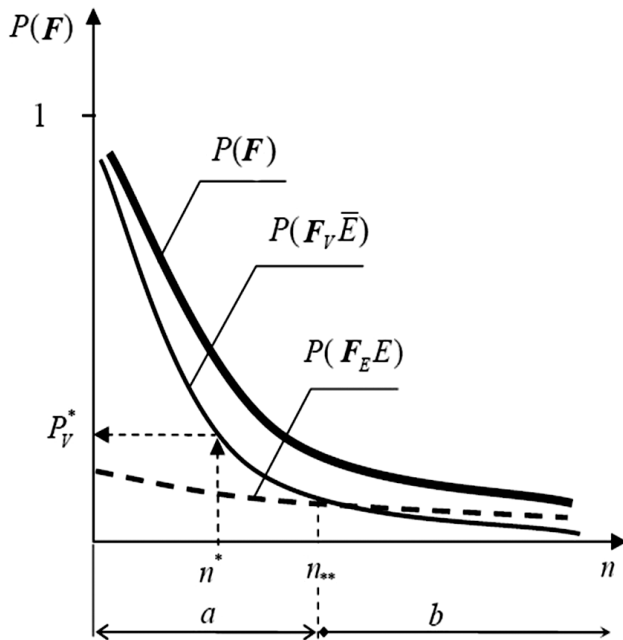


Рисунок 4. Влияние коэффициента запаса на вероятность разрушения ПОО [9]

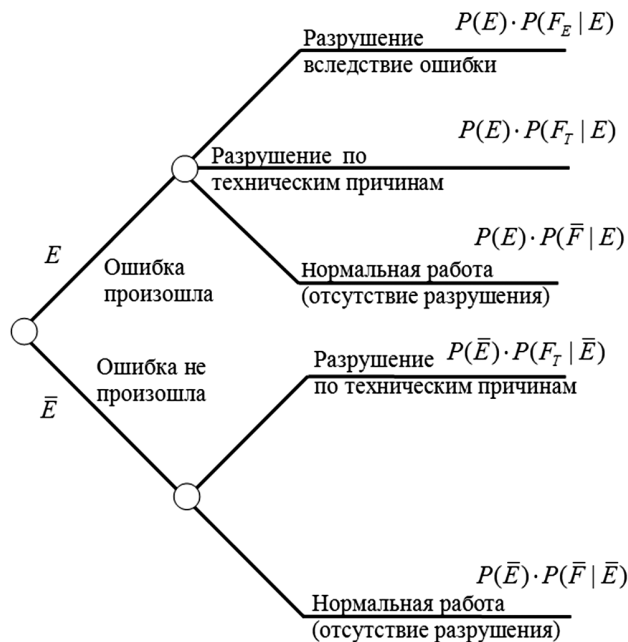


Рисунок 5. Простейшая модель оценки вероятности разрушения ПОО, учитывающая неопределенности, обусловленные вариативностью функции состояния и человеческими ошибками [10]

В соответствии с рассмотренными в разделе 2 настоящей статьи типами неопределенностей могут быть выделены два типа причин разрушений (аварий, катастроф) ПОО:

- разрушения F_v , обусловленные вариативностью функции состояния системы. Вероятность такого события оценивается как $P(F_v)$;

- разрушения F_E , связанные с человеческим фактором (или ошибками в широком смысле этого понятия), оценивающиеся вероятностью $P(F_E)$.

Простейшая сценарная модель, учитывающая неопределенности указанных двух типов, может быть представлена с помощью дерева событий (рис. 5), содержащего обобщенные сценарии разрушения (аварии, катастрофы), обусловленные техническими причинами и человеческим фактором [10]. В данной модели будем считать, что разрушение F системы в целом может произойти при достижении системой предельных состояний вследствие (а) разрушения отдельных элементов, обусловленных вариативностью функции предельных состояний, и (б) ошибок проектировщиков, строителей или эксплуатантов, совершаемых на различных этапах жизненного цикла. Тогда событие F может рассматриваться как объединение двух событий: F_v – разрушение, связанное с вариативностью технических параметров, и F_E – разрушение, произошедшее вследствие ошибки (человеческий фактор): $F = F_v \cup F_E$.

При этом вероятность разрушения системы может быть выражена как:

$$P(F) = P(F_v | \bar{E}) \cdot P(\bar{E}) + [P(F_E | E) + P(F_v | E)] \cdot P(E), \quad (12)$$

где $P(E)$ – вероятность совершения ошибки; $P(F | E)$ – условная вероятность разрушения, вызванного ошибкой, в случае, если была совершена ошибка; $P(F_v | E)$ – условная вероятность разрушения, обусловленного вариативностью технических параметров, в случае, если была совершена ошибка; $P(F_v | \bar{E})$ – условная вероятность разрушения, обусловленного вариативностью технических параметров, в случае отсутствия ошибки; $P(\bar{E}) = 1 - P(E)$ – вероятность несовершения ошибки.

Традиционная теория надежности концентрирует внимание на оценке величины $P(F_v | \bar{E})$, которая характеризует вероятность разрушения ПОО при условии отсутствия ошибок. Однако опыт эксплуатации ПОО свидетельствует, что от 70 до 90% разрушений ПОО бывает связано с человеческим фактором [1]. Важно, что с помощью выражения (12) могут быть описаны оба основных типа источников разрушений. При этом необходимо учитывать, что механизмы разрушений, обусловленные техническими причинами, могут принципиально отличаться от механизмов разрушений, которые были инициированы ошибками человека. Поэтому структура сценарного графа, составляемого с учетом человеческого фактора, должна быть существенно пересмотрена.

Будем считать, что после серьезной ошибки вероятность разрушения системы вследствие ошибки оказывается существенно больше, чем вероятность разрушения вследствие вариативности параметров нагрузки и несущей способности: $P(F_E | E) \gg P(F_v | E)$. Это допущение оказывается справедливым при достаточно больших запасах. В этом случае величиной $P(F_v | E)$ в выражении

(12) можно пренебречь по сравнению с величиной $P(F_E|E)$, то есть считать $P(F_V|E) \approx 0$. Тогда выражение (12) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} P(F) &= P(F_V | \bar{E}) \cdot P(\bar{E}) + P(F_E | E) \cdot P(E) = \\ &= P(F_V \bar{E}) + P(F_E E). \end{aligned} \quad (13)$$

Причем, первое слагаемое в выражении (13) определяет вероятность разрушения, обусловленного техническими факторами, а второе слагаемое – вероятность разрушения из-за ошибок, совершаемых на различных этапах жизненного цикла ПОО.

Сделанные выводы хорошо согласуются с имеющимися статистическими данными, которые показывают, что для систем, спроектированных с малым запасом, и, следовательно, работающих на режимах близких к исчерпанию их несущей способности, наиболее эффективным способом повышения надежности и безопасности является увеличение запасов. Сначала при увеличении запаса n вероятность разрушения резко снижается (рис. 4, участок «а» кривой $P(F_V)$) [9]. Однако по мере роста запаса скорость снижения вероятности разрушения начинает заметно падать и, после перехода в область высоконадежных систем, условной границей которой является величина запаса n_{**} , вероятность разрушения начинает весьма слабо зависеть от дальнейшего увеличения запаса (рис. 4, участок «б» кривой $P(F_V)$). Это объясняется тем, что при $n > n_{**}$ доминирующей причиной разрушения становится не вариативность параметров нагрузки и несущей способности, которая может быть компенсирована с помощью задания большего запаса, а ошибки, допускаемые при проектировании, строительстве или эксплуатации, которые не могут эффективно парироваться с помощью увеличения запаса (поскольку эти ошибки меняют вид функции предельных состояний или даже могут создавать новые механизмы достижения предельных состояний) (рис. 4, кривая $P(F_E)$). Поэтому в таком случае для снижения вероятности разрушения необходимо сосредоточить усилия на совершенствовании стратегии эксплуатации ξ , включающей меры технического мониторинга, процедуры контроля, регламентных и ремонтных работ и т. д., позволяющей своевременно идентифицировать и устранять ошибки, то есть компенсировать неопределенности Типа 2¹. Таким образом, вероятность разрушения ПОО можно рассматривать как функцию двух обобщенных переменных: запаса n и качества стратегии эксплуатации ξ (рис. 6), которые характеризуют два принципиально различных типа неопределенностей, связанных с функционированием ПОО [5].

¹ Здесь ξ – обобщенный параметр, характеризующий качество избранной стратегии эксплуатации ПОО, причем $\xi = 0$ соответствует стратегии, при которой эксплуатация ПОО не предполагает проведения каких-либо процедур контроля, технического обслуживания и ремонта ПОО, а $\xi = 1$ – стратегии, предполагающей максимально возможный контроль и ремонт.

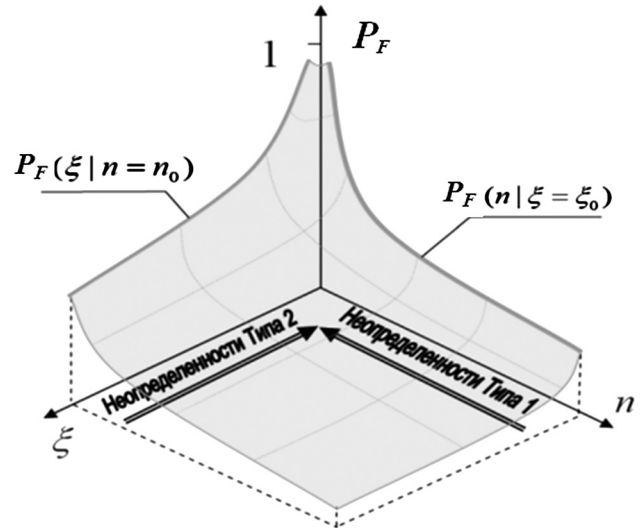


Рисунок 6. Зависимость вероятности разрушения от запаса и качества стратегии эксплуатации

В рамках традиционных и новых подходов к оценке конструкционной прочности и безопасности потенциально опасных объектов ключевое место занимает количественное определение интегральных показателей рисков возникновения разрушений, аварий и катастроф. В рамках этих подходов обязательному учету подлежат такие параметры, как запасы прочности и вероятности перехода несущих элементов в предельные состояния и соответствующие им ущербы. При этом в количественных оценках этих параметров существенную роль играют неопределенности, связанные с волатильностью параметров системы и внешней среды и с проявлением человеческого факторов на всех стадиях жизненного цикла объектов. Современные теории прочности и безопасности позволяют как оценивать роль этих факторов, так и разрабатывать методы компенсации неопределенностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант №16-29-09575)

Библиографический список

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты [Текст]. – М.: МГОФ «Знание» 1998-2019 гг., тт.1-55.
2. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: Фундаментальные и прикладные исследования [Текст] / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
3. Elishakoff, I. Safety Factors and Reliability: Friends and Foes? [Text] / I. Elishakoff. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
4. Ching, J. Equivalence between reliability and factor of safety [Text] / J. Ching // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2009. – Vol. 24(2). – P. 159-171.
5. Резников, Д.О. Способы компенсации неопределенностей при обеспечении защищенности сложных

технических систем и оптимизации затрат их жизненного цикла [Текст] / Д.О. Резников // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – № 3. – С. 57-64.

6. **Махутов, Н.А.** Два типа сценариев аварий в сложных технических системах [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.В. Зацаринный // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 2. – С. 28-41.

7. **Махутов, Н.А.** Сопоставление детерминированных и вероятностных оценок прочности конструктивных элементов технических систем при серийных нагрузках [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 5. – С. 41-46.

8. **Махутов, Н.А.** Нормативные и вероятностные подходы к обеспечению защищенности критически важных объектов [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров и др. // Безопасность в техносфере. – 2011. – № 4. – С. 5-12.

9. **Beeby, A.W.** Safety of structures, and a new approach to robustness [Text] / A.W. Beeby // The Structural Engineer. – 1999. – Vol. 77. – P. 16-21.

10. **Ellirtgwood, B.** Design and Construction Error Effects on Structural Reliability [Text] / B. Ellirtgwood // Journal of Structural Engineering. – 1987. – Vol. 113(2). – P. 409-422.

11. **Dhillon, B.S.** Human Reliability and Error in Transportation Systems [Text] / B.S. Dhillon. – Springer-Verlag, London, 2007. – 182 p.

12. **Махутов, Н.А.** Учет угроз, связанных с человеческим фактором, при оценке защищенности опасных производственных объектов [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 60-67.

13. **Махутов, Н.А.** Влияние человеческого фактора на безопасность технических систем [Текст] / Н.А. Махутов, Р.С. Ахметханов, Е.Ф. Дубинин и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 3. – С. 80-98.

14. **Махутов, Н.А.** Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности [Текст] /

Н.А. Махутов, Н.А. Абрамова, В.А. Акимов и др. – М.: МГОФ «Знание», 2008. – 687 с.

15. **Махутов, Н.А.** Особенности обеспечения безопасности критических инфраструктур [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров // Безопасность в техносфере. – 2014. – Т. 3. – № 1(46). – С. 3-14.

Сведения об авторах

Николай А. Махутов – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), адрес: Малый Харитоньевский пер., д.4, Москва, Российская Федерация, 101990, тел. (495) 930 80 78, e-mail: kei51@mail.ru

Дмитрий О. Резников – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), адрес: Малый Харитоньевский пер., д.4, Москва, Российская Федерация, 101990, тел. (495) 623 58 35, e-mail: mibsts@mail.ru

Вклад авторов в статью

Махутовым Н.А. проведены обобщение данных по назначению запасов прочности при различных механизмах достижения предельных состояний, обоснование критериев прочности элементов конструкций и деталей машин в детерминистической постановке и развитие вероятностных подходов к оценке прочности с учетом разброса механических характеристик конструкционных материалов

Резниковым Д.О. проведена сопоставительная оценка детерминистических и вероятностных подходов к обеспечению прочности и безопасности технических систем; рассмотрены способы применения графологических методов при оценке прочностной надежности технических систем с учетом различных типов неопределенности.

О методе синтеза рисков в управлении безопасностью структурно-сложных систем

Александр В. Бочков, ООО «Газпром газнадзор», Российская Федерация, Москва
a.bochkov@gmail.com



Александр В.
Бочков

Резюме. Цель статьи – показать, что риск для объектов критически важной инфраструктуры (ОКВИ) структурно-сложных систем (ССС) следует рассматривать как многокомпонентный вектор, набор параметров которого может меняться. Реальная оценка уровня безопасности на основе использования риск-ориентированного подхода невозможна без достаточно информативной базы относительно количественных и качественных характеристик факторов рисков и, с другой стороны, данных о состоянии объектов и технологического процессов на них, которые испытывают влияние этих факторов риска. Оценка риска всегда имеет целью определение его количественных показателей, что дает возможность использования ее не только для оценки состояния промышленной безопасности, но и для обоснования экономической эффективности мероприятий, экономических расчетов необходимого возмещения или компенсаций потерянного здоровья рабочим и окружающей среде. **Метод.** Предложен метод синтеза рисков (с использованием игровой постановки задачи противодействия возможным внешним воздействиям различной природы на ОКВИ СССР) как основы создания современных систем мониторинга угроз безопасности функционирования СССР. Особое внимание необходимо уделить влиянию факторов риска на систему сбалансированных показателей безопасности и рисков, поскольку прогнозирование по единичным показателям не дает целостной картины тенденций развития и состояния системы. **Результат.** Сформулированы ключевые методологические положения: от общей постановки задачи управления безопасностью через синтез модели управляемого объекта и его внешних и внутренних связей, решение проблемы выбора приоритетных объектов защиты с точки зрения обеспечения эффективности функционирования и общей безопасности СССР. В качестве основы современных систем мониторинга угроз и рисков безопасности предложена концепция управления рисками, направленная на формирование механизмов, методов и инструментов синтеза, анализа и прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций. **Вывод.** Предложенный метод может быть применен для широкого круга задач первичного анализа, синтеза и количественной оценки рисков ОКВИ и управления безопасностью СССР различного назначения.

Ключевые слова: структурно-сложная система, объекты критически важной инфраструктуры, синтез рисков, безопасность, управление.

Для цитирования: Бочков А.В. О методе синтеза рисков в управлении безопасностью структурно-сложных систем // Надежность. 2020. №1. С. 57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67>

Поступила 13.12.2019 г. / После доработки 23.01.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

...есть люди, которые будут комфортнее чувствовать себя в лабиринтах Альп с картой Пиренеев в руках, чем вообще без карты. Конечно, никто не делает этого в прямом смысле, но куда хуже поступают те, кто, имея дело с будущим, полагаются на меры риска. Они предпочитают ущербный прогноз отсутствию прогноза.

Насим Талеб

Введение

Надежность и безопасность являются ключевыми свойствами ССС критического и бизнес-критического назначения, требования к которым постоянно растут. Это обусловлено несколькими факторами.

Во-первых, растут риски аварий и катастроф техногенного характера. Например, по данным, озвученным на известной общеевропейской конференции ESREL, такие аварии составляют 70% от общего количества. Почти каждый десятый пуск ракет-носителей заканчивается аварией, что приводит к последствиям экономического и экологического характера.

Во-вторых, усложнение систем не сопровождается адекватным увеличением показателей безотказности их компонент, что вызывает дефицит надежности и безопасности ССС за отсутствия адекватных структурных решений. Кроме того, растет разнообразие компонент, которые могут использоваться для построения систем, что затрудняет, в свою очередь, поиск вариантов компенсации этого дефицита.

В-третьих, уникальность таких систем как с коротким, так и с длительным временем активного использования, приводит к дефициту достоверной информации относительно реальных значений показателей безотказности их компонент ССС в целом. Острота этого фактора увеличивается пропорционально росту сложности и декларируемой безотказности компонент, например, больших и сверхбольших интегральных микросхем. Кроме того, коммерческий характер производства некоторых элементов и жесткая конкуренция приводят к закрытию или недостоверности информации относительно их безотказности.

С другой стороны, современные методы теории надежности и теории рисков сложных технических систем и соответствующие информационные технологии поддержки принятия решений при их разработке, эксплуатации и реинжиниринга не предоставляют адекватных рекомендаций структурного, функционального и алгоритмического характера. Математические модели классической теории надежности не учитывают в полном объеме многообразие характеристик компонент и вследствие этого фактически не позволяют получить точные решения оптимизационных задач, что приводит к двум видам рисков. Риски, связанные с завышением показателей надежности и

безопасности, могут привести к недопустимому увеличению фактического значения вероятности отказа и аварии, а риски их занижения – относительно действительных – к лишним затратам при разработке и использовании ССС по назначению, что весьма важно, учитывая большую стоимость их производства и владения.

В конце двадцатого века произошли революционные изменения в сфере переработки информации, которые потребовали коренного пересмотра базовых принципов информационного менеджмента. Так, если ранее главное место в информационном обеспечении той или иной деятельности занимали задачи поиска дефицитных данных, то в настоящее время информации стало столько, что наблюдается ее переизбыток. Главными задачами в этих условиях становятся задачи оценивания информации по критериям достоверности, новизны, полезности, а также задачи обеспечения своевременного продвижения информации к конечным потребителям (ЛПР) при обязательном выполнении требований к заданному объему и качеству данных.

Задачи, стоящие перед этими органами управления любой компании или государства, изначально по своей природе непосильны для одного человека или даже целого коллектива. Формирование адекватных управленческих решений требует реализации сложных, распределенных по множеству рабочих мест процедур поиска, хранения и переработки необходимых данных, грамотного сочетания плановой деятельности с деятельностью, вызванной необходимостью быстрой качественной реакции на возникающие непрогнозируемые ситуации.

1. Об уровнях потери устойчивости системы

Управление любой организацией строится по иерархическому принципу. В иерархической системе управления любая подсистема некоторого уровня подчинена подсистеме более высокого уровня, в состав которой она входит и управляется ею. Система управления делится на подсистемы, пока полученная подсистема не перестанет выполнять функции управления, т.е. подсистемой низшего уровня будет подсистема, которая осуществляет непосредственное управление конкретными орудиями труда, механизмами, устройствами или технологическими процессами. Система управления более высокого уровня осуществляет управление технологическими процессами через подсистемы более низких уровней (промежуточных уровней).

Система управления предприятием строится также по многоуровневой структуре. От подсистем, расположенных на более высоком уровне, идет поток управляющей информации к подсистемам, расположенным на более низком уровне, в то же время подсистемы более низкого уровня посылают информацию о текущем состоянии объекта управления подсистемам более высокого уровня. Преимущество иерархической структуры управления предприятием заключается в том, что решение задач управления основывается на базе локальных решений,

принимаемых на соответствующих уровнях иерархии управления. Нижний уровень управления является источником информации для принятия управленческих решений на более высоком уровне. Поток информации от уровня к уровню по количеству информации уменьшается с повышением уровня, но при этом увеличивается ее смысловое (семантическое) содержание.

Все решения, принимаемые для управления производством, делятся на регламентные и случайные. К регламентным решениям относятся решения, которые принимаются регулярно с определенной периодичностью, поэтому большая часть процедур, связанных с выполнением этих решений, поддается автоматизации. Случайные решения принимаются в результате непредвиденных обстоятельств и поэтому не поддаются надежному информационному обслуживанию.

В крупных производственных объединениях для руководителей верхнего уровня управления создаются специализированные системы контроля исполнения директивных вышестоящих и собственных решений (индикативные системы). Это позволяет руководителям сосредоточить свое внимание на стратегических вопросах, на исполнении перспективных задач и долгосрочных плановых работах за счет повышения скорости получения стратегической информации, широты и глубины анализа на основе информационной группировки сведений.

Таким образом, для организации оптимальной системы управления безопасностью в СССР необходима интеграция научно-технических результатов и информационных ресурсов и разработка методики комплексного анализа устойчивости функционирования и методических основ комплексной системы управления рисками компании. Внедрение подобной системы повысит обоснованность решений не только в области прогнозирования угроз возникновения внештатных и кризисных ситуаций различных типов и масштабов, но и в области решения задач оценки эффективности вложений в направления обеспечения безопасности и устойчивого функционирования системы. Комплексный анализ взаимосвязанных рисков позволит дать обоснование необходимых и достаточных уровней безопасности опасных объектов и производств исходя из их важности для решения широкого спектра задач управления.

В настоящее время существует ряд подходов к оценке кризисной (предкризисной) ситуации на некотором объекте (системе), которые с системной точки зрения базируются на решении задач классификации состояний исследуемой частично управляемого динамического объекта (системы) в условиях риска и неопределенности или другими словами – на оценке последствий прогнозируемых сценариев развития текущего состояния в последующие.

С позиций системологии потеря устойчивости развития системы проявляется на нескольких иерархически связанных уровнях, каждый из которых требует отдельного обстоятельного анализа.

Первый уровень – уровень «прочности» (сложная конструкция должна состоять из устойчивых элемен-

тов) – связан с устареванием оборудования, отставанием уровня квалификации персонала от скорости развития современных технологий и исчерпанием ресурсов на которых работает система.

Второй уровень – уровень «надежности» (сохранение работоспособности целого в условиях отказа части элементов) – обеспечивается главным образом дублированием элементов, узлов, подсистем.

Третий уровень – уровень «живучести» – связан со способностью системы активно противодействовать внешним угрозам.

Четвертый уровень – уровень «самоорганизации» – проявляется в адаптивных свойствах системы по «подуровням»:

- а) «гомеостазис» – поддержание «в норме» целостности системы и ее жизненно важных функций;
- б) «обучение, тренинг» – выработка новых методов функционирования для обеспечения способности решать более сложные задачи в будущем;
- в) «преадаптация» (предвидение, интеллект) – подготовка «впрок» оптимизированных планов, механизмов и ресурсов для разрешения кризисных и предкризисных ситуаций, которые не произошли, но возможны в будущем;
- г) «перерождение» – формирование в недрах старой системы «новой» системы, функционирующей по «новым» правилам, в которых старая система существовать не сможет.

Кроме того, как уже упоминалось ранее, ситуационное управление принципиально базируется на том факте, что значительная часть информации представлена в виде текстовых сообщений в средствах массовой информации или других изданиях и имеет внеплановый непрогнозируемый характер. Поскольку эта информация уникальна и изменчива во времени, аналитические структуры компании зачастую не способны оценить ее достоверность, новизну и полезность. Нередко вследствие этого информация переходит в разряд т.н. «слабо формализованных угроз» (т.е. угроз, которым свойственны неопределенность и динамичность исходных данных и знаний), для которых характерны:

- большое количество информации, которая имеет символическую природу;
- не существует математической постановки задачи и формального алгоритмического решения, а если и существует, то пространство поиска решения очень велико и найти его за допустимое время и с имеющимися ресурсами практически невозможно;
- для решения задач требуются эвристики – утверждения, основанные на экспериментальных данных, интуиции; цель их применения – найти более рациональное решение, а не точное математическое, путем исключения заранее непригодных решений.

Несмотря на то, что в последнее время доля слабо формализуемых угроз (появление новых информационных и социальных технологий, террористические и военные риски, вопросы изменения ценовой политики, новые технологии, миграционные процессы и т.п.) растет, что не может не отражаться, в том числе, и на

комплексной безопасности, оценке и анализу этих угроз уделяется недостаточно внимания.

Вместе с тем накапливается опыт создания систем пополнения знаний, появляются модели, позволяющие различать просто информационный шум от информационной атаки или информационного обозначения поступающих событий. В частности, меняется лексика и частотный характер сообщений до «критических» событий и после. Информация имеет, как правило, многоаспектный характер, существуют т.н. «классификаторы проблем» и, тем самым, кроме идентификации угроз накапливаются и систематизируются знания относительно того, какая проблема «цепляет» другие проблемы в соответствии некоторыми сценариями.

Только комплексный анализ взаимосвязанных рисков ССС в целом и входящих в нее подсистем, позволит дать обоснование необходимых и достаточных уровней безопасности опасных объектов и производств исходя из их важности для решения широкого спектра задач управления.

Следует также отметить, что в практике экономико-математического анализа, применяемого в настоящее время, существует засилье методов, происхождение которых вызвано успешным решением тех или иных физико-технических задач. Вместе с тем тезис «классической науки» о беспристрастности законов природы (безусловной воспроизводимости их в жизни) не выдерживает критики. Практические решения часто носят «разовый», «неповторимый» характер, поэтому математика для «жизни» методологически принципиально более сложная, чем, математика для «физики».

При всем уважении к физико-техническим и другим естественнонаучным задачам, изучаемым в них явлениям присуща подчиненность объективным природным закономерностям и независимость от чьих-либо субъективных действий и от чьих-либо интересов. Сознательное вмешательство в развитие «физического мира» сводится, выражаясь математическим языком, к заданию тех или иных «параметров» при использовании неизменных общих закономерностей. Познание физических процессов направлено на выявление и анализ относящихся к ним скрытых причинно-следственных отношений и, тем самым, затрагивает лишь аналитический уровень познания.

Анализ систем не включает в себя ни оценки познанного, ни рассмотрения каких-либо действий, совершаемых познающим субъектом на основании приобретенной информации. Истинный анализ беспристрастен – он не должен указывать, каким должен быть изучаемый объект (каким было бы «хорошо» ему стать), и какие действия следовало бы предпринять для его изменения в том или ином направлении. Тем самым, критерием завершения анализа систем как этапа системного познания является установление непротиворечивости данных, полученных после формализации фактов, и корректности процедур выводов из них.

Вместе с тем исследование большинства явлений, происходящих в реальном мире, вызвано именно необходимостью активного сознательного «пристрастного» изменения познающим субъектом объектов познания,

в частности, необходимостью конструирования таких объектов, которых не было ранее. При этом надо уметь прогнозировать деятельность и вытекающий из нее результат с учетом того, что «другие не спят», т.е. работать в условиях конкуренции в постоянном поиске оптимальных (приемлемых) решений.

2. Замечания об оптимальности

Здесь уместным становится методологическая проработка вопроса «что такое оптимально?». Содержательные представления об оптимальности в условиях конфликтов (т.е. в условиях различия интересов) возникли и развиваются достаточно давно. Во многих исследованиях представление о конфликте и об оптимальности в условиях конфликтов является ведущим в том смысле, что отказ от их рассмотрения делает беспредметным все исследование. Достаточно сослаться на такие явления, как боевые конфликты, политическая борьба, конкуренция в экономике и т.п. Наличие конкуренции в корне меняет существо прогнозных оценок, в том числе и прогнозных оценок достижений тех или иных направлений бизнеса.

Поясним сказанное на примере системы уравнений Лотки-Вольтерра, предназначенной для изучения явления «конвергентной эволюции» (отбора наиболее перспективных направлений развития, в частности):

$$\begin{cases} dN_1/dt = \varepsilon_1 \times N_1 - \gamma_{12} \times N_1 \times N_2 - \gamma_{11} \times N_1^2 = UP_1(N_1, N_2) \times N_1; \\ dN_2/dt = \varepsilon_2 \times N_2 - \gamma_{21} \times N_2 \times N_1 - \gamma_{22} \times N_2^2 = UP_2(N_1, N_2) \times N_2. \end{cases} \quad (1)$$

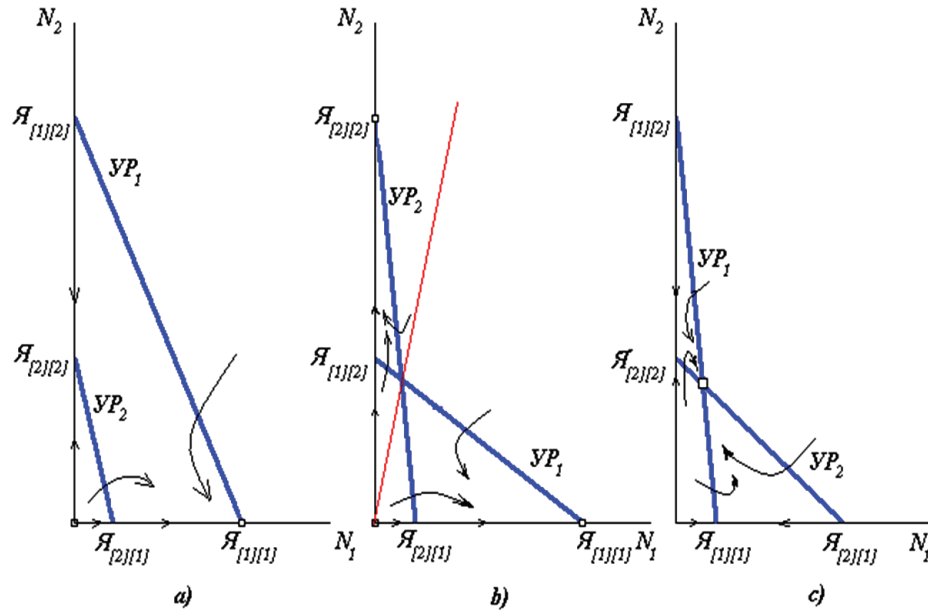
Первые коэффициенты в правых частях уравнений ε_1 и ε_2 – скорости экономического роста капиталов двух конкурирующих направлений, вторые $-\gamma_{12}$ и γ_{21} – уровень межвидовой конкуренции (воздействия внешних конкурентов, «чужих»); третьи γ_{11} и γ_{22} – являются показателями внутривидовой конкуренции (воздействия внутренних конкурентов, «своих») – развитие собственного производства уменьшает дефицит продукции, то есть снижает цены на товар, тем самым замедляя рост производства). Здесь N_1 и N_2 – размеры соответствующих конкурирующих капиталов.

Обозначим через $Y_{[a][b]}$ координаты пересечения линейных уравнений $UP_a(N_1, N_2)$ с осями переменных $(0, N_b)$:

$$Y_{[1][1]} = \frac{\varepsilon_1}{\gamma_{11}}, Y_{[1][2]} = \frac{\varepsilon_1}{\gamma_{12}}, Y_{[2][1]} = \frac{\varepsilon_2}{\gamma_{21}}, Y_{[2][2]} = \frac{\varepsilon_2}{\gamma_{22}}. \quad (2)$$

В зависимости от значений этих четырех коэффициентов и начальных значений капиталов $N_1(0)$ и $N_2(0)$ система (1) допускает решения трех типов, описывающих три различных исхода конкурентной борьбы (рис. 1).

Случай (а). Если одновременно выполняются $Y_{[1][1]} > Y_{[2][1]}$ и $Y_{[1][2]} > Y_{[2][2]}$, то первый вид бизнеса, безусловно, вытесняет своего оппонента независимо от «стартовых» начальных условий (см. рис. 1а). Реализуется сценарий «отбора» сильнейшего, у слабейшей стороны нет шансов на выживание.



Y_{P1} и Y_{P2} – изоклины вертикальных и горизонтальных касательных, соответственно.

Рисунок 1. Фазовые портреты системы Лотки-Вольтерра

Случай (b). Если $Y_{1[1]} > Y_{2[1]}$ и $Y_{2[2]} > Y_{1[2]}$ то снова имеется только один победитель, но который из двух – это уже зависит от начальных условий (см. рис. 1b).

В этом случае антагонизм конкурентов настолько силен, что факторы самоограничения не играют существенной роли. Случай (b) отличается от предыдущего случая тем, что «слабейшая» сторона получает шанс победить за счет «численного превосходства»: требуется наличие соответствующего «стартового капитала», помещающего победителя с предпочтительной для него стороны от сепаратриссы, проходящей через точку фазовой плоскости (0,0) и точку пересечения изоклин вертикальной и горизонтальной касательных. Этот случай описывает ситуации на рынке, когда главную роль играет факт того, достаточно ли «критическая масса» стартового капитала для того, чтобы задавить конкурента «в зародыше», не дать ему вырасти до того уровня, когда с ним придется «считаться» (делить рынок).

Случай (c). Внутривидовая борьба для обоих конкурентов настолько сильна (каждый занят решением проблем торможения роста капитала вследствие «внутренних проблем»), что конкуренция среди «своих» превышает давление со стороны «чужаков» (при $Y_{2[2]} < Y_{1[2]}$ и $Y_{1[1]} < Y_{2[1]}$).

В этом случае возможно длительное сосуществование обеих конкурирующих сторон на рынке (см. рис. 1c). При этом имеется единственное устойчивое решение, при котором скорости воспроизводства новых элементов конкурирующих сторон компенсируют торможение, оказываемое сочетанным воздействием факторов внутренней и внешней конкуренции.

Эти модели используются, в частности, для прогнозирования перспектив относительно однородных технологий, конкурирующих между собой, (например,

вследствие принадлежности различным собственникам), но и имеющих «общего врага». Например, для газовой промышленности таковыми являются ядерная энергетика, возможно, другие альтернативные виды энергетики, химическая промышленность материалов, замещающих газ, используемый как сырье для синтеза и т.д.

Как видно даже из анализа приведенной выше упрощенной аналитической модели – использование средств «технического анализа» экономических данных, построенного на различных моделях регрессии не корректно всегда. По крайней мере, в условиях, когда доминирующим фактором является не динамика предыдущей успешности, а факторы, определяющие конкурентоспособность старых (проверенных) технологий на фоне развивающихся новых технологий (и «своих» и «чужих»), в условиях их борьбы за одного и того же ограниченного по возможностям потребителя, необходимы методы анализа конкурентных систем.

3. Алгоритм синтеза функции риска

В статье [2] предлагался алгоритм решения задачи распределения ресурсов, предназначенных для защиты объектов критической инфраструктуры от террористических атак, на основе субъективных экспертных оценок. Покажем, как от качественных экспертных оценок можно перейти к количественным оценкам угрозы, используя алгоритм, названный ранее синтезом рисков.

Итак, рассмотрим некоторый (k -й) объект CCC.

В результате предполагаемого воздействия некоторого уровня интенсивности этому объекту, через его полный (или частичный) выход из работоспособного состояния, будет нанесен определенный ущерб. Обозначим его через X .

С учетом того, что не каждое воздействие априори приводит к разрушениям, профиль защиты k -го объекта может быть описан интервальными представлениями посредством задания четырех матриц:

$$Q_{\min}^{[k]}(i, j), Q_{\max}^{[k]}(i, j), X_{\min}^{[k]}(i, j), X_{\max}^{[k]}(i, j), \quad (3)$$

где $i(i=0, 1, \dots, I^{[k]})$ – уровень защиты k -го объекта (нулевой уровень ($i=0$) соответствует текущему состоянию защиты).

Интерпретация элементов матрицы такова: если на указанный объект k с уровнем защиты i будет осуществлено воздействие с уровнем интенсивности j , то с вероятностью от $Q_{\min}^{[k]}(i, j)$ до $Q_{\max}^{[k]}(i, j)$ ССС будет нанесен ущерб величиной от $X_{\min}^{[k]}(i, j)$ до $X_{\max}^{[k]}(i, j)$.

Ясно, что величины (3) будут расти по мере роста уровня интенсивности воздействия j и будут снижаться по мере возрастания уровня защищенности объекта i .

Очевидно, что защита на любом уровне требует определенных материальных затрат как со стороны собственника объекта, так и государства. Обозначим величину затрат на создание и поддержание защиты объекта k на i -ом уровне как $Y^{[k]}(i^{[k]})$.

Поскольку суммарный ресурс, выделяемый на защиту всех объектов, ограничен, должно выполняться неравенство:

$$\sum_k Y^{[k]}(i^{[k]}) \leq Y, \quad (4)$$

где Y – сумма всех затрат на защиту объектов при условии, что для каждого объекта k выбран вариант системы защиты $i^{[k]}$.

В случае природных воздействий, у которых, в отличие от воздействий, организуемых человеком, не существует преимущества выбора цели и варианта воздействия, то есть, природа неизбирательна (как и технологические отказы), «оптимальный» профиль защищенности объектов мог бы быть достигнут посредством последовательного выполнения следующего алгоритма:

Шаг 1. Оценить вероятности $\lambda^{[k]}(j)$ воздействия на каждый k -ый объект j -го уровня интенсивности;

Шаг 2. Рассчитать медианное значение риска от реализации воздействия на k -ый объект j -го уровня интенсивности при $i^{[k]}$ -ом варианте реализации системы защиты объекта:

$$R[k; i^{[k]}] = \sum_{j=0}^J \left\{ \lambda^{[k]}(j) \times \left(\frac{Q_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + Q_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \times \left(\frac{X_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \right\}; \quad (5)$$

Шаг 3. Определить величину предотвращенного риска на единицу вложенных в защиту средств – $\theta[k, i^{[k]}]$:

$$\theta[k, i^{[k]}] = \frac{R[k, i^{[k]}]}{Y^{[k]}(i^{[k]})}; \quad (6)$$

Шаг 4. Выбрать для каждого k -го объекта максимальное из значений $\theta[k, i^{[k]}]$:

$$\theta[k, i^{*[k]}] = \max_{i^{[k]}} \{ \theta[k, i^{[k]}] \}, \quad (7)$$

т.е. при выбранном варианте $i^{*[k]}$ наблюдается максимальное снижение риска на единицу вложенных средств для k -го объекта.

Шаг 5. Составить ранжированный перечень объектов, располагая их по убыванию величины показателя $\theta[k, i^{*[k]}]$, и отсчитать первые $\tilde{K}$ объектов в списке такие, что суммарные затраты на их защиту вкладываются в выделенные средства Y , а на $(\tilde{K}+1)$ -ый объект ресурсов не хватает.

Суть вышеприведенной процедуры проста и понятна: нет смысла изыскивать средства на дополнительную защиту тех объектов, которым ничто не грозит (величины угроз $\lambda^{[k]}(j)$ малы). Также нецелесообразно защищать дополнительно те объекты, временная потеря работоспособности которых практически не сказывается на величине суммарных потерь собственника объектов (соответственно, малы $X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)$). И, наконец, дополнительная защита нецелесообразна на тех объектах, которые уже защищены настолько хорошо, что снижение потерь может быть принципиально достигнуто, но неадекватно большими средствами (т.е. малы значения $\theta[k, i^{*[k]}]$).

Ключевым моментом описанного выше алгоритма является составление ранжированного перечня объектов по критерию минимизации математического ожидания потерь на единицу вложенных средств в их защиту (в их устойчивое функционирование).

В формуле (5) четко прослеживается необходимость сбора и оценки данных по трем компонентам:

- по величинам потерь, вызванных реализацией воздействий $X_{\min}^{[k]}(i, j)$, $X_{\max}^{[k]}(i, j)$;
- по показателю «агрессивности среды функционирования» $\lambda^{[k]}(j)$;
- по зависимости рисков от типов объектов k .

Величины потерь X , вследствие того, что объекты ССС не являются автономными предприятиями, должны отражать системный эффект (или социально-экономический мультиэффект), который существенно возрастает в зависимости от того, какие из потребителей продукции объекта, подвергнувшегося воздействию, пострадают из-за снижения его работоспособности.

Следовательно, необходимо рассматривать не средние, а верхние границы показателей ущерба и ввести в рассмотрение дополнительно четвертый компонент – показатель важности непрерывного функционирования объекта в связи с каскадным эффектом усиления последствий потери работоспособности объекта для других объектов экономики.

И, наконец, дополнительно требуется ввести пятый компонент, необходимый для адекватного ранжирования объектов в случае террористического воздействия на объекты. Необходимость его введения обусловлена тем, что если воздействие, все-же, носит активный и

целенаправленный характер, при этом у него имеются неизвестные ни экспертам службы безопасности, ни компетентным органам государства факторы ценности и приоритеты, смещающие значения $\lambda^{[k]}(j)$ от «средневзвешенных по отрасли». Иногда эти «дополнительные» ценности носят специфический характер: террористы, например, склонны к чрезмерному кровопролитию и захвату заложников, ритуальным убийствам и т.д. Часто системная значимость охраны конкретных объектов временно возрастает во время пребывания на них первых лиц государства, министров, особенно во время пуска политически важных производственных объектов не только международного, но и регионального уровня внутри страны. Можно достаточно долго анализировать факторы, требующие учета специфики той или иной преступной деятельности, но важен сам факт: преступность действует исходя из собственных представлений о результативности и осуществимости атак. Тем самым происходит смещение приоритетов выбора целей – для террористов важна не только и не столько экономическая война, не столько важен ущерб, наносимый собственнику объектов (как конкуренту, как «оружию» влияния на сопредельные государства и т.п.), сколько достижение через нанесение ущерба объектам данной CCC каких-то других целей.

Учесть эти обстоятельства поможет пятый компонент – корректирующий коэффициент $\mu^{[k]}$, изначально равный для всех объектов единице, и который может быть, по мнению ЛПР или экспертов, увеличен таким образом, чтобы повысить приоритет включения именно k -го объекта в список объектов, оснащаемых дополнительными мерами защиты по причинам, не учитываемым общими для всех объектов правилами. В какой-то степени целесообразность введения показателя $\mu^{[k]}$ становится более понятна из следующей интеграционной модели моделей.

Итак, пусть $\tilde{Z}$ – оценка суммарного ресурса, имеющегося у сил, заинтересованных в нарушении безопасности объектов CCC. Если $\tilde{Z} < Z$, то защищающаяся сторона недооценивает возможности воздействия, если $\tilde{Z} > Z$, то, напротив, имеет место переоценка интенсивности воздействия.

Далее рассмотрим активное воздействие как наиболее непредсказуемый случай. Будем считать, что на момент выбора атаки нарушитель имеет собственные представления о количестве ресурсов, выделяемых собственником системы на охрану своих объектов, то есть, у него имеются некоторые представления и о том, как мог измениться известный ему «нулевой вариант».

Нарушители обладают правом выбора целей, и они способны выбирать наборы объектов, которые будут ими атакованы. Пусть их выбор базируется на их собственной модели ожидаемого ущерба, то есть, в их распоряжении имеются четыре аналогичные (3) матрицы для каждого из объектов: $\tilde{Q}_{\min}^{[k]}(i, j)$, $\tilde{Q}_{\max}^{[k]}(i, j)$, $\tilde{X}_{\min}^{[k]}(i, j)$, $\tilde{X}_{\max}^{[k]}(i, j)$ и свое представление о том, сколько ресурсов $\tilde{Y}$ потрачено собственником на защиту всех объектов CCC. Аналогично, если $\tilde{Y} < Y$, то противник недооценивает возможности защиты объектов и, если

$\tilde{Y} > Y$, то он их переоценивает. Очевидно, что оценки $\tilde{Q}_{\min}^{[k]}(i, j)$, $\tilde{Q}_{\max}^{[k]}(i, j)$, $\tilde{X}_{\min}^{[k]}(i, j)$, $\tilde{X}_{\max}^{[k]}(i, j)$ также могут быть нарушителями как завышены, так и занижены, тем не менее, в соответствии со своим правом выбора, они выбирают такой набор объектов для атаки и такие варианты подготовленности нарушителей для каждого объекта, при которых наносится максимальный ущерб.

Обозначим через $\delta^{[k]}(i, j)$ характеристическую функцию, которая означает, что против k -го объекта с ожидаемым уровнем защиты $i (i=0, 1, \dots, I^{[k]})$ выбрана атака уровня $j (j=0, 1, \dots, J^{[k]})$. Если для всех $i (i=0, 1, \dots, I^{[k]})$ значения $\delta^{[k]}(i, j)$ равны нулю, то j -ый объект не будет подвержен атаке уровня j . Если при всех j и всех i значения $\delta^{[k]}(i, j)$ равны нулю, то k -й объект при предполагаемом противником варианте целеполагания полностью выбывает из списка целей.

Если для некоторого $\tilde{i}$ значение $\delta^{[k]}(\tilde{i}, j(\tilde{i})) = 1$, мы считаем, что объект k с уровнем защиты 0 выбран противником как цель для атаки уровнем подготовленности $j(\tilde{i})$.

Перечисленные свойства записываются системой равенств:

$$\begin{cases} \forall k \forall i \forall j \delta^{[k]}(i, j) \times (1 - \delta^{[k]}(i, j)) = 0, \\ \forall k \left(\sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^{J_k} \delta^{[k]}(i, j) - 1 \right) \times \left(\sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^{J_k} \delta^{[k]}(i, j) \right) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Учитывая, что

$$\forall j \sum_{i=0}^{I_k} \sum_{k=1}^K \delta^{[k]}(i, j) = N_j \quad (9)$$

и дополняя (8), (9) системой ограничений мы получаем оценку суммарного ущерба, наносимого объекту:

$$\tilde{R} = \sum_k \sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^{J_k} \left\{ \delta^{[k]}(i, j) \times \left(\frac{\tilde{Q}_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + \tilde{Q}_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \times \left(\frac{\tilde{X}_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + \tilde{X}_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \right\}. \quad (10)$$

Обозначим $\tilde{R}$ как $\tilde{R}(Var_i, Var_j)$, подчеркивая, что $\tilde{R}$ зависит как от варианта защиты объектов Var_j , так и от варианта воздействия Var_i . Ищем максимум $\tilde{R}$ для всех вариантов воздействий, удовлетворяющих ограничениям, при рассмотрении всех вариантов оснащения дополнительной защитой в качестве параметров:

$$\tilde{R}^*(Var_i) = \max_{Var_j} \{ \tilde{R}(Var_i, Var_j) \}. \quad (11)$$

Тем самым постулируется, что противник (природа) выбирает самый худший для защищающейся стороны вариант. Следовательно, задача защиты сводится к ограничению множества выбора вариантов воздействия – ищется такое усиление объектов, которое минимизирует $\tilde{R}^*(Var_i)$. То есть, задача управления безопасностью сводится к поиску равновесного значения $\tilde{R}^{**}$:

$$\tilde{R}^{**} = \min_{Var_i} \{ \tilde{R}^*(Var_i) \}. \quad (12)$$

Предлагаемая постановка имеет типовой вид задач теории игр. Решением этой задачи является равновесие по Нэшу – седловая точка (Var_{I^*}, Var_{J^*}) :

$$\tilde{R}^{**} = \tilde{R}(Var_{I^*}, Var_{J^*}). \quad (13)$$

В этой точке «обороняющейся стороне» не выгодно менять стратегию оснащения Var_{J^*} , поскольку вне этой стратегии у противника появляются возможности для нанесения более «чувствительных» воздействий. Одновременно, активной атакующей стороне не выгодно менять свой план $Var_{I^*}(Var_{J^*})$, так как любое изменение приводит к снижению суммарных ущербов, которые он стремится нанести объектам CCC, а через них – государству в целом.

Задача в такой постановке теоретически имеет очень большую размерность, обладает большой комбинаторной сложностью, но вполне решается вследствие монотонности используемых критериев и линейности систем ограничений.

Основные проблемы решения этой задачи имеют скорее информационно-технологический, а не математический характер:

- для каждого k -го объекта необходимо иметь оценки последствий возможных воздействий разной интенсивности j , что часто не достижимо практически;
- для всей CCC требуется рассмотрение рисков, которым подвергаются объекты, в комплексе возможных, в том числе и слабо формализуемых угроз: оптимизация защиты тем более эффективна, чем более точно оцениваются потенциальные возможности воздействия (а они неоднородны как в технологическом, так и в региональном аспекте).

В рамках рассмотренной постановки, учитывающей комплексное воздействие, кардинально меняется понимание оценки эффективности систем защиты. Для активного воздействия, в силу ограниченности ресурсов, доступных преступному миру, естественно ожидать от него перемещение целеполагания с хорошо защищенных объектов (с малой ожидаемой результативностью воздействий) на менее защищенные объекты (с большей результативностью, но при меньших разовых ущербах). Очевидно, что нерационально дополнительно защищать объекты, которые никто не атакует. Возможно, потому и не атакуют, что ведется плановая работа по усилению охраны.

Еще одним ключевым элементом рассматриваемой задачи является то, что поиск эффективных решений с обеих сторон лежит в значительной мере в информационной плоскости:

- преступник, готовясь к атаке на объект, в идеале ищет сообщников, которые помогли бы ему выбрать цель приложения сил, достижимую при его уровне подготовленности и оснащенности;
- система защиты способна была бы оказать большее концентрированное противодействие, если бы знала о намерениях преступности.

Поэтому при описании вышеприведенной процедуры для активного воздействия неоднократно подчеркивается,

что речь идет только об оценках с обеих сторон. Из-за неустрашимой неопределенности оценок в качестве решения задачи о выработке стратегии и тактики усиления защиты объектов CCC от возможных противоправных действий, включая террористические акты и атаки диверсионных групп, целесообразно «заглубить» игровую постановку [3]. При этом заглублении должны «идеализироваться возможности противника» и ужесточаться характеристики возможных потерь, например, путем перехода от медианных оценок рисков к максимальным.

В заключение заметим, что на этапе решения задачи оценки рисков необходимо установить связи анализируемых показателей безопасности с показателями высокого уровня (например, стратегическими целевыми показателями) и степени их влияния на достижение целевых значений этих показателей. Контроль объекта мониторинга должен быть организован таким образом, чтобы можно было вовремя провести управленческие решения, если состояние объекта приближается к опасной зоне. Данная задача распадается на ряд подзадач, так как в вертикально интегрированных компаниях есть несколько центров принятия решений на разных уровнях управления. Перспективными при решении данной задачи могут оказаться методы оценки надежности достижения целевых показателей и методы группового анализа [3, 4].

4. Об индикаторах предкризисных ситуаций

Вычисление параметров, описывающих уровни конкуренции, требует, помимо использования стратегического «коридорного» прогноза, создания системы мониторинга «слабо формализуемых» угроз устойчивому функционированию и развитию CCC, т.е. разработки индикаторов предкризисных ситуаций.

Очевидно, что разработка индикаторов предкризисных ситуаций – сложнейшая многоуровневая задача и не может укладываться в одну какую-то универсальную схему, поэтому дальнейшее развитие системы стандартизации и методологического обеспечения управления безопасностью в CCC предполагает рассмотрение ряда направлений дополнительных исследований по разработке индикаторов предкризисных ситуаций, которая должна вестись в «частных» исследовательских парадигмах с использованием различных теоретических подходов и моделей:

- информационно-логический подход;
- энергетический (балансовый) подход;
- балансовый подход (программно-целевое планирование);
- индикация состояния системы на основе моделей группового поведения элементов систем;
- индикация состояния системы на основе измерения корреляционных связей в динамике показателей элементов системы;
- индикация состояния системы на основе моделей «серого ящика» (нейронные сети, метод опорных векторов и т.п.).

Кратко поясним суть упомянутых подходов.

Информационно-логический подход. В этом подходе сущность «критическая ситуация» C описывается в виде логической функции – объединения возможных частных «эталонных» реализаций логикой «ИЛИ»:

$$C = \bigcup_n C^{[n]}. \quad (14)$$

Каждая критическая ситуация $C^{[n]}$ описывается некоторым достаточно большим подмножеством информационно-логических признаков (подобно ключевым словам в тексте). Описания эти в общем случае не однозначны, возможны «синонимы», пропуски «подразумеваемых» признаков и т.п. Как правило, признаки разделяются на три категории: индикаторы состояния самой исследуемой системы X , индикаторы «нейтральной» внешней среды (природной среды) p и индикаторы деятельности потенциального противника («конкурента») Y :

$$C^{[n]} = F^{[n]} \left\{ X^{[n,1]}, \dots, X^{[n,K(n)]}; p^{[n,1]}, \dots, p^{[n,L(n)]}; Y^{[n,1]}, \dots, Y^{[n,M(n)]} \right\}. \quad (15)$$

Предкризисная ситуация (угроза критической ситуации) диагностируется как неполный набор индикаторов, близкий к одному или нескольким «эталонным» наборам аргументов функции $F^{[n]}$. При этом предполагается, что решающая система способна оценивать вероятности перерастания угроз в реальные критические ситуации. Здесь нужны модели природных явлений и модели поведения конкурентов в ответ на реализацию тех или иных управляющих решений.

Подобный подход развивается в теории конфликтующих структур и в теории эвристик в многошаговых позиционных играх [5], в теории принятия решений [6], в ряде областей применения искусственного интеллекта [7] (медицинские диагностические системы и другие системы распознавания образов). В любом случае при этом подходе реализуется некоторая автоматизация формирования гипотез [8] и некоторые механизмы «размывания» образа «эталона» [9].

Описания моделей сценариев предкризисных ситуаций оформляются в виде деревьев (сетей) событий (отказов), иллюстрирующих логику развертки сценариев [10]. Синонимия (конкуренция или замещение рисков) моделируется в виде вложенных друг в друга функций сверток информационных признаков $F^{[n]}$, начиная со сверток первичных признаков в более крупные агрегативные признаки [6]. При большом количестве первичных признаков зачастую используется иерархическое устройство словарей признаков [11].

Описание деревьев событий – прерогатива экспертов, однако в последнее время проявляется устойчивый интерес к описанию сложных слабо формализуемых решений экспертов с помощью «генетических» алгоритмов и других эвристических методов, сочетающих поиск наилучшего описания сложной системы (предкризисной ситуации в ней) и ограниченную логику эволюционного отбора [12].

Энергетический (балансовый) подход. В деятельности любой компании прослеживается три компонента:

ресурсная компонента, научно-технологическая (производственная) компонента и внешнеэкономическая (рыночная) компонента.

Из этих представлений количество проданного товара может быть оценено следующей формулой

$$T = E \times K_{\text{пл}} \times K_{\text{план}}, \quad (16)$$

где E – энергия, необходимая для производства товара; коэффициент полезного действия ($K_{\text{пл}}$) ($0 \leq K_{\text{пл}} \leq 1$) – отражает эффективность производства товара (научно-технологический уровень производителя); коэффициент качества плана ($K_{\text{план}}$) меньший единицы указывает на то, что продукт произведен, но оказался невостребованным (или проданным по меньшей цене), например, из-за действий конкурентов на рынке (появление альтернативных источников энергии), или каких-то внешнеполитических (внешнеэкономических) обстоятельств (риски неплатежей, перенос энергоемких, загрязняющих окружающую среду производств в страны третьего мира и других).

Этот подход позволяет разрабатывать индикаторы угроз критических ситуаций на языке вероятностей срыва потока мощности производства товаров. Особое место при этом подходе уделяется определению «узких мест», определяющих предельные скорости потоков товаров (принцип Гаузе, «узкое горло Пауэлла» и другие), и показатели которых используются при анализе продуктивности самовоспроизводящихся систем с учетом «внутривидовой» и «межвидовой» конкуренции [13].

Балансовый подход (программно-целевое планирование). Методами сетевого (календарного) планирования можно рассчитать зависимости вероятностей выполнения тех или иных работ от объемов выделенных ресурсов R и выделенного времени T . По физическим причинам существуют минимальные значения T_{min} и R_{min} , ниже которых работа невыполнима в принципе. Поэтому для более вероятного выполнения работ создаются «резервы» времени и ресурсов и с учетом этих резервов предполагается соблюдение графика исчерпания времени и ресурсов в зависимости от оставшегося объема работ.

Анализируя динамику расхода времени и средств, уместно в качестве индикаторов использовать данные, свидетельствующие о приближении показателей исполнения работ, не лежащих на «критических» путях в сетевых графиках, к показателям критических работ. Угроза образования большого количества новых критических путей по ресурсам и/или времени может служить индикатором предкризисной ситуации.

Все обсужденные подходы предполагают усложняющуюся детализацию описания динамики системы в парадигме адаптивного управления, то есть, анализируются уровни отклонения от выбранного планового графика деятельности изучаемой системы так, как будто только «внешние» факторы (природа, конкуренция) выбивают систему из устойчивого равновесия, и надо измерить вероятность выхода за некоторый барьер устойчивости.

Вместе с тем возможны ситуации, в которых удерживать «равновесие» невозможно или нецелесообразно,

и требуется перестройка структуры системы – поиск «жизни по-новому».

Индикация состояния системы на основе моделей группового поведения элементов систем. В последнее время для предсказания поведения экономических систем часто используются «полевые» модели на основе уравнений Ланжевена и уравнений Фоккера-Планка. Эти уравнения описывают динамику элементов системы как некоторый «рой частиц», на который действуют два типа факторов: факторы дрейфа, смещающие «центр тяжести» под действием внешней силы, а также диффузионные факторы, отражающие уровни свободы перемещения частиц внутри роя. В моделях разрабатываются индикаторы разрушения целостности «роя» или его вырождения. Модельные индикаторы носят оценочный характер, поскольку опираются, главным образом, на справедливость законов больших чисел (теорию больших отклонений при случайных блужданиях).

Отмечается близкая связь «полевых» моделей с прикладной теорией катастроф [14], в частности показывается близость таких индикаторов, как «учащение больших отклонений – сокращение времени выхода контролируемых показателей из «коридоров»», замедление «скорости релаксации системы к равновесным состояниям», «вырождение матрицы устойчивости Гессе».

Индикация состояния системы на основе измерения корреляционных связей в динамике показателей элементов системы. В этих постановках основанием для классификации критической ситуации является изменение устойчивых (например, корреляционных, причинно-следственных, ассоциативных, информационных) связей между элементами системы. Для анализа взаимосвязанного экономического поведения крупных подсистем (дочерних предприятий) представляет интерес применения разработок в области анализа гендерных (семейных) отношений, а также математической теории комплиментарности этносов Гумилева [15].

Индикация состояния системы на основе моделей «серого ящика» (нейронные сети). Нейросетевая классификация состояний сложной системы основана на выявлении информационных признаков и связей между ними, соответствующих наиболее часто встречающимся конструкциям критических ситуаций. Получение решающих правил осуществляется посредством «обучения на примерах».

Поскольку законы распределения критических ситуаций не известны, требуется большое количество параметров для их описания и большое количество примеров, поэтому при решении задач классификации «критическая ситуация – некритическая ситуация» используются те или иные методы упрощения.

Для моделирования стохастических процессов наиболее эффективны следующие нейросетевые решения: вероятностные нейронные сети [16], самоорганизующиеся карты Кохонена [17] и динамически подстраиваемые под изменяемую статистику алгоритмы, описывающие

координаты «эталонов» критических ситуаций в виде растущего «нейронного газа», распространяющегося по пространству описания примеров [18].

Заключение

Все вышесказанное, а также требования системного подхода к исследованию перечисленных в статье задач, естественно приводит к необходимости моделирования системы обеспечения безопасности ССС как развивающейся системы [19]. Любой объект исследования, дополненный, если необходимо, определенными связями с другими развивающимися объектами, в частности, с субъектами исследования, можно интерпретировать в виде такой системы. Понимание этого обстоятельства способствует все более активному развитию этого направления в различных отраслях науки [19-23].

Экспертные оценки показывают, что суммарный эффект от применения всех доступных средств ситуационного анализа (идентификация опасной деятельности, декларирование безопасности, планирование действий при аварии, информирование населения о возможной чрезвычайной ситуации) по снижению аварийности и внеплановых потерь может достигать 10–15 %. Например, быстрое законодательное принятие странами Европейского сообщества основных положений Директивы Seveso (1982) [24] позволило снизить аварийность в развитых странах в 4–8 раз (от 400 аварий, в том числе 75 крупных, в 1983 г., до 70, в том числе 21 крупной, в 1989 г.). При этом предлагаемые меры информационного и организационного характера станут более действенными, если все составляющие системы управления производственной безопасностью в части прогнозирования, предотвращения и локализации последствий ситуаций с негативными последствиями будут работать в соответствии с едиными регламентами и стандартами. Следовательно, необходим процесс постепенной актуализации состояния информационного, нормативно-методического и прогнозно-аналитического обеспечения деятельности в области производственной безопасности как на уровне системообразующих корпораций, так и на уровне государства.

Вообще, задача мониторинга функционирования сложного «организма» корпорации – ключевая задача управления безопасностью. Этот мониторинг, если использовать аналогии, подобен профилактическим терапевтическим мероприятиям в медицине. В отличие от диспетчерского управления, которое призвано оперативно реагировать на изменение ситуации, локализовать возникновение внештатных ситуаций, иногда решать задачу (если пользоваться той же аналогией) «хирургического» вмешательства, центр мониторинга (а в перспективе сеть центров для получения объективной информации о происходящих в ССС изменениях) призван предвидеть возникновение негативных тенденций в окружении ССС, в ее внутренних процессах, чтобы предложить «лечение», которое поможет избежать перерастание обнаруженных угроз во внештатные и кризисные ситуации.

Библиографический список

1. **Бочков, А.В.** О природе рисков в управлении безопасностью структурно сложных систем [Текст] / А.В. Бочков // Надежность. – 2019. – № 4, С. 54-66. – URL: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-54-66>.
2. **Бочков, А.В.** Решение задачи распределения ресурсов, предназначенных для защиты объектов критической инфраструктуры от террористических атак на основе субъективных экспертных оценок [Текст] / А.В. Бочков, И.А. Ушаков // Надежность. – 2015. – № 1. – С. 88-96. – URL: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-1-88-96>
3. **Bochkov, A.V.** Dynamic Multi Criteria Decision Making Method for Sustainability Risk Analysis of Structurally Complex Techno-Economic Systems [Text] / A.V. Bochkov, N.N. Zhigirev, V.V. Lesnykh // Reliability: Theory & Applications, Vol. 1, № 2(25), 2012, June, p.36-42.
4. **Bochkov, A.V.** Development of Computation Algorithm and Ranking Methods for Decision-Making under Uncertainty [Text] / A.V. Bochkov, N.N. Zhigirev: Ram M., Davim J. (eds) // Advanced Mathematical Techniques in Engineering Science. – CRC Press. – Series: Science, Technology and Management. – 2018. – May, 17. – P. 121-154.
5. **Лефевр, В.А.** Конфликтующие структуры [Текст] / В.А. Лефевр. – М.: Сов. радио, 1973.
6. **Мушик, Э.** Методы принятия технических решений [Текст] / Э. Мушик, П. Мюллер. – М.: Мир, 1990.
7. **Попов, Э.В.** Статические и динамические экспертные системы [Текст] / Э.В. Попов, И.Б. Фомин, Е.Б. Кисель и др. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 315 с.
8. **Гаек, П.** Автоматическое образование гипотез: математические основы общей теории [Текст] / П. Гаек, Т. Гавранек. – М.: Наука, 1984.
9. Нечеткие множества и теория возможностей [Текст]. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
10. **Подиновский, В.В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
11. **Жамбю, М.** Иерархический кластер-анализ и соответствия [Текст] / М. Жамбю. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 342 с.
12. **Price, K.V.** Genetic Annealing [Text] / K.V. Price // Dr. Dobbs's Journal. – 1994. – Oct. – Vol. 19. – № 11. – P. 117.
13. **Эбелинг, В.** Физика процессов эволюции [Текст] / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель. – М.: Эдиторал УРСС, 2001. – 328 с.
14. **Гилмор, Р.** Прикладная теория катастроф: в 2-х томах [Текст] / Р. Гилмор. – М.: Мир, 1984.
15. **Гуц, А.К.** и др. Математические модели социальных систем: уч.пособие в 2-х томах [Текст] / А.К. Гуц, В.В. Коробицын. – Омск: ОмГУ, 2000.
16. **Specht, D.** Probabilistic Neural Networks [Text] / D. Specht // Neural Networks. – 1990. – № 1.
17. **Kohonen, T.** Self-Organizing Maps [Text] / T. Kohonen. – Springer-Verlag, 1995.
18. **Fritzke, B.** A growing neural gas network learns topologies [Text] / B.A. Fritzke: G. Tesauro, D.S. Touretsky and T.K. Leen (eds) // Advanced in Neural Information Processing Systems 7, MIT Press, Cambridge MA, 1995.
19. **Глушков, В.В.** Моделирование развивающихся систем [Текст] / В.В. Глушков, В.В. Иванов, В.М. Яненко. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 350 с.
20. **Николис, Г.** Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин: под ред. Ю.А. Чизмажева. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
21. **Реутов, А.П.** Системная модель как отношение обобщенных качеств – упорядоченности, надежности и эффективности: в кн.: Вопросы кибернетики (управление развитием систем) [Текст] / А.П. Реутов, Р.Г. Савченко, Р.М. Суслов: под ред. А.П. Реутова, Р.М. Суслова. – М.: 1979. – С. 5–34.
22. **Романовский, Ю.М.** Процессы самоорганизации в физике, химии и биологии [Текст] / Ю.М. Романовский. – М.: Знание, 1981. – 48 с.
23. **Ganti, T.** A theory of Biomedical supersystems and its application to problems of natural and artificial biogenesis [Text] / T. Ganti. – Budapest: Akademiai, 1979. – 136 p.
24. Директива о предотвращении тяжелых аварий (Севезо III). Директива 2012/18/ЕС Европейского Парламента и Совета от 4 июля 2012 г. о контроле крупных аварий, связанных с опасными веществами. [Электронный ресурс]. – URL: http://phase1.pprdeast2.eu/assets/files/Publications/SevesoIII_Directive_RUS.pdf (дата обращения: 17.02.2017).

Сведения об авторе

Александр В. Бочков – доктор технических наук, начальник отдела анализа и ранжирования объектов контроля Администрации ООО «Газпром газнадзор», Российская Федерация, Москва, e-mail: a.bochkov@gmail.com

Вклад автора в статью

Автором предложен метод синтеза рисков (с использованием игровой постановки задачи противодействия возможным внешним воздействиям различной природы на объекты критически важной инфраструктуры) как основы создания современных систем мониторинга угроз безопасности функционирования структурно сложных систем. Сформулированы ключевые методологические положения: от общей постановки задачи управления безопасностью через синтез модели управляемого объекта и его внешних и внутренних связей, решение проблемы выбора приоритетных объектов защиты с точки зрения обеспечения эффективности функционирования и общей безопасности структурно сложной системы.



<http://www.gnedenko.net>

Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» (“Reliability: Theory & Applications”).

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.



**Вступайте в Форум
Гнеденко!**

**Добро
пожаловать!**
В наших рядах уже более
500 специалистов
из **44** стран мира.

Для вступления в
Форум присылайте
фото и краткое резюме
по адресу:

к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Письмо от организации, где работает автор(ы), либо лично от автора(ов) с предложением о публикации статьи направляется в редакцию журнала по адресу: 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, офис 209, ООО «ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ» или по адресу e-mail: dependability@bk.ru (в отсканированном виде).

К письму прилагается в электронном виде (на CD или по приведенному выше E-mail) текст статьи с аннотацией и ключевыми словами, информацией об авторах, с приставленным библиографическим списком, предоставляется с одним комплектом рисунков

Внимание! Названия статьи, ФИО авторов, аннотация и ключевые слова обязательно представляются в соответствии с требованиями ВАК на русском и английском языках. Аннотация не менее 350 слов.

Информация о каждом авторе должна содержать следующие стандартные сведения:

- Фамилия, имя, отчество;
- Ученая степень, ученое звание, почетное звание;
- Членство в общественных союзах и т.д.;
- Место работы, должность;
- Перечень и номера журналов IDT Publishers, в которых ранее публиковались статьи автора;
- Сведения для контактов;
- Фотографии всех авторов статьи.

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется.

Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter. Текст статьи набирается через полтора интервала на странице формата А4; слева должно быть поле 2 см; страницы нумеруются, «красная строка» обязательна.

Все буквенные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисуночном тексте. Недопустимы отличия в обо-

значениях на рисунках и в тексте. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в тексте.

Непосредственно в тексте набираются простые формулы (например, m^2 ; n^2t , $C = 1 + DDF - A_2$), греческие буквы и символы, например, β , $\odot$ — шрифтом Symbol. То, что невозможно набрать непосредственно в текстовом редакторе, — с использованием редактора формул Microsoft Equation (входящего в комплект поставки Microsoft Office) или редактора формул Mathtype.

Не допускается представление текста, в котором формулы представлены в виде изображения. Фотографии и рисунки к статьям предоставляются отдельными файлами с расширением TIF, или EPS или JPEG с разрешением не менее 300 dpi.

Список использованной литературы составляется в порядке цитирования и дается в конце статьи. Ссылки на литературу в тексте отмечаются порядковыми цифрами в квадратных скобках.

Вниманию авторов, публикующихся в журналах IDT Publishers.

Представленная информация о каждом авторе помимо журнала будет размещаться на сайте techizdat.ru в разделе «Авторы» на отдельной интернет-странице.

Авторам также предоставляется возможность при публикации своих статей направить в редакцию свою электронную фотографию и дополнительные материалы для размещения их на этой индивидуальной Интернет-визитке. По своему усмотрению автор может рассказать более подробно о себе, об интересных примерах и историях решения технических проблем, о современных задачах — в соответствии с тематикой соответствующего журнала — и т.п. Желательный объем этого материала — не более 1000 знаков с пробелами.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

Подписаться на журнал можно:

- Через агентство «Роспечать» — индекс 81733;

- По каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» — индекс 11804;

- Через редакцию на любой срок
тел.: 8 (495) 967-77-05
e-mail: dependability@bk.ru

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



www.vniias.ru