

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 физико-математических наук, главный эксперт по надежности, эксплуатационной готовности, ремонту-пригодности и безопасности, TÜV Rheinland InterTraffic (Кёльн, Германия)

Ястребенецкий Михаил Анисимович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного научно-технического центра ядерной и радиационной безопасности (Харьков, Украина)

Ответственный секретарь:

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

Технический редактор:

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

Председатель редакционного совета:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, Генеральный директор АО «НИИАС» (Москва, Россия)

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 проблеме безопасности (Москва, Россия)

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 «Системы управления и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ) (Россия, Москва)

Бочков Александр Владимирович – кандидат технических наук, заместитель директора центра анализа рисков Научно-исследовательского института экономики и организации управления в газовой промышленности, ООО «НИИгазэкономика» (Москва, Россия)

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, старший советник генерального директора ОАО «РЖД» (Москва, Россия)

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

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

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

Кришнамурти Ачутха – 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» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (Москва, Россия)

Нетес Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) (Москва, Россия)

Папик Любиш Р. – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надёжностью (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, Россия)

Уткин Лев Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Юркевич Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

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.

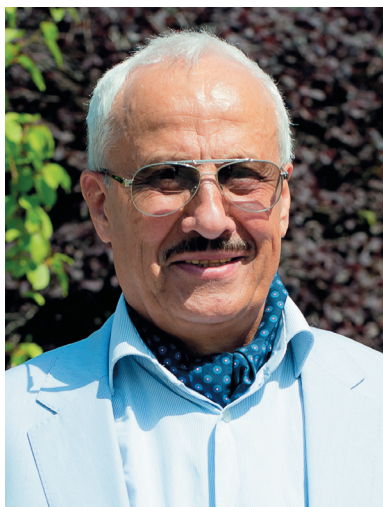
Подписано в печать 28.02.2018
Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60х90/8, Бумага глянец

Статьи рецензируются.
Статьи опубликованы в авторской редакции.
Мнение членов редакционного совета может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций.
Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Рукописи не возвращаются.

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	3
<i>Структурная надежность. Теория и практика</i>	
Антонов А.В., Галивец Е.Ю., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Анализ дерева отказов в среде программирования R	4
Сороколетов Е.П., Войнов К.Н. Представление суперпозиции двух технических систем с помощью центра тяжести функции плотности распределения	14
Кривопалов Д.М., Юркевич Е.В. Матричная форма функций вероятностей безотказной работы систем с ненагруженным резервированием (ч.2)	20
Тарарычкин И.А. Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры	26
<i>Функциональная надежность. Теория и практика</i>	
Плотников Н.И. Основные определения надежности представителей интенсивных профессий	32
Ариничева О.В., Герасименкова А.Е., Малишевский А.В., Чепик М.Г. Возможные пути повышения надежности профессионального психологического отбора диспетчеров управления воздушным движением	38
<i>Функциональная безопасность. Теория и практика</i>	
Шебе Х. Формирование системы с более высоким уровнем полноты безопасности из компонентов с недостаточным уровнем полноты безопасности	46
Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Новожилов Е.О. Функциональная зависимость между количеством вагонов в сходе из-за неисправностей вагонов или пути и факторами движения	53
Гнеденко –Форум	61



Уважаемые коллеги!

Тематика надежности технических систем находится в центре внимания специалистов в течение многих десятилетий. Ее актуальность возрастает с миниатюризацией элементов, с увеличением их количества в системе. Наряду со структурной надежностью, которая оперирует только процессами отказов и восстановлений технических средств, большое значение в развитии общей надежности приобретает функциональная надежность. Методология функциональной надежности ориентирована на оценки безошибочности выполнения технологических процессов. Эта методология учитывает алгоритмы выполняемых в системе задач, она предназна-

чена для оценки влияния ошибок операторов, программных и сбойных ошибок, ошибок данных на результаты выполняемых в системе задач.

Надежность технических систем находится в непосредственной связи с их функциональной безопасностью. Поток опасных отказов в работе системы может рассматриваться как многократно разреженный случайным образом поток отказов составных технических средств. Опасные отказы могут привести к критическим и даже к катастрофическим последствиям в работе системы. Поэтому проблематика технологических, технических и техносферных рисков сопутствует проблематике функциональной безопасности и надежности технических систем. Серьезные негативные последствия в работе технических систем могут быть вызваны информационными атаками. Сочетание функциональной и информационной безопасности находится в сфере интересов общей надежности, которую отражает журнал «Надежность».

Журнал «Надежность (Dependability)» непрерывно развивается – в состав редакционного совета вошли крупные ученые России, Украины, Белоруссии, Индии, Израиля, Сербии, повышается рейтинг журнала за рубежом. Ряд наших авторов практикует ссылаться на опубликованные в нашем журнале статьи, приводит в своих работах обширный перечень ссылок на зарубежные публикации. Эта практика способствует росту индекса цитируемости журнала и включению его в международные информационные базы, такие, например, как Scopus.

Желаю всем нашим авторам больших творческих успехов, здоровья и удовлетворения результатами своей работы.

Анализ дерева отказов в среде программирования R

Александр В. Антонов, АО РАСУ, Москва, Россия

Евгений Ю. Галивец, АО РАСУ, Москва, Россия

Валерий А. Чепурко, АО РАСУ, Москва, Россия

Алексей Н. Черняев, АО РАСУ, Москва, Россия



Александр В. Антонов



Евгений Ю. Галивец



Валерий А. Чепурко



Алексей Н. Черняев

Аннотация. Цель. Анализ дерева отказов (АДО) – это один из основных методов анализа надежности сложных технических систем. Для его проведения часто применяются коммерческие программные средства, такие как Saphire, Risk Spectrum, Арбитр и т.д. Каждый из них обладает как определенными преимуществами, так и отдельными недостатками. Необходимо отметить, что основная цель вышеуказанных программных средств состоит в проведении качественного анализа дерева отказов. При этом в качестве дополнительных возможностей программного комплекса предлагается ряд статистических методов, позволяющих, в частности, проводить анализ неопределенностей, получать интервальные оценки показателей, выполнять прочие статистические исследования. Набор таких процедур невелик и жестко регламентирован некоторым множеством предлагаемых распределений и функций. В данной работе рассмотрим возможность решения задачи анализа дерева отказов с помощью средств языка программирования R. Язык программирования R, в первую очередь, создавался и продолжает совершенствоваться как средство статистической обработки данных. АДО в этой среде всего лишь один из 10 с лишним тысяч пакетов. Т.е., если проводить сравнение с коммерческими пакетами, направленность которых состоит в АДО, R ставит перед собой гораздо более масштабные цели и обладает возможностями проведения существенно более качественного анализа. При этом несомненное преимущество R – это свободно распространяемая среда с открытым программным кодом. Цель данной статьи состоит в представлении небольшого числа основных процедур пакета FaultTree языка R, позволяющих проводить АДО: построение дерева отказов и его графический вывод, расчет вероятностей по узлам и нахождение минимальных сечений. **Методы.** Для выполнения расчетов и демонстрации возможностей АДО применялись скрипты пакета FaultTree языка программирования R. **Выводы.** В статье подробно разобраны три примера. Вначале рассчитывается дерево по известным вероятностям, затем определяется функция распределения наработки до отказа технической системы. В последнем примере выполняется АДО для систем с элементами, которые описываются различными моделями функционирования и обслуживания. В заключительной части статьи предполагается описание возможностей АДО в среде R позволяющих учитывать, к примеру, отказы по общей причине.

Ключевые слова: дерево отказов, анализ дерева отказов, коэффициент неготовности, явные отказы, скрытые отказы, средняя наработка на отказ.

Формат цитирования: Антонов А.В., Галивец Е.Ю., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Анализ дерева отказов в среде программирования R // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 4-13. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-4-13

Введение

R – язык программирования для статистической обработки данных и работы с графикой, а также свободная программная среда вычислений с открытым исходным кодом, разработанный в рамках проекта GNU. Изначально R был разработан сотрудниками статистического факультета Оклендского университета Россом Айхэкой (англ. Ross Ihaka) и Робертом Джентлменом (англ. Robert Gentleman) (первая буква их имён – R). Язык и среда программирования поддерживаются и развиваются организацией R Foundation. В 2010 году R вошёл в список победителей конкурса журнала Infoworld в номинации на лучшее открытое программное обеспечение для разработки приложений.

R поддерживает широкий спектр статистических и численных методов и обладает хорошей расширяемо-

стью с помощью пакетов. Пакеты представляют собой библиотеки для работы специфических функций и подпрограмм или специальных областей применения. Пакет – это набор функций, файлов со справочной информацией и примерами, собранных вместе в одном архиве, используемом как дополнительное расширение на базе R. R является языком программирования, благодаря чему можно писать собственные программы – скрипты, а также использовать и создавать собственные специализированные расширения – пакеты.

Для удобства работы с R разработан ряд графических интерфейсов, таких как RStudio, JGR и т.д. R можно использовать как простой калькулятор, можно редактировать в нем таблицы с данными, можно проводить простые статистические анализы (например, t-тест, ANOVA или регрессионный анализ) и более сложные длительные вычисления, проверять гипотезы, строить

графики в векторном формате. Это далеко не полный перечень того, что позволяет реализовывать описываемая среда.

Эта статья посвящена пакету «создания, вычисления и вывода» деревьев отказов – пакету FaultTree. Автором пакета является David J. Silkworth, сопровождающий (maintainer) Jacob T. Ormerod. FaultTree предоставляет набор функций для построения древовидных структур в качестве объектов Dataframe. Дерево отказов включает в себя логические узлы (в первую очередь «И» и «ИЛИ»), которые обрабатывают входные данные и могут направлять вывод «вверх» через древовидную структуру.

Метод анализа дерева отказов (fault tree analysis, FTA) впервые был использован компанией Bell Labs для Военно-воздушных сил США в 1962 году. На сегодняшний день FTA получил широкое распространение для анализа отказов статических систем.

АДО, или в английской терминологии FTA – метод анализа отказов сложных систем, в котором нежелательные состояния или отказы системы анализируются с помощью методов булевой алгебры, объединяя последовательность нижестоящих событий (отказов низшего уровня), которые приводят к отказу всей системы. Анализ дерева отказов интенсивно используется в различных отраслях для проведения расчетов надежности технической системы, для выявления наиболее ненадежных элементов, подверженных частым отказам. При этом определяются цепочки случайных событий, при которых система может выйти из строя, выявляются способы уменьшения рисков и определяются частоты системных отказов. Анализ дерева отказов эффективно используется в аэрокосмической отрасли, атомной энергетике, химической и перерабатывающих отраслях, в фармацевтической, нефтехимической и других, связанных с высокой степенью риска.

FaultTree – один из огромного количества пакетов языка R, среди которых большинство связано с качественной статистической обработкой, с легким применением различных вероятностных распределений. Такая насыщенность и вместе с тем гибкость языка вкупе с простотой создания скриптов делает его достаточно интересным решением для проведения не только АДО, но и некоторых дополнительных исследований, которые невозможны в известных программных продуктах. В приведенном ниже втором примере рассматривается способ проведения АДО с возможностью динамического исследования поведения объекта анализа, когда вероятности событий являются функциями времени. Эта возможность позволяет получать не просто статическую (на определенный момент времени) оценку вероятности отказа системы, а некоторую временную зависимость вероятности отказа, позволяющую, к примеру, обоснованно подходить к определению остаточного ресурса системы не ограничиваясь показательными распределениями. При этом в качестве исходных распределений элементов системы могут быть не только стандартные

законы, но и, что выгодно отличает язык R, непараметрические оценки распределений.

Рассмотрим некоторые основные возможности пакета FaultTree.

Расчет дерева отказов по известным вероятностям событий

Для примера рассчитаем с помощью R вероятность отказа следующей цепи, состоящей из 8 элементов, каждый из которых относится к типу невосстанавливаемых объектов и имеет определенную вероятность отказа (см. рис. 1 и табл. 1).

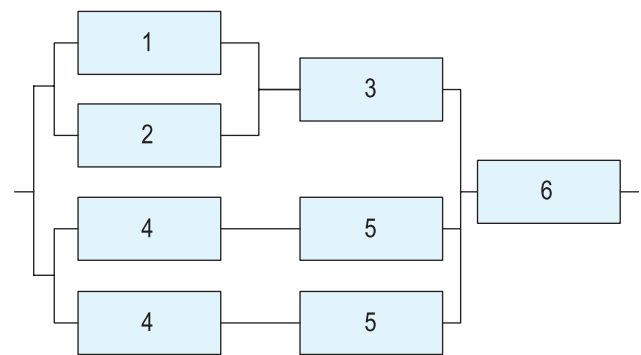


Рисунок 1 – Схема цепи

Таблица 1. Вероятности отказов элементов цепи.

Элемент	1	2	3	4	5	6
q_i	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06

Заметим, что последовательная цепь 4-5 однократно резервируется, т.е. в нижней части схемы присутствует два параллельно соединенных участка 4-5.

Для проведения расчета схемы вначале необходимо подключить пакет FaultTree. Это можно сделать, как минимум, двумя способами: непосредственно подключив данный пакет в среде RStudio либо набрав в создаваемом скрипте команду:

```
library(FaultTree).
```

Затем необходимо создать дерево вызовом скрипта `ftree.make`, который имеет несколько аргументов, наиболее важным из которых является тип создаваемого дерева, вернее, тип верхнего вентиля в дереве отказов. В современной версии библиотеки FaultTree реализовано два основных типа вентиля: «ог» («или») и «и» («и»). Обратим внимание на рис. 1. Цепь представляет собой последовательное соединение элемента 6 и сложной «подцепи» 1-5, состоящей из элементов 1, 2, ..., 5. Следовательно, отказ цепи будет происходить в том случае, если откажет или 6 или подцепь 1-5 (или произойдут оба события сразу). Поэтому необходимо выбрать тип верхнего вентиля «ог»:

```
1. Tree1 <- ftree.make(type="ог", name="Пример 1.
Расчет", name2="по вероятностям").
```

В этой строке скрипта создается структура данных (dataframe) – дерево отказов с именем (идентификатором) Tree1, по сути являющееся вентиляем типа «ог». При графическом выводе дерева событий этот вентиль будет назван «Пример 1. Расчет по вероятностям» (см. рис. 2). В силу того, что существует ограничение на количество символов в названии, длинные названия иногда приходится разбивать на две строки «name» и «name2». Верхнему вентилю будет присвоен номер 1 (красная цифра внутри вентиля). Заметим, что нумерация строк скрипта приведена только для удобства проведения комментариев в статье и в синтаксисе языка R не используется.

Пример 1. Расчет по вероятностям



Рисунок 2 – Первый этап построения дерева отказов. Верхний вентиль цепи

Следующий этап состоит в добавлении к вентилю 1 двух структур: события – «отказ 6 элемента» и вентиля «and», который будет верхним вентиляем по отношению к структуре 1–5. Выбор такого типа вентиля обусловлен тем, что структура 1–5 отказывает в том случае, когда отказывают одновременно каналы «1–3» и оба канала «4, 5». Таким образом, следующими командами скрипта будут:

```
2. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=1, prob=.06, name=»Отказ 6«),
```

```
3. Tree1 <- addLogic(Tree1, at=1, type= "and", name=»Отказ 1-3«,name2=»и (4-5)*2«).
```

В первой строке к вентилю 1 добавляется событие – «отказ 6 элемента». Разберем подробно аргументы подпрограммы addProbability. Первый аргумент – идентификатор дерева, к которому будет достраиваться событие. Второй аргумент «at» указывает номер родительского узла дерева Tree1, к которому будет добавляться данная структура. Третий аргумент задает численное значение вероятности отказа. Четвертый аргумент, как и прежде, является названием события. Обратим внимание на то, что аргументы любых подпрограмм в языке R перестановочны и не обязаны подчиняться определенному порядку. Однако с точки зрения отладки программы и упрощения поиска ошибок целесообразно придерживаться определенного порядка следования аргументов. Во второй приведенной выше строке к вентилю 1 дерева Tree1 добавляется вентиль «and», который будет конъюнкцией отказов канала «1–3» и обоих каналов «4, 5».

Для проверки выстраиваемого дерева отказов имеет смысл вначале набросать черновик будущего дерева отказов, а затем время от времени проверять соответ-

ствие получаемого дерева эскизу. Для графического вывода дерева пакет FaultTree предлагает использовать скрипт ftree2html, который, очевидно, создает картинку в формате html:

```
4. ftree2html(Tree1, write_file=TRUE),
5. browseURL("Tree1.html").
```

Первый аргумент подпрограммы ftree2html – это идентификатор выводимого дерева отказов, второй аргумент указывает, что файл будет перезаписываться при каждой следующей прогонке. Подпрограмма browseURL позволяет просмотреть построенное дерево с помощью некоторого браузера, который вызывается по умолчанию средой R. На рис. 3 изображено построенное дерево отказов с двумя добавленными структурами.

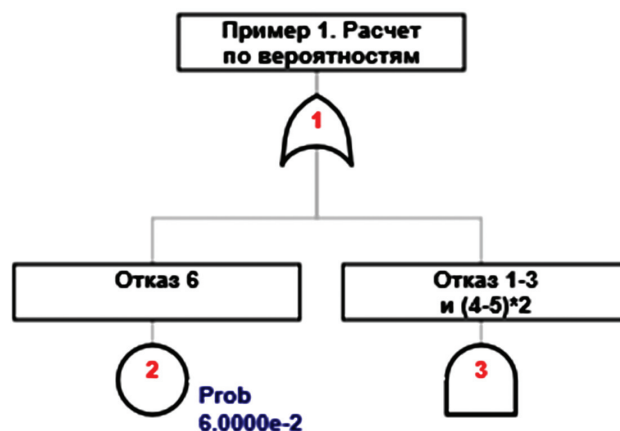


Рисунок 3 – Второй этап построения дерева отказов

Заметим, что простому событию «отказ 6 элемента» и вентилю «and» автоматически присвоены номера 2 и 3 соответственно. При перестановке строк скрипта важно контролировать присвоенные номера и помнить, что перестановка строк может привести к смене номеров событий и возможному появлению ошибки в коде программы.

Рядом с событием «отказ 6 элемента» приведено численное значение вероятности этого события. При этом два других вентиля изображены без указания вероятности события.

На рис. 4 приведен окончательный вариант дерева событий с рассчитанными вероятностями каждого узла дерева.

Полный вариант скрипта построения такого дерева приведен ниже.

Пример 1.

```
1. library(FaultTree)
2. Tree1 <- ftree.make(type="or", name="Пример 1.
Расчет", name2=»по вероятностям«)
3. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=1, prob=.06,
name=»Отказ 6«)
4. Tree1 <- addLogic(Tree1, at=1, type= "and",
name=»Отказ 1-3«,name2=»и (4-5)*2«)
```

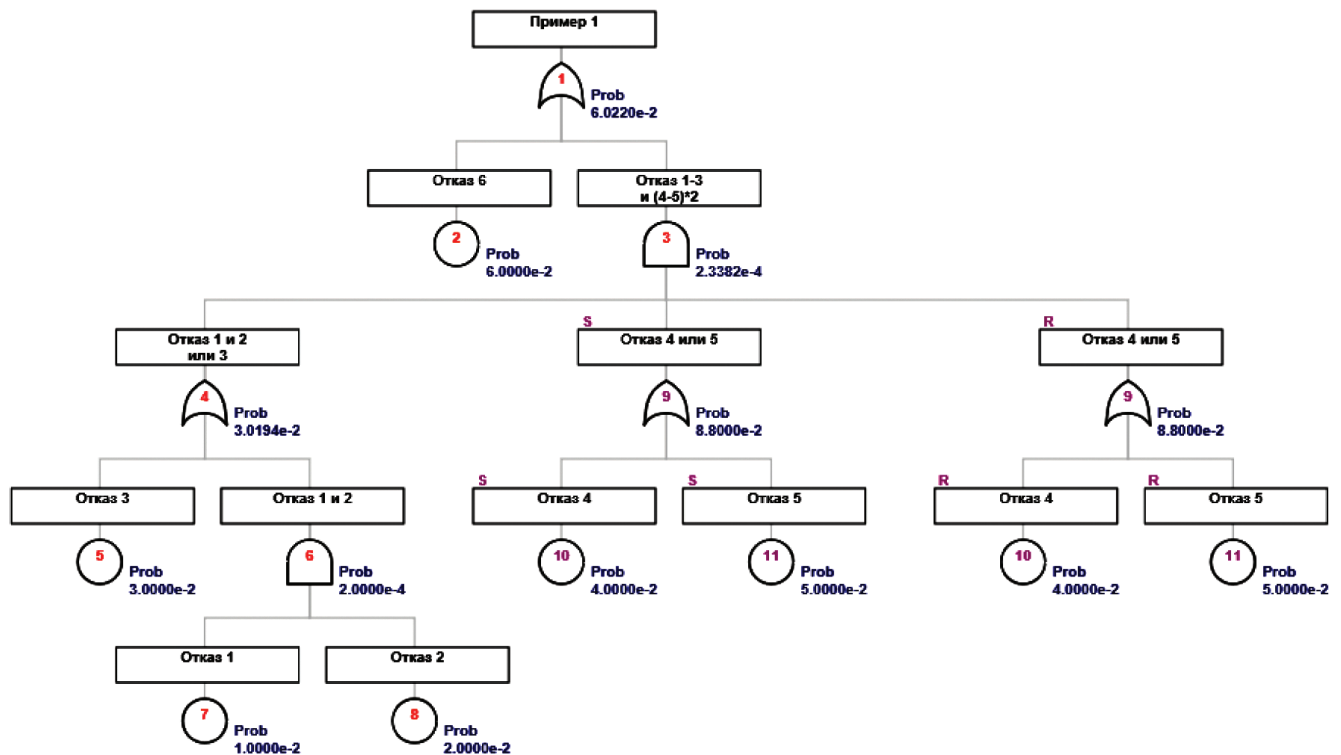


Рисунок 4 – Окончательный вид дерева отказов с расчетами вероятностей по узлам

```

5. Tree1 <- addLogic(Tree1, at=3, type= "or",
name="Отказ 1 и 2»,name2=»или 3»)
6. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=4, prob=.03,
name="Отказ 3»)
7. Tree1 <- addLogic(Tree1, at=4, type= "and",
name="Отказ 1 и 2»)
8. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=6, prob=.01,
name="Отказ 1»)
9. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=6, prob=.02,
name="Отказ 2»)
10. Tree1 <- addLogic(Tree1, at=3, type= "or",
name="Отказ 4 или 5»)
11. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=9, prob=.04,
name="Отказ 4»)
12. Tree1 <- addProbability(Tree1, at=9, prob=.05,
name="Отказ 5»)
13. Tree1 <- addDuplicate(Tree1, at=3, dup_id=9)
14. Tree1 <- ftree.calc(Tree1)
15. ftree2html(Tree1, write_file=TRUE)
16. browseURL("Tree1.html")

```

Обратим внимание на 13-ю строку. В библиотеке FaultTree реализована достаточно удобная функция, позволяющая дублировать как повторяющиеся события, так и целые структуры данных – ветви событий. Поскольку в нашей цепи канал 4–5 был продублирован, имело смысл воспользоваться функцией добавления повторной структуры – `addDuplicate(Tree1, at=3, dup_id=9)`. Первый аргумент этой функции, как и прежде, является идентификатором достраиваемого дерева, `at=3` указывает номер узла дерева, к которому будет до-

бавляться повторная структура данных, `dup_id=9` – это верхний узел добавляемой структуры данных. На рис. 4 буквами S и R обозначены ветвь-источник (Source) и повторяющаяся ветвь (Repeat) соответственно. После завершения процедуры построения дерева отказов вызывается подпрограмма `ftree.calc(Tree1)`, которая производит расчет вероятности отказа каждого узла дерева согласно известным методам расчета вероятности путем преобразования логических зависимостей.

Далее рассмотрим возможность определения вероятности отказа невосстанавливаемой цепи в зависимости от времени.

Расчет функции распределения наработки до отказа цепи

Анализ предыдущего скрипта позволяет сделать предположение, что вероятности не обязательно задавать фиксированными числами, т.е. вполне возможно сделать их зависящими от времени. Для этого необходимо пересчитывать внутри временного цикла вероятности каждого элементарного события и там же, внутри цикла, производить расчет дерева отказов, вычисляя вероятность отказа цепи.

При этом для определения динамики изменения вероятности отказа (по сути, функции распределения наработки до отказа элемента цепи) разумно предположить три различных подхода параметрический, непараметрический и комбинированный.

В первом случае наработка до отказа каждого элемента цепи задается посредством какого-либо параметриче-

ского закона распределения с определенным набором параметров. Заметим, что в языке R, предназначенном для «статистической обработки данных» [1-3], достаточно богато представлены различные законы распределения случайных величин.

Второй подход заключается в нахождении непараметрической оценки функции распределения наработки до отказа каждого элемента цепи. Если у исследователя имеется статистическая информация, которая содержит полные наработки до отказа (эксперимент завершился отказом каждого проверяемого образца), то достаточно оценить эмпирическую функцию распределения. Для этого в R предусмотрена функция `ecdf()`. При наличии цензурированной информации можно предложить использовать оценку Каплана-Мейера, скрипт которой также содержится в пакетах языка R, связанных с анализом долговечности. Можно использовать ядерные оценки функции распределения.

Третий подход заключается в комбинированном применении первого (параметрического) и второго (непараметрического) подхода, когда исходная информация неоднородна, т.е. имеется как статистическая информация, так и параметрическая оценка закона распределения. В теории надежности большое применение получил экспоненциальный закон распределения наработки до отказа, при этом интенсивность отказов оценивается по результатам статистических испытаний. Для этого распределения наиболее проработаны методы оценивания.

В данной статье мы не будем поднимать вопрос, что лучше – параметризация распределения или же непараметрический подход. На наш взгляд достаточно использовать всю информацию по максимуму, не делая при этом необоснованных выводов о законе распределения.

Разберем пример нахождения функции распределения наработки до отказа структуры. Приведем вначале скрипт, а затем разберем его.

Пример 2.

```
1. library(FaultTree)
2. T=50
3. h=1
4. c1="green4"
5. c2="red2"
6. c3="blue2"
7. t=seq(h,T,h)
8. n=length(t)
9. p1=pexp(t,0.01)
10. p2=pexp(t,0.02)
11. p3=pexp(t,0.03)
12. p4=pexp(t,0.04)
13. p5=pexp(t,0.05)
14. p6=pgamma(t,3,0.06)
15. p0=array(dim=n)
16. p7=array(dim=n)
17. TreePBF<-function(p1,p2,p3,p4,p5,p6){
18. Tree2 <- ftree.make(type="or", name="Пример 2.
    Расчет", name2="по вероятностям")
```

```
19. Tree2 <- addProbability(Tree2, at=1, prob=p6,
    name="Отказ 6")
20. Tree2 <- addLogic(Tree2, at=1, type="and",
    name="Отказ 1-3",name2="и (4-5)*2")
21. Tree2 <- addLogic(Tree2, at=3, type="or",
    name="Отказ 1 и 2",name2="или 3")
22. Tree2 <- addProbability(Tree2, at=4, prob=p3,
    name="Отказ 3")
23. Tree2 <- addLogic(Tree2, at=4, type="and",
    name="Отказ 1 и 2")
24. Tree2 <- addProbability(Tree2, at=6, prob=p1,
    name="Отказ 1")
25. Tree2 <- addProbability(Tree2, at=6, prob=p2,
    name="Отказ 2")
26. Tree2 <- addLogic(Tree2, at=3, type="or",
    name="Отказ 4 или 5")
27. Tree2 <- addProbability(Tree2, at=9, prob=p4,
    name="Отказ 4")
28. Tree2 <- addProbability(Tree2, at=9, prob=p5,
    name="Отказ 5")
29. Tree2 <- addDuplicate(Tree2, at=3, dup_id=9)
30. Tree2 <- ftree.calc(Tree2)
31. return(Tree2$PBF)
32. }
33. for (i in 1:n){
34. q=TreePBF(p1[i],p2[i],p3[i],p4[i],p5[i],p6[i])
35. p0[i]=q[1]
36. p7[i]=q[3]
37. }
38. plot(t,p0,type="l",lwd=2,col=c1,ylab="")
39. lines(t,p6,type="l",lwd=2,lty=2,col=c2)
40. lines(t,p7,type="l",lwd=2,lty=3,col=c3)
41. legend(locator(1), c(expression (F(t)), expression
    (F[6](t)), expression (F[1-5](t))),
42. col = c(c1, c2, c3),
43. lty = c(1, 2, 3),
44. lwd = c(2, 2, 2))
```

В первой строке, как и ранее, подключается библиотека `FaultTree`. Во 2-й и 3-й строках задаются максимальное время T и шаг сетки h на временной оси, с которым будут определяться функции распределения. В 4-6 строках указаны цвета выводимых графиков (см. рис. 5). Заметим, что способов задания цвета в R несколько и цветовая палитра богата. Качество применяемой векторной графики неоспоримо, причем, имеется возможность сохранения рисунков в различных форматах.

В 7-й строке создается числовой «временной» массив:

$$\vec{t} = (h, 2h, \dots, T) = (1, 2, \dots, 50).$$

В 8-й строке определяется длина этого массива $n=50$.

В 9-й – 14-й строках строятся массивы функций распределения наработки до отказа каждого элемента цепи (см. рис. 1). Так, наработка до отказа первого элемента имеет показательное распределение с интенсивностью $\lambda=0,01$. Интенсивность в языке R определена термином

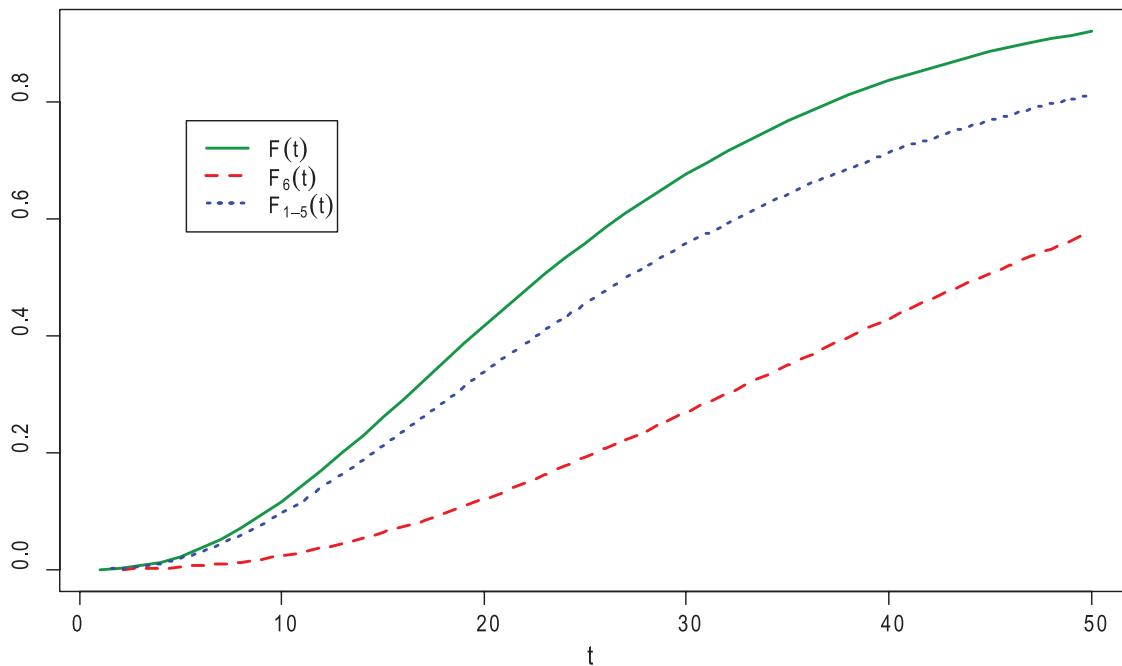


Рисунок 5 – Функции распределения цепи и ее компонентов

rate, параметр масштаба – scale, таким образом, $\lambda = \text{rate} = 1/\text{scale}$. Для второго элемента интенсивность равна 0,02, для третьего – 0,03 и т.д. Функция распределения наработки до отказа 6-го элемента соответствует гамма-распределению с параметром формы 3 и интенсивностью $\lambda = 0,06$.

В 15-й, 16-й строках создаются вспомогательные массивы размерности $n=50$. В массиве `r0` будут храниться значения функции распределения наработки до отказа всей цепи, а в массиве `r7`, к примеру, наработки до отказа участка цепи 1-5.

Строки с 17-й по 32-ю содержат функцию, вычисляющую массив вероятностей узлов дерева отказов. Входными параметрами являются шесть вероятностей отказов. Обратим внимание на 31-ю строку. Структура данных `Ttree2` содержит множество различных факторов, в этом можно убедиться, набрав в командной строке команду `Ttree2`. Так фактор `PBF` содержит рассчитанные вероятности отказов каждого узла дерева (см. рис. 4). Таким образом, `Ttree2$PBF` будет массивом вероятностей. Строки 33-37 содержат обычный цикл, в котором временной сетке с шагом $h=1$ будет рассчитываться дерево отказов. При этом внутри цикла будет производиться расчет вероятностей отказа каждого элемента структуры на той же временной сетке. В массиве `q` будут содержаться все рассчитанные вероятности. Отказу всей цепи соответствует узел 1, отказу части цепи 1-5 – узел 3, поэтому `q[1]` и `q[3]` будут вероятностями отказа всей цепи и ее участка 1-5 соответственно. В 38-й – 44-й строках осуществляется графический вывод полученных результатов см. рис. 5.

Достоинство языка R состоит в возможности построения как параметрических, так и непараметрических доверительных интервалов для вероятности отказа структуры. Для этого в параметрическом случае

необходимо в качестве параметров закона брать такие значения из доверительной области, которые обеспечивают наибольшее и наименьшее значение вероятности отказа. В непараметрическом случае необходимо будет подставлять нижнюю и верхнюю оценки функции распределения по Клопперу-Пирсону или их приближения, в частности, с помощью квантилей стандартного нормального закона. Для определения интервальной оценки вероятности отказа структуры потребуется незначительная модификация скрипта.

В следующем разделе статьи рассмотрим более важную, на наш взгляд, ситуацию, связанную с возможностью проведения расчетов для восстанавливаемого, а также, периодически обслуживаемого оборудования.

Расчет коэффициента неготовности структуры с восстанавливаемыми элементами

Рассмотрим следующую схему см. рис. 6.

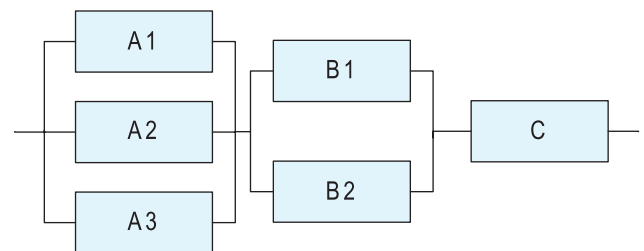


Рисунок 6 – Схема системы

Будем предполагать, что элементы цепи A1, A2, A3 идентичны и эксплуатируются в одинаковых условиях, такие же предположения касаются элементов B1, B2.

Все элементы цепи восстанавливаемы. Время восстановления $T_r=8$ час. и не зависит от количества восстанавливаемых элементов. Кроме этого, предположим, что в системе имеет место встроенная диагностика и элементы цепи находятся под контролем. В результате, с помощью диагностики удастся обнаружить 90% отказов. В системе периодически проводится техническое обслуживание (профилактика) с периодом $\tau=100$ час, в ходе которой обнаруживается 10% остающихся «скрытых» отказов. Будем считать, что средняя наработка элементов А составляет $T_f(A)=1000$ час., средняя наработка элементов В – $T_f(B)=1500$ час, элемента С – $T_f(C)=4000$ час. Отказами по общей причине (ООП) будем пренебрегать.

Для расчета коэффициента неготовности по причине явных отказов в библиотеке FaultTree предусмотрен скрипт `addActive(DF, at, mttf, mtr, name)`, в котором DF – имя дерева отказов, at – узел дерева, к которому «крепится» данное событие, mttf – средняя наработка до отказа, mtr – среднее время восстановления, name – название события в дереве отказов. При расчете вероятности отказа в данном случае используется неасимптотический коэффициент неготовности [4-7]:

$$q = \frac{T_r}{T_r + T_f}, \quad (1)$$

где $T_r = mtr$ – среднее время восстановления, $T_f = mttf$ – средняя наработка до отказа.

Для расчета коэффициента неготовности по причине скрытых отказов в библиотеке FaultTree предусмотрена функция `addLatent(DF, at, mttf, mtr, inspect, pzero, name)`, в аргументах которой DF – имя дерева отказов, at – узел дерева, к которому крепится данное событие, mttf – средняя наработка до отказа, mtr – среднее время восстановления, inspect – период контроля, pzero – необязательный аргумент, равный вероятности того, что в случайный момент времени элемент восстанавливается. По умолчанию $pzero=q$ – асимптотическому коэффициенту неготовности (1). Аргумент name, как и ранее, название события в дереве отказов. При расчете вероятности отказа в данном случае используется приближенная формула

$$q = 1 - (1 - pzero) \cdot (1 - K_{не}), \quad (2)$$

где по умолчанию $pzero = \frac{T_r}{T_r + T_f}$, $T_r = mtr$ – среднее время восстановления, $T_f = mttf$ – средняя наработка до отказа, $K_{не} = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda\tau} = 1 + \frac{e^{-\lambda\tau} - 1}{\lambda\tau}$ – асимптотический коэффициент неготовности для периодически контролируемого элемента с мгновенным восстановлением [6].

Скрипт программы будет выглядеть следующим образом.

Пример 3.

```
1. library(FaultTree)
2. Tree3 <- ftree.make(type="or", name="Пример 3»)
3. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=1, type="or",
  name="Отказ С»)
4. Tree3 <- addLatent(Tree3, at=2, mttf=4000/0.1, mtr=
  =8, inspect=100, name="скрытый»)
5. Tree3 <- addActive(Tree3, at=2,
  mttf=4000/0.9, mtr=8, name="явный»)
6. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=1, type="and",
  name="Отказ B1,B2»)
7. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=5, type="or",
  name="Отказ B»)
8. Tree3 <- addLatent(Tree3, at=6, mttf=1500/0.1, mtr=
  =8, inspect=100, name="скрытый»)
9. Tree3 <- addActive(Tree3, at=6,
  mttf=1500/0.9, mtr=8, name="явный»)
10. #Tree3 <- addDuplicate(Tree3, at=5, dup_id=6)
11. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=5, type="or",
  name="Отказ B»)
12. Tree3 <- addLatent(Tree3, at=9, mttf=1500/0.1, mtr=
  =8, inspect=100, name="скрытый»)
13. Tree3 <- addActive(Tree3, at=9,
  mttf=1500/0.9, mtr=8, name="явный»)
14. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=1, type="and",
  name="Отказ A1,A2,A3»)
15. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=12, type="or",
  name="Отказ A»)
16. Tree3 <- addLatent(Tree3, at=13, mttf=1000/0.1, mtr=
  =8, inspect=100, name="скрытый»)
17. Tree3 <- addActive(Tree3, at=13,
  mttf=1000/0.9, mtr=8, name="явный»)
18. #Tree3 <- addDuplicate(Tree3, at=12, dup_id=13)
19. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=12, type="or",
  name="Отказ A»)
20. Tree3 <- addLatent(Tree3, at=16, mttf=1000/0.1, mtr=
  =8, inspect=100, name="скрытый»)
21. Tree3 <- addActive(Tree3, at=16,
  mttf=1000/0.9, mtr=8, name="явный»)
22. #Tree3 <- addDuplicate(Tree3, at=12, dup_id=13)
23. Tree3 <- addLogic(Tree3, at=12, type="or",
  name="Отказ A»)
24. Tree3 <- addLatent(Tree3, at=19, mttf=1000/0.1, mtr=
  =8, inspect=100, name="скрытый»)
25. Tree3 <- addActive(Tree3, at=19,
  mttf=1000/0.9, mtr=8, name="явный»)
26. Tree3 <- ftree.calc(Tree3)
27. Tree3_cs <- cutsets(Tree3)
28. ftree2html(Tree3, write_file=TRUE)
29. browseURL("Tree3.html")
```

Заметим, что явные и скрытые отказы одного и того же элемента связаны логическим элементом «ог», в то время, как их следовало бы связать взаимоисключающим «или» – «хор». В текущей версии пакета такой логический элемент пока отсутствует. Однако применение обычного «ог» в данной ситуации приведет к незначительной ошибке.

Обратим также внимание на то, что в 4-й строке у функции addLatent аргумент mttf=4000/0.1, в пятой же строке у функции addActive аргумент mttf=4000/0.9. Это связано с предположением о том, что 90% отказов составляют явные и 10%– скрытые отказы, т.е.

$$\lambda = \lambda_{\text{явн}} + \lambda_{\text{скр}}, \lambda_{\text{явн}} = 0,9\lambda, \lambda_{\text{скр}} = 0,1\lambda.$$

При этом средние наработки до отказа явного и скрытого будут равны, соответственно:

$$T_{f,\text{явн}} = \frac{1}{\lambda_{\text{явн}}} = \frac{1}{0,9\lambda} = \frac{T_f}{0,9} \text{ и } T_{f,\text{скр}} = \frac{1}{\lambda_{\text{скр}}} = \frac{1}{0,1\lambda} = \frac{T_f}{0,1}. \quad (3)$$

Строки 10-я, 18-я и 22-я закоментированы. 10-я строка дублирует строки с 11-й по 13-ю, 18-я – с 19-й по 21-ю, и т.д. С точки зрения краткости скрипта, вариант с закоментированными строками предпочтительнее. Обратим внимание на 27 строку, в которой впервые представлена возможность построения минимальных сечений. Использование addDuplicate добавляет в дерево отказов узлы с уже имеющимися значениями и cutsets в таком случае в текущей версии пакета дает порою некорректные сечения. Поэтому, если предполагается анализ минимальных сечений, то лучше дублировать события путем повторения команд.

На рис. 7 представлено дерево отказов со «свернутыми» отказами элементов A1, A2, A3 в силу того, что полное дерево достаточно громоздко. Создаваемое дерево интерактивно и позволяет сворачивать ветви, в этом случае сложное событие выделяется голубым цветом.

Обратим внимание, что теперь рядом с узлами наряду с выводимой вероятностью отказа появилась дополнительная информация.

Fail Rate– интенсивность отказов, которая для узлов типа addLatent и addActive рассчитывается по формуле $\lambda_f = \frac{1}{T_f}$. Для логического узла «или», соответствующему

последовательной цепи, интенсивность отказов будет суммой интенсивностей нисходящих узлов, т.е. $\lambda_{f-s} = \lambda_{f,1} + \lambda_{f,2} + \dots$. Для логического элемента «и» применяется известная приближенная формула для средней наработки на отказ [11]:

$$T_{f-s} = \frac{K_r(p)}{\sum_{i=1}^n \lambda_{f-i} p_i \frac{\partial K_r(p)}{\partial p_i}}, \quad (4)$$

из которой следует $\lambda_{f-s} = \frac{1}{T_{f-s}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{f-i} p_i \frac{\partial K_r(p)}{\partial p_i}}{K_r(p)}$, где $K_r(p)$ – кворум-функция или коэффициент готовности структуры, λ_{f-i} – интенсивность отказов и ВБР i -го компонента сложной системы, состоящей из n элементов. Так, для $n=2$ легко получается

$$\lambda_{f-s} = \frac{\lambda_{f-1} p_1 (1-p_2) + \lambda_{f-2} p_2 (1-p_1)}{p_1 + p_2 - p_1 p_2}.$$

Repair time– время восстановления, которое для узлов типа addLatent и addActive задается пользователем. Для логического узла «и» в R время восстановления берется равным времени восстановления первого прикрепляемого узла. Для логического элемента «или» применяется аналогичная (4) формула для среднего времени восстановления [11]:

$$T_{R-s} = \frac{1 - K_r(p)}{\sum_{i=1}^n \lambda_{f-i} p_i \frac{\partial K_r(p)}{\partial p_i}} = \frac{1 - K_r(p)}{K_r(p) \sum_{i=1}^n \lambda_{f-i}}. \quad (5)$$

При этом в FaultTree коэффициент готовности рассчитывается по формуле

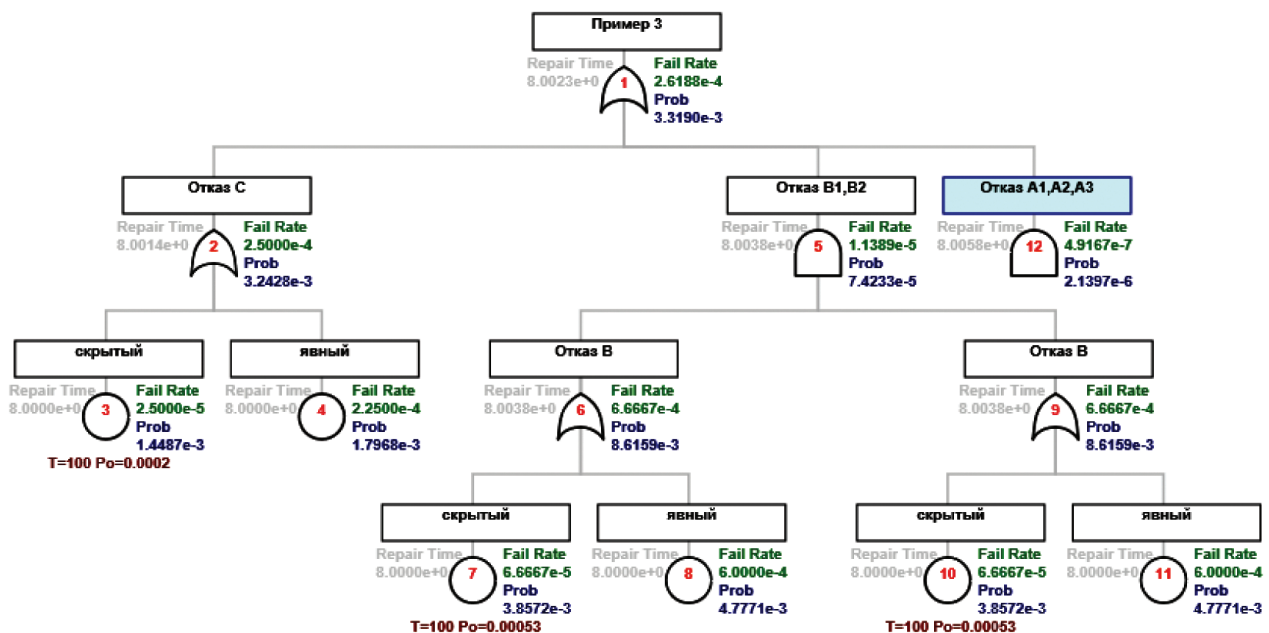


Рисунок 7 – Дерево отказов для примера 3

$$K_r = \prod_{i=1}^n \frac{T_{f-i}}{T_{f-i} + T_{R-i}}. \quad (6)$$

В формуле (6) не учитываются скрытые отказы. Вероятность скрытого отказа определяется по формуле (2).

Заметим, что на рис. 7 рядом с узлами, соответствующими скрытым отказам указан период контроля $T=100$ и значение вероятности, которая по умолчанию определяется формулой $p_{zero} = P_0 = \frac{T_r}{T_r + T_f}$.

Таким образом, в процессе вычисления получаем, что значение коэффициента неготовности цепи примера 3 составляет $3.319E-03$, интенсивность отказов $\lambda_{f-s} = 2.6188E-04$ 1/час, а средняя наработка на отказ $T_{f-s} = 1/\lambda_{f-s} = 1/Tree\$CFR = 3818.535$ час. Для нахождения последнего числа в командной строке необходимо набрать команду

```
> 1/Tree3$CFR[1]
```

Для определения минимальных сечений в командной строке необходимо набрать команду

```
> Tree3_cs
```

Минимальные сечения с одним событием, приводящим к отказу цепи, будут приведены в нижеследующей матрице [[1]]:

Матрица [[1]]:

3
4

Эта матрица содержит один столбец и две строки. Число столбцов равно числу узлов в сечении, т.е. единице, а число строк определяет количество минимальных сечений с одним событием, таких сечений два. Элементы матрицы – номера узлов, приводящих к отказу цепи. Так, в нашем случае, это узлы 3 и 4 – скрытый и явный отказ элемента С.

Минимальные сечения с двумя событиями приведены в матрице [[2]]. Эта матрица содержит два столбца и четыре строки. Минимальные сечения образуют: сочетание событий 7,10– скрытый отказ В1 и скрытый отказ В2, 7,11– скрытый отказ В1 и явный отказ В2 и т.д.

Матрица [[2]]:

7	10
7	11
8	10
8	11

В матрице [[3]] приведены различные сочетания из трех событий, приводящие к отказу цепи, очевидно эти события связаны с элементами А1, А2, А3.

Матрица [[3]]:

14	17	20
14	17	21
14	18	20
14	18	21
15	17	20
15	17	21
15	18	20
15	18	21

В специализированных пакетах, Sapphire, Арбитр и т.д. наряду с минимальными сечениями выводятся вероятности этих сечений и вклад в общую вероятность отказа системы. В пакете FaultTree такой возможности пока нет, но это вполне можно сделать самостоятельно, с помощью средств языка R. Например, с помощью такого скрипта:

```
1. m=length(Tree3_cs)
2. pr=Tree3_cs
3. for (i in 1:m){
4.   n1=length(Tree3_cs[[i]][,1])
5.   n2=length(Tree3_cs[[i]][1,])
6.   for (j1 in 1:n1){
7.     q1=Tree3_cs[[i]][j1,1]
8.     prob=Tree3$PBF[q1]
9.     if (n2>1) {
10.      for (j2 in 2:n2){
11.        q2=Tree3_cs[[i]][j1,j2]
12.        prob=prob*Tree3$PBF[q2]
13.        pr[[i]][j1,j2]=NA}}
14.    pr[[i]][j1,1]=prob}}
```

Если в командной строке после выполнения скрипта набрать pr, то будет выведена следующая информация:

```
> pr
[[1]]
      [,1]
[1,] 0.001448669
[2,] 0.001796766

[[2]]
      [,1] [,2]
[1,] 1.487810e-05 NA
[2,] 1.842618e-05 NA
[3,] 1.842618e-05 NA
[4,] 2.282040e-05 NA

[[3]]
      [,1] [,2] [,3]
[1,] 1.929755e-07 NA NA
[2,] 2.387178e-07 NA NA
[3,] 2.387178e-07 NA NA
[4,] 2.953028e-07 NA NA
[5,] 2.387178e-07 NA NA
[6,] 2.953028e-07 NA NA
[7,] 2.953028e-07 NA NA
[8,] 3.653006e-07 NA NA
```

В первом столбце приведена вероятность соответствующего сечения. Дополнительные столбцы никакой информации не несут. Анализируя полученный результат можно сделать вывод о том, что наибольший вклад в ненадежность системы вносят два события – явный и скрытые отказы элемента С.

В заключение этого раздела заметим, что функции addLatent, addActive и другие, которые рассчитывают

вероятность согласно некоторой модели надежности, могут быть очевидным образом единообразно заменены на `addProbability` с вычисленной заранее вероятностью отказа.

Заключение

Статья посвящена демонстрации возможностей активно развивающегося языка статистических вычислений R и его пакета `FaultTree`, связанных с построением и анализом деревьев отказов. Деревья отказов используются при анализе надежности сложных систем. В статье приведены и подробно разобраны три примера. В первом примере приводится АДО цепи с известными вероятностями отказов элементов. Второй пример посвящен анализу динамического дерева отказов, т.е. нахождению функции распределения наработки до отказа цепи. В третьем примере разбирается АДО цепи с восстанавливаемыми элементами.

Библиографический список

1. Michael J. Crawley. *The R Book* (2nd ed.). Wiley Publishing. 2012. – 1076 p.
2. Шипунов А. Б., Балдин Е. М., Волкова П. А., Коробейников А. И., Назарова С. А., Петров С. В., Суфиянов В. Г. Наглядная статистика. Используем R! – М.: ДМК Пресс. 2012. – 298 с.
3. Роберт И. Кабаков «R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R» ДМК Пресс, 2014 год, 588 стр.
4. Антонов А.В. Теория надежности. Статистические модели: Учеб. пособие/ Антонов А.В., Никулин М.С., Никулин А.М., Чепурко В.А. – М.: ИНФРА-М. 2015. – 576 с.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: «НАУКА». 1965. — 524 с.
6. Надежность технических систем: Справочник. Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь. 1985.— 608 с. ил.

7. Антонов А.В. Статистические модели в теории надежности: Учеб. пособие/ Антонов А.В., Никулин М.С. – М.: Абрис. 2012. – 390 с.

8. [https://ru.wikipedia.org/wiki/R_\(язык_программирования\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/R_(язык_программирования))

9. <http://www.openreliability.org/fault-tree-analysis-on-r/>

10. A. Mosleh, et. al., “Procedures Guidelines in Modeling Common Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment (NUREG/CR-5485)”, 1998.

11. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). Техническая документация. СПб.: ОАО «СПИК СЗМА», 2003.

12. C. L. Smith, S. T. Wood, W. J. Galyean, J. A. Schroeder, M. B. Sattison: Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 8-Vol. 2, NUREG/CR-7039 INL/EXT-09-17009 (June 2011).

Сведения об авторах

Александр В. Антонов – доктор технических наук, профессор, начальник отдела расчетных обоснований проектных решений АО РАСУ, Россия, Москва, e-mail: AlVlaAntonov@rasu.ru

Евгений Ю. Галивец – заместитель директора департамента – руководитель управления проектирования АО РАСУ, Россия, Москва, e-mail: EYGalivets@rasu.ru

Валерий А. Чепурко – кандидат физико-математических наук, доцент, главный специалист отдела расчетных обоснований проектных решений АО РАСУ, Россия, Москва, e-mail: v.a.chepurko@mail.ru, VAChepurko@rasu.ru

Алексей Н. Черняев – кандидат технических наук, заместитель технического директора – директор департамента проектирования АО РАСУ, Россия, Москва, e-mail: AlNChernyaev@rasu.ru

Поступила 04.08.2017

Представление суперпозиции двух технических систем с помощью центра тяжести функции плотности распределения

Евгений П. Сороколетов, Санкт-Петербургский Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Sorokoletov.john@gmail.com

Кирилл Н. Войнов, Санкт-Петербургский Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: forstar@mail.com



Евгений П.
Сороколетов



Кирилл Н. Войнов

Резюме. Цель. В практике расчета и анализа надежности встречаются технические системы, модель надежности которых трудно или вовсе невозможно адекватно описать набором последовательных и параллельных связей и соответствующим математическим аппаратом умножения вероятностей. В статье исследуется способ моделирования надежности высокоинтегрированных систем с помощью анализа положения центра тяжести функции плотности распределения времени безотказной работы $f(t)$. Настоящая работа является продолжением большого исследования, посвященного анализу свойств центра тяжести функции плотности распределения высокоинтегрированных технических систем. В первой части было выяснено, что центр тяжести позволяет оценить уровень взаимовлияния между подсистемами мехатронной системы и определить их влияние на общий уровень надежности изделия в целом, где основным критерием являлась близость частного центра тяжести функции плотности каждой подсистемы к общему осредненному центру тяжести всей системы. В настоящей работе предполагается, что средний центр тяжести для композиции функций плотности составных частей изделия не зависит от способа их соединения в модели надежности и, тем самым, может быть использован как условный показатель безотказности для систем с нечеткими структурно-функциональными связями. **Методы.** Исследование базируется на работе с графиками функций плотности распределения времени безотказной работы для условных компонентов сложной технической системы, таких как электроника, механика и программное обеспечение. Различная физическая природа частей системы отражена через вариацию параметров закона распределения Вейбулла-Гнеденко. Для простоты расчета и представления результатов анализ проводится не комплексно для 3-х компонентов, а попарно. Для каждой пары подсистем выполняется расчет и построение функций плотности как для отдельного компонента, так и в случае их последовательного и параллельного соединения. Затем для каждого расчетного случая строится центр тяжести соответствующих функций плотности с последующим построением и сравнением осредненных графиков. **Результаты.** Основное наблюдение по результатам анализа графиков – средний центр тяжести, полученный из двух частных центров тяжести функций плотности распределения единичных систем (Механика, Электроника, ПО), имеет высокую корреляцию (более 0,99) и почти совпадает со средним центром тяжести, полученным из двух частных центров тяжести последовательного и параллельного соединения соответствующих пар систем каждого расчетного случая. **Выводы.** Результаты исследования являются очередным аргументом в пользу того, что средний центр тяжести для композиции функций плотности распределения различных систем является эквивалентом их суперпозиции и может использоваться как условный осредненный (или нечеткий) измеритель общего уровня надежности высокоинтегрированных сложных технических систем, структурно-функциональную модель надежности которых затруднительно представить набором последовательных и параллельных связей и соответствующим математическим аппаратом умножения вероятностей.

Ключевые слова: центр тяжести функции, плотность распределения, надежность, распределение Вейбулла, высокоинтегрированные технические системы.

Формат цитирования: Сороколетов Е.П., Войнов К.Н. Представление суперпозиции двух технических систем с помощью центра тяжести функции плотности распределения // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 14-19. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-14-19

Введение

Настоящая работа является продолжением исследования [1], посвященного анализу свойств центра тяжести (ЦТ) функции плотности распределения $f(t)$ высокоинтегрированных технических систем. В первой части было выяснено, что центр тяжести позволяет оценить уровень взаимовлияния между подсистемами мехатронной системы и определить их влияние на общий уровень надежности изделия в целом. Дальнейшее исследование посвящается вопросу о том, допустимо ли использовать ЦТ в качестве условного осредненного показателя надежности высокоинтегрированных систем для случая, когда невозможно адекватно выразить модель изделия через набор последовательных и параллельных связей и соответствующий математический аппарат [2].

С переменным успехом и в зависимости от контекста и требований, проблема анализа надежности подобных систем решается различными способами, например, с помощью логико-вероятностного метода [3], использованием нечеткого подхода и расплывчатых множеств [4], а также функциональным анализом [5, 6]. Представленный в [1] и настоящей статье метод идеологически можно классифицировать как нечеткий подход с той разницей, что вместо состояния отказ/работоспособность (или его частоты) нечетким критерием является структурно-функциональная связь между компонентами.

1. Исходные данные и план исследования

Цель исследования – изучить поведение центра тяжести функции плотности распределения в случае последовательного и параллельного соединения элементов. Для этого формируются пары из произвольного набора условных технических систем с различными свойствами, выраженными через вариацию интенсивности отказов λ_0 и параметров α и β закона распределения Вейбулла (табл. 1):

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}, \quad (1)$$

$f(t)$ – функция плотности распределения времени безотказной работы

$$f(t) = \lambda_0 \alpha t^{\alpha-1} \exp(-\lambda_0 t^\alpha), \quad (2)$$

или для случая распределения Вейбулла:

$$f(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right), \quad (3)$$

где λ_0 – начальная интенсивность отказов;
 α – параметр формы закона распределения;
 β – параметр масштаба закона распределения

$$\beta = \lambda_0^{-1/\alpha}. \quad (4)$$

Таким образом, формируются 3 пары условных систем для дальнейшего исследования:

- а) Электроника + Механика;
- б) Электроника + ПО;
- в) Механика + ПО.

Расчет проводится для интервала наработки [0; 10000] часов с шагом в 100 ч.

Для каждой пары систем проводится расчет и построение графиков следующих функций:

$f(t)$ – функция плотности распределения времени безотказной работы для каждой единичной системы;

$ЦТ_i$ – центр тяжести соответствующей функции $f_i(t)$;

$ЦТ-0_{i_исх}$ – средний центр тяжести для каждой пары систем, построенный на основе исходных графиков $ЦТ_i$ (см. п. 2);

$f(t)_{i_посл}$ – функция $f_i(t)$ для последовательного соединения элементов соответствующей пары;

$ЦТ_{i_посл}$ – центр тяжести функции $f(t)_{i_посл}$ для последовательного соединения (см. п. 4);

$f(t)_{i_пар}$ – функция $f_i(t)$ для параллельного соединения элементов соответствующей пары;

$ЦТ_{i_пар}$ – центр тяжести функции $f(t)_{i_пар}$ для параллельного соединения (см. п. 6);

$ЦТ-0_{i_сумм}$ – средний центр тяжести для каждой пары систем, построенный на основе соответствующих центров тяжести $ЦТ_{i_посл}$ последовательного и $ЦТ_{i_пар}$ параллельного соединения систем (см. пп. 5 и 7).

2.1. Расчет и построение функций для пар систем

Функции плотности распределения времени безотказной работы $f_i(t)$ для каждой системы выражены в соответствии с формулой (2-3) и описаны выше (таб. 1).

Построение функции центра тяжести $ЦТ_i$ для соответствующей функции плотности распределения $f_i(t)$ проводится по следующей модели.

Таблица 1– Параметры законов распределения условных технических систем

Параметр	Электронные компоненты	Программное обеспечение (ПО)	Механические компоненты
$\lambda_0, \text{ч}^{-1}$	1×10^{-4}	0,005	1×10^{-7}
α	1	0,5	1,8
β	10000	40000	7742,6368
$\lambda(t)$	$\lambda_{эл}(t) = 0,0001$	$\lambda_{ПО}(t) = 0,0025 \cdot t^{0,5}$	$\lambda_{Мех}(t) = 1,8 \cdot 10^{-7} t^{0,8}$
$f(t)$	$f_{эл}(t) = 10^{-4} e^{-10^{-4} t}$	$f_{ПО}(t) = 0,005 \cdot 0,5 t^{-0,5} e^{-0,005 t^{0,5}}$	$f_{Мех}(t) = 10^{-7} \cdot 1,8 t^{0,8} e^{-10^{-7} t^{1,8}}$

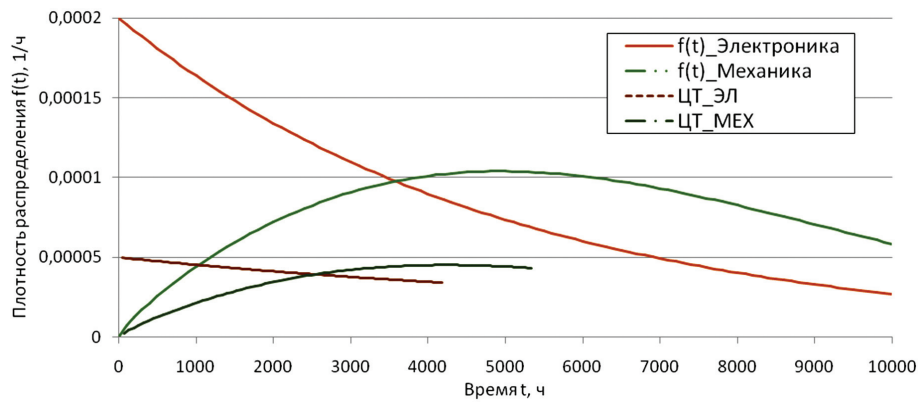


Рисунок 1– Функции плотности распределения и центров тяжести для пары систем Электроника + Механика

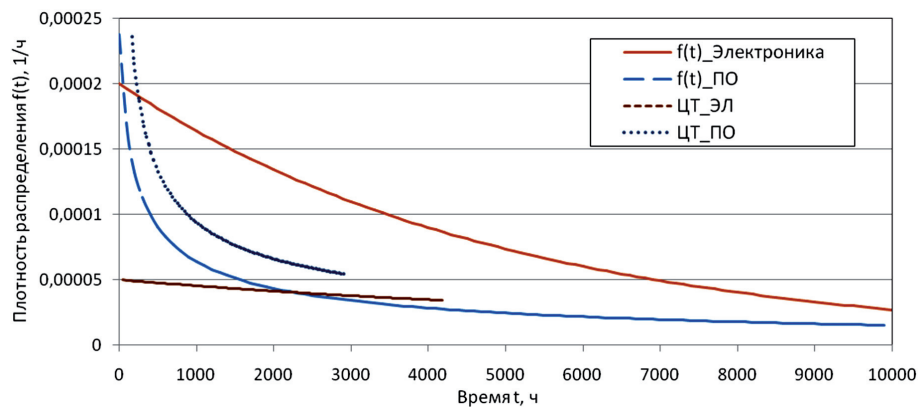


Рисунок 2– Функция плотности распределения и центров тяжести для пары систем Электроника + ПО

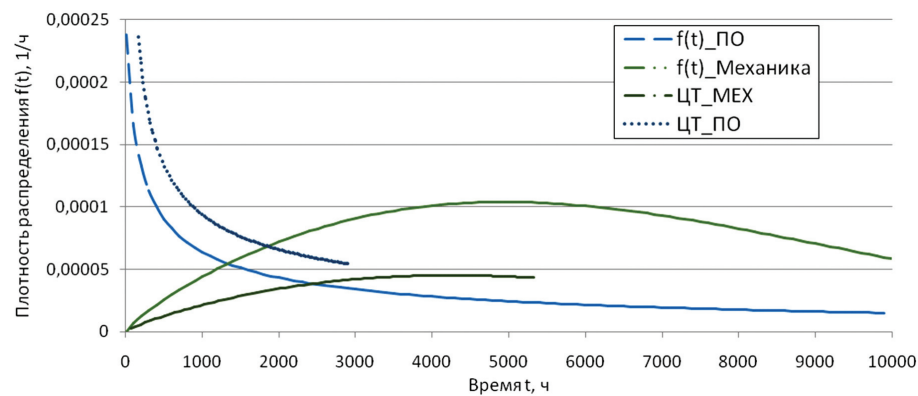


Рисунок 3– Функция плотности распределения и центров тяжести для пары систем Механика + ПО

Шаг первый заключается в определении временного интервала $[t_1; t_2]$ и ограничении исследуемой области под графиком D_i . После того, как определены границы наработки и соответственно сформирована область D_i , дальнейший анализ заключается в определении площади S_i

$$S_i = \iint_{D_i} df dt = \int_{t_1}^{t_2} f_i(t) dt. \quad (5)$$

и вычислении координат $(\bar{t}_i; \bar{f}_i)$ центра тяжести (ЦТ) соответствующей области D_i

$$\bar{f}_i = \frac{1}{S_i} \iint_{D_i} f df dt; \quad \bar{t}_i = \frac{1}{S_i} \iint_{D_i} t df dt. \quad (6)$$

Такой расчет центра тяжести проводится для каждого интервала наработок, в соответствии с которым строится функция плотности распределения (рис. 1-3).

2.2. Расчет и построение функций для последовательного и параллельного соединения

Значение функций плотности распределения для последовательного $f(t)_{i-посл}$ и параллельного $f(t)_{i-пар}$ соединения пары систем определяются с помощью дифференцирования по формуле (8) вероятности безотказной работы $P(t)$ для последовательного и па-

параллельного соединения, вычисляемое по известным соотношениям (9-10):

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^\alpha) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right), \quad (7)$$

$$f(t) = -\frac{d}{dt}P(t) = \frac{d}{dt}Q(t), \quad (8)$$

$$P(t)_{\text{посл}} = P_1(t) \cdot P_2(t), \quad (9)$$

$$P(t)_{\text{пар}} = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t) \cdot P_2(t). \quad (10)$$

Таким образом, с учетом исходных данных (табл. 1) и формул (7-10) функции плотности распределения времени безотказной работы для последовательного и параллельного соединения пары систем имеют вид (выражения 11-16, рис. 4-6):

$$f(t)_{\text{Эл+Мех, посл}} = (1,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^{0,8} + 10^{-4}) \cdot \exp(-t^{1,8} \cdot 10^3 / 10^7), \quad (11)$$

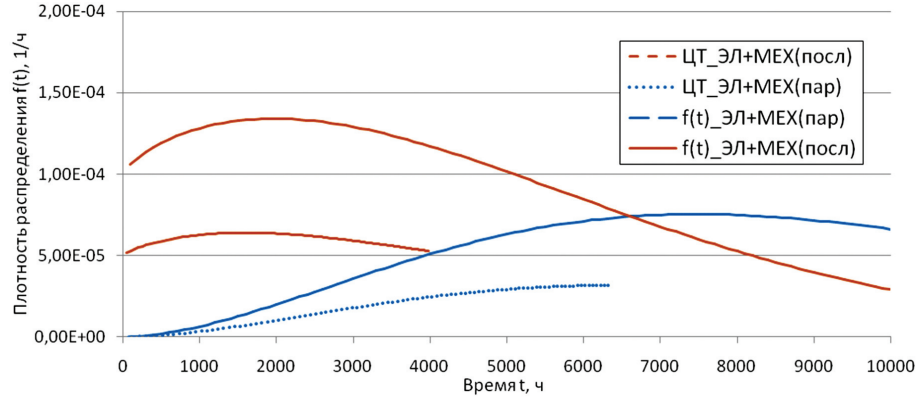


Рисунок 4– Функции плотности распределения и центров тяжести для последовательного и параллельного соединения элементов пары Электроника + Механика

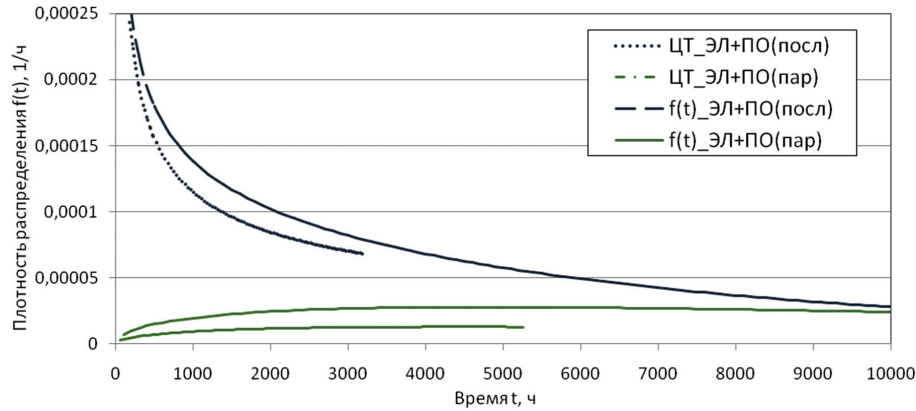


Рисунок 5– Функции плотности распределения и центров тяжести для последовательного и параллельного соединения элементов пары Электроника + ПО

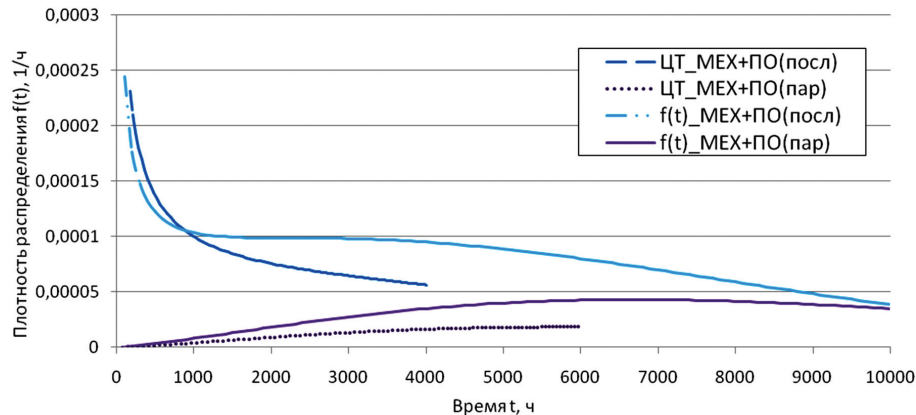


Рисунок 6– Функции плотности распределения и центров тяжести для последовательного и параллельного соединения элементов пары Электроника + ПО

$$f(t)_{\text{ЭЛ+МЭХ}_{\text{пар}}} = \left[\frac{10^4 \cdot \exp(t^{1,8} \cdot 10^{-7}) + 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^{1,8}}{\exp(t \cdot 10^{-4}) - 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^{0,8} - 10^{-4}} \right] \times \exp(-t^{1,8} \cdot 10^3 / 10^7), \quad (12)$$

$$f(t)_{\text{ЭЛ+ПО}_{\text{посл}}} = (10^{-4} + 0,0025 \cdot t^{-0,5}) \cdot \exp(-10^{-4}t - 0,005t^{0,5}), \quad (13)$$

$$f(t)_{\text{ЭЛ+ПО}_{\text{пар}}} = \left[\frac{\exp(10^{-4}t) \cdot 0,0025t^{-0,5} + 10^{-4}}{\exp(0,005 \cdot t^{0,5}) - 0,0025 \cdot t^{-0,5} - 10^{-4}} \right] \times \exp(-10^{-4}t - 0,005t^{0,5}), \quad (14)$$

$$f(t)_{\text{МЭХ+ПО}_{\text{посл}}} = (1,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^{0,8} + 0,0025 \cdot t^{-0,5}) \cdot \exp(-10^{-7}t^{1,8} - 0,005t^{0,5}), \quad (15)$$

$$f(t)_{\text{МЭХ+ПО}_{\text{пар}}} = \left[\frac{\exp(10^{-7}t^{1,8}) \cdot 0,0025t^{-0,5} + 1,8 \cdot 10^{-7}}{t^{0,8} \cdot \exp(0,005 \cdot t^{0,5}) - 0,0025 \cdot t^{-0,5} - 1,8 \cdot 10^{-7}} \right] \times \exp(-10^{-7}t^{1,8} - 0,005t^{0,5}). \quad (16)$$

2.3. Построение средних центров тяжести

Построение среднего центра тяжести системы на основе частных центров подсистем осуществляется в соответствии с формулой (17)

$$\bar{f}_0 = \frac{\bar{f}_1 + \bar{f}_2 + \dots + \bar{f}_n}{n}; \quad \bar{t}_0 = \frac{\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \dots + \bar{t}_n}{n}, \quad (17)$$

Построим и сравним между собой для каждой пары систем следующие графики:

- Средний центр тяжести $\text{ЦТ-0}_{i-\text{исх}}$, построенный на основе двух частных центров тяжести ЦТ_i исходных функций плотности распределения $f_i(t)$ для каждой системы из пары (рис. 1-3);

- Средний центр тяжести $\text{ЦТ-0}_{i-\text{сумм}}$, построенный на основе двух частных центров тяжести $\text{ЦТ}_{i-\text{посл}}$ и $\text{ЦТ}_{i-\text{пар}}$ вычисленных функций плотности распределения при последовательном и параллельном соединении элементов пары (рис. 4-6).

Пример построения среднего центра тяжести на основе частных представлен ниже (рис. 7). Функции средних центров тяжести на основе частных центров тяжести функций плотности распределения для последовательного и параллельного соединений систем пар Электроника + Механика, Электроника + ПО и Механика + ПО представлены на рис. 8-10.

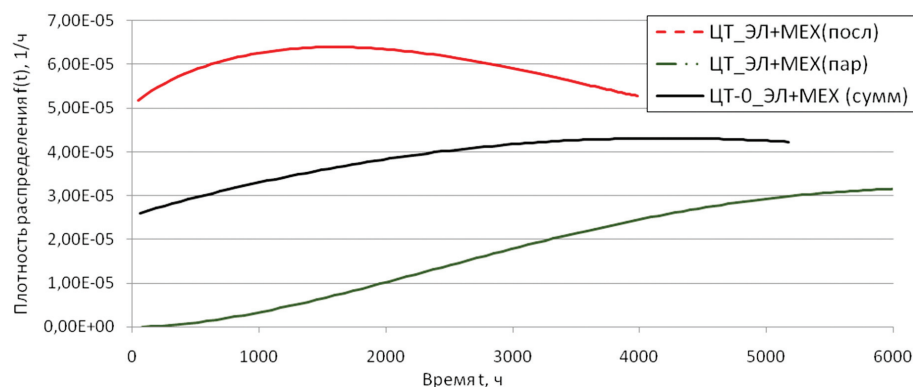


Рисунок 7— Построение среднего центра тяжести на основе частных центров тяжести функций плотности распределения для последовательного и параллельного соединений систем пары Электроника + Механика

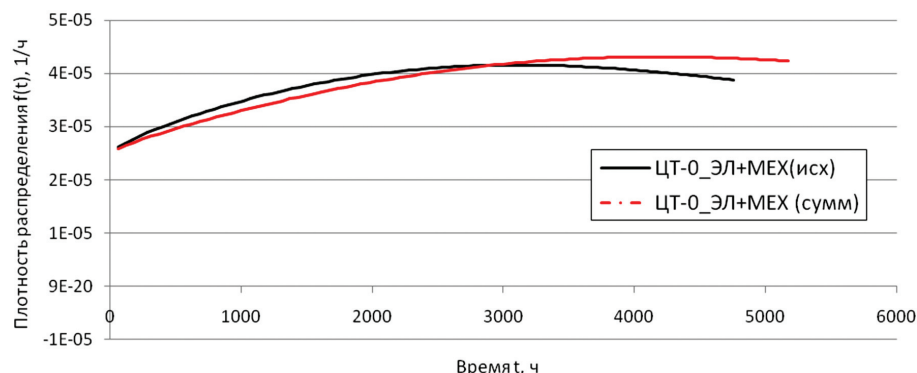


Рисунок 8— Функции средних центров тяжести на основе исходных данных и с учетом последовательного и параллельного соединений элементов пары Электроника + Механика

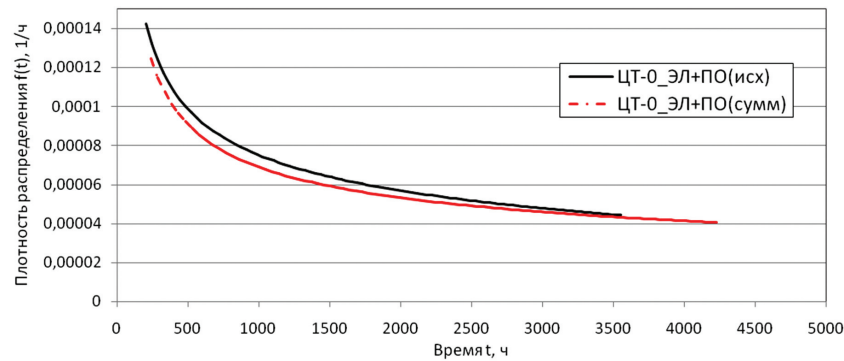


Рисунок 9– Функции средних центров тяжести на основе исходных данных и с учетом последовательного и параллельного соединения элементов пары Электроника + ПО

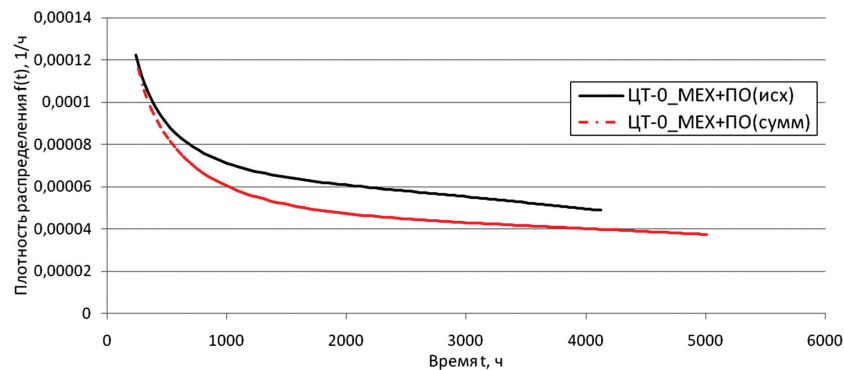


Рисунок 10– Функции средних центров тяжести на основе исходных данных и с учетом последовательного и параллельного соединения элементов пары Механика + ПО

3. Заключение

Главное заключение по результатам анализа графиков (рис. 8-10) – средний центр тяжести, полученный из двух частных центров тяжести для функций плотности распределения $f(t)$ единичных систем (Механика, Электроника, ПО) имеет высокую корреляцию (более 0,99) и почти совпадает со средним центром тяжести, полученным из двух частных центров тяжести для последовательного $f(t)_{i_послед}$ и параллельного $f(t)_{i_пар}$ соединения соответствующих пар систем.

Таким образом, это является очередным аргументом в пользу того, что средний центр тяжести для композиции функций плотности распределения различных систем является эквивалентом их суперпозиции и может использоваться как условный осредненный (или нечеткий) измеритель общего уровня надежности высокоинтегрированных сложных технических систем, структурно–функциональную модель надежности которых затруднительно представить набором последовательных и параллельных связей.

Библиографический список

1. Сороколетов Е.П., Войнов К.Н. Исследование поведения центра тяжести плотности распределения времени безотказной работы сложных технических систем при резервировании. Надежность. 2016;16(4):3-10. DOI:10.21683/1729-2646-2016-16-4-3-10.
2. Войнов К.Н. Прогнозирование надежности механических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр.

отд-ние, 1978. – 208 с.

3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. – 276 с.

4. Chang J.R., Liao S.H. The reliability of general vague fault-tree analysis of weapon systems fault diagnosis // Soft Computing. 2006. №10. P.531-542.

5. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности – БХВ-Петербург – 2006 – 702 с.

SAE ARP4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment, – SAE International – PA, 1996.

Сведения об авторах

Евгений П. Сороколетов – руководитель направления отказобезопасность ГК «Би Питрон», аспирант кафедры приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: sorokoletov.john@gmail.com

Кирилл Н. Войнов, доктор технических наук, профессор, академик Санкт-Петербургской инженерной академии Санкт-Петербургский Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптике, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: forstar@mail.com

Поступила 01.06.2017

Матричная форма функций вероятностей безотказной работы систем с ненагруженным резервированием (ч.2)

Дмитрий М. Кривопапов, ФГБУН Институт проблем управления В.А.Трапезникова Российской Академии наук, Москва, Россия

Евгений В. Юркевич, ФГБУН Институт проблем управления В.А.Трапезникова Российской Академии наук, Москва, Россия



Дмитрий М.
Кривопапов



Евгений В.
Юркевич

Резюме. Показана важность проблем учета особенностей средств, обеспечивающих резервирование функциональных блоков, при надежном проектировании систем. С ростом числа типов и количества задействованных элементов процесс вычислений надежности усложняется и занимает все большее время. Поэтому для упрощения расчетов принимаются допущения, например, в системах с резервированием используются однотипные элементы. Однако такой подход не позволяет оценить надежность системы, где применены принципиально различные элементы. В работе рассмотрены системы, включающие любое число принципиально различных элементов с ненагруженным типом резервирования. В качестве одного из путей решения названной проблемы выведен и математически обоснован метод, позволяющий в матричном виде представлять аналитическое выражение для вычисления вероятности её безотказной работы. Показано, что в этом случае возможна оценка надежности численными методами с применением приближенных вычислений на ЭВМ при интегрировании и дифференцировании. Приближенность результата таких вычислений предложено определять как точностью самой ЭВМ, так и сложностью исследуемой системы. При надежном проектировании, когда процесс перерасчета производится многократно, этот недостаток является критичным. Целью сокращения времени расчета надежности исследуемой системы, а также повышения точности получаемых результатов в работе предлагается метод представления аналитического решения для вычисления ВБР. В результате появляется возможность упрощения механизма расчета систем с ненагруженным типом резервирования, а также повышения точности оценки их надежности. Поэтому для вычисления ВБР системы с произвольным количеством элементов в общем виде численными методами предлагается произвести число последовательных вычислений интегралов от произведения функции и производных на единицу меньше числа элементов системы. Учитывая особенности машинных вычислений и рекурсию алгоритма, вычисления ВБР системы уже из 5-ти и более элементов может занимать существенное время, кроме того, неизбежно накопление ошибки вычисления. Практические особенности решения задач обеспечения устойчивости работы космических аппаратов к внешним воздействиям характеризуются большой важностью фактора обеспечения скорости принятия решений по формированию сигнала управления, направленного на обеспечение гомеостаза характеристик работы бортовых систем. В работе математически обосновано введение метода представления аналитического выражения для вычисления ВБР системы из любого числа элементов, находящихся в ненагруженном резерве. Подобное представление может быть использовано для отображения данных в памяти ЭВМ. При известных коэффициентах матрицы это представление позволит избежать интегрирования и дифференцирования при вычислении ВБР, что значительно ускоряет вычисления и повышает точность результатов.

Ключевые слова: надежное проектирование, технические системы, принципиально различные элементы системы, ненагруженное резервирование, аналитическое выражение, коэффициенты матрицы, ускорение вычислений, повышение точности оценки надежности.

Формат цитирования: Кривопапов Д.М., Юркевич Е.В. Матричная форма функций вероятностей безотказной работы систем с ненагруженным резервированием (ч.2) // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 20-25. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-20-25

Введение

Вычисление вероятности безотказной работы (ВБР) системы является неотъемлемым этапом надежного проектирования. С ростом числа типов и количества задействованных элементов процесс вычислений надежности усложняется и занимает все большее время.

Для упрощения расчетов принимаются допущения, например, в системах с резервированием используются однотипные элементы. Однако такой подход не позволяет оценить надежность системы, где применены принципиально различные элементы. (Подобного рода задачи возникают при необходимости вычисления вероятности безотказного выполнения функции – оценке функциональной надежности [1].) В этом случае возможна оценка надежности численными методами с применением приближенных вычислений на ЭВМ при интегрировании и дифференцировании.

Приближенность результата таких вычислений определяется как точностью самой ЭВМ, так и сложностью исследуемой системы [2]. При надежном проектировании, когда процесс перерасчета производится многократно, этот недостаток является критичным.

Целью сокращения времени расчета надежности исследуемой системы, а также повышения точности получаемых результатов в данной работе предлагается метод представления аналитического решения для вычисления ВБР систем с ненагруженным типом резервирования, поскольку они являются одними из наиболее надежных и наиболее сложно рассчитываемых систем.

Метод численного решения

Для определения ВБР системы в общем виде при ненагруженном резервировании используется рекуррентная формула:

$$P_N(T) = P_{N-1}(T) + \int_0^T p_n(\tau, T) \cdot f_{N-1}(\tau) d\tau,$$

где $P_N(T)$ – ВБР системы из N элементов в течение времени T ;

$P_{N-1}(T)$ – ВБР системы из $(N-1)$ элементов в течение времени T ;

$p_n(\tau, T)$ – ВБР n -го (подключаемого) элемента в течение периода времени от τ до T ;

$f_{N-1}(\tau)$ – плотность распределения отказов системы из $(N-1)$ элементов для момента времени τ

$$f_{N-1}(T) = -\frac{P_{N-1}(T)}{dT}.$$

Поэтому для вычисления ВБР системы из N элементов в общем виде численными методами необходимо произвести $(N-1)$ последовательных вычислений интегралов от произведения функции и производных $f_{N-1}(T)$. Учитывая особенности машинных вычислений и рекурсию алгоритма, вычисления ВБР системы уже из 5-ти и более элементов может занимать существенное время, кроме того, неизбежно накопление ошибки вычисления.

Замечание: Формулы используются при расчетах надежности на практике в предположении, что резервные элементы не теряют надежность в отключенном виде.

Аналитические решения

Рассмотрим различные случаи ненагруженного резервирования с целью получения аналитических решений и анализа результатов.

Система из 1-го элемента

Пусть интенсивность отказа элемента равна λ_1 , тогда ВБР системы:

$$P_1(T) = e^{-\lambda_1 T}.$$

Функция ВБР от времени имеет вид:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}.$$

Система из 2-х элементов

Возможны принципиально два различных случая.

Интенсивность отказа 2-го подключаемого элемента равна λ_1 , тогда ВБР системы:

$$P_2(T) = P_1(T) + \int_0^T p_2(\tau, T) \cdot f_1(\tau) d\tau,$$

$$p_2(\tau, T) = e^{-\lambda_1(T-\tau)},$$

$$f_1(\tau) = -\frac{P_1(\tau)}{d\tau} = -\frac{e^{-\lambda_1 \tau}}{d\tau} = \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau},$$

$$\begin{aligned} P_2(T) &= e^{-\lambda_1 T} + \int_0^T e^{-\lambda_1(T-\tau)} \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau = \\ &= e^{-\lambda_1 T} + \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 T} \cdot \int_0^T 1 d\tau = e^{-\lambda_1 T} + \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 T} \cdot T = (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T}. \end{aligned}$$

Интенсивность отказа 2-го подключаемого элемента равна λ_2 , тогда ВБР системы:

$$P_2(T) = P_1(T) + \int_0^T p_2(\tau, T) \cdot f_1(\tau) d\tau,$$

$$p_2(\tau, T) = e^{-\lambda_2(T-\tau)},$$

$$f_1(\tau) = -\frac{P_1(\tau)}{d\tau} = -\frac{e^{-\lambda_1 \tau}}{d\tau} = \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau},$$

$$\begin{aligned} P_2(T) &= e^{-\lambda_1 T} + \int_0^T e^{-\lambda_2(T-\tau)} \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau = e^{-\lambda_1 T} + \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_2 T} \cdot \\ &\cdot \int_0^T e^{(\lambda_2 - \lambda_1)\tau} d\tau = e^{-\lambda_1 T} + \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_2 T} \cdot \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{(\lambda_2 - \lambda_1)T} - 1) = \\ &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T}. \end{aligned}$$

Функция ВБР от времени имеет вид:
в случае совпадения элементов:

$$P_2(t) = (1 + \lambda_1 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_1 t};$$

в случае несовпадения элементов:

$$P_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 t}.$$

Система из 3-х элементов

Случай, когда к двум одинаковым элементам под-ключается аналогичный третий.

Интенсивность отказа элемента равна λ_1 , тогда ВБР системы:

$$P_3(T) = P_2(T) + \int_0^T p_3(\tau, T) \cdot f_2(\tau) d\tau,$$

$$P_2(T) = (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T},$$

$$p_3(\tau, T) = e^{-\lambda_1(T-\tau)},$$

$$f_2(\tau) = -\frac{P_2(\tau)}{d\tau} = -\frac{(1 + \lambda_1 \cdot \tau) \cdot e^{-\lambda_1 \tau}}{d\tau} = \lambda_1^2 \cdot \tau \cdot e^{-\lambda_1 \tau},$$

$$\begin{aligned} P_3(T) &= (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T} + \int_0^T e^{-\lambda_1(T-\tau)} \cdot \lambda_1^2 \cdot \tau \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau = \\ &= (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T} + \lambda_1^2 \cdot e^{-\lambda_1 T} \cdot \int_0^T \tau d\tau = (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T} + \\ &+ \lambda_1^2 \cdot e^{-\lambda_1 T} \cdot \frac{T^2}{2} = \left(1 + \lambda_1 \cdot T + \frac{\lambda_1^2}{2} \cdot T^2\right) \cdot e^{-\lambda_1 T}. \end{aligned}$$

Случай, когда к двум одинаковым элементам под-ключается элемент другого типа.

Интенсивность отказа элемента равна λ_2 , тогда ВБР системы:

$$P_3(T) = P_2(T) + \int_0^T p_3(\tau, T) \cdot f_2(\tau) d\tau,$$

$$P_2(T) = (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T},$$

$$p_3(\tau, T) = e^{-\lambda_2(T-\tau)},$$

$$f_2(\tau) = -\frac{P_2(\tau)}{d\tau} = -\frac{(1 + \lambda_1 \cdot \tau) \cdot e^{-\lambda_1 \tau}}{d\tau} = \lambda_1^2 \cdot \tau \cdot e^{-\lambda_1 \tau},$$

$$\begin{aligned} P_3(T) &= (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T} + \int_0^T e^{-\lambda_2(T-\tau)} \cdot \lambda_1^2 \cdot \tau \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau = (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T} + \\ &+ \lambda_1^2 \cdot e^{-\lambda_2 T} \cdot \int_0^T e^{(\lambda_2 - \lambda_1)\tau} \cdot \tau d\tau = (1 + \lambda_1 \cdot T) \cdot e^{-\lambda_1 T} + \lambda_1^2 \cdot e^{-\lambda_2 T} \times \\ &\times \left(\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot T \cdot e^{(\lambda_2 - \lambda_1)T} - \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \cdot e^{(\lambda_2 - \lambda_1)T} + \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \right) = \\ &= \left(\frac{\lambda_2^2 - 2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot T \right) e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1^2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \cdot e^{-\lambda_2 T}. \end{aligned}$$

Случай, когда к двум различным элементам под-ключается элемент совпадающего типа.

Интенсивность отказа элемента равна λ_1 , тогда ВБР системы:

$$P_3(T) = P_2(T) + \int_0^T p_3(\tau, T) \cdot f_2(\tau) d\tau,$$

$$P_2(T) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T},$$

$$p_3(\tau, T) = e^{-\lambda_1(T-\tau)},$$

$$\begin{aligned} f_2(\tau) &= -\frac{P_2(\tau)}{d\tau} = -\frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 \tau} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 \tau}}{d\tau} = \\ &= \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 \tau} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 \tau}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_3(T) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T} + \int_0^T e^{-\lambda_1(T-\tau)} \cdot \\ &\cdot \left(\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 \tau} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 \tau} \right) d\tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \\ &+ \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T} + e^{-\lambda_1 T} \cdot \int_0^T \left(\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{(\lambda_1 - \lambda_2)\tau} \right) d\tau = \\ &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T} + e^{-\lambda_1 T} \times \\ &\times \left(\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot T + \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)^2} \cdot e^{(\lambda_1 - \lambda_2)T} - \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)^2} \right) = \\ &= \left(\frac{\lambda_2^2 - 2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot T \right) e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1^2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \cdot e^{-\lambda_2 T}. \end{aligned}$$

Замечание: Последние два случая показывают, что вид функции ВБР не зависит от порядка подключения элементов в ненагруженной системе, а зависит только от типа элементов.

Случай, когда к двум различным элементам под-ключается элемент несовпадающего типа.

Интенсивность отказа элемента равна λ_3 , тогда ВБР системы:

$$P_3(T) = P_2(T) + \int_0^T p_3(\tau, T) \cdot f_2(\tau) d\tau,$$

$$P_2(T) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T},$$

$$p_3(\tau, T) = e^{-\lambda_3(T-\tau)},$$

$$f_2(\tau) = -\frac{P_2(\tau)}{d\tau} = -\frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 \tau} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 \tau}}{d\tau} =$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 \tau} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 \tau},$$

$$P_3(T) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T} + \int_0^T e^{-\lambda_3 (T-\tau)} \cdot$$

$$\left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 \tau} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 \tau} \right) d\tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} +$$

$$+ \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T} + e^{-\lambda_3 T} \times \int_0^T \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{(\lambda_3 - \lambda_1) \tau} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{(\lambda_3 - \lambda_2) \tau} \right) d\tau =$$

$$= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 T} + e^{-\lambda_3 T} \times$$

$$\times \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1)} \cdot e^{(\lambda_3 - \lambda_1) T} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1)} + \right.$$

$$\left. + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)} \cdot e^{(\lambda_3 - \lambda_2) T} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)} \right) =$$

$$= \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1)} \cdot e^{-\lambda_1 T} + \frac{\lambda_1 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)} \cdot e^{-\lambda_2 T} +$$

$$+ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3) \cdot (\lambda_2 - \lambda_3)} \cdot e^{-\lambda_3 T}.$$

Рассмотрим подробно полученные функции ВБР.

Функция ВБР от времени имеет виды:

- один элемент интенсивностью λ_1

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t};$$

- для двух элементов:

два элемента интенсивностью λ_1

$$P_2(t) = (1 + \lambda_1 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_1 t};$$

один элемент интенсивностью λ_1 , второй – λ_2

$$P_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 t};$$

- для трех элементов:

три элемента интенсивностью λ_1

$$P_3(t) = \left(1 + \lambda_1 \cdot t + \frac{\lambda_1^2}{2} \cdot t^2 \right) \cdot e^{-\lambda_1 t};$$

два элемента интенсивностью λ_1 , третий – λ_2

$$P_3(t) = \left(\frac{\lambda_2^2 - 2\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot t \right) e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1^2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \cdot e^{-\lambda_2 t};$$

три элемента с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ соответственно

$$P_3(t) = \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1)} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)} \cdot e^{-\lambda_2 t} +$$

$$+ \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3) \cdot (\lambda_2 - \lambda_3)} \cdot e^{-\lambda_3 t}.$$

Из вида зависимостей видно, что при наличии «повторяющихся» элементов возрастает степень многочлена при соответствующей экспоненте. При подключении «неповторяющегося» элемента повышения степени многочлена не происходит, однако коэффициенты в формулах перестраиваются. Для представления формул в памяти ЭВМ сформируем метод их представления.

Алгоритм представления аналитического решения

Для выведения общего алгоритма рассмотрим произвольную систему, состоящую из 4-х типов элементов с интенсивностями отказов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Как было показано ранее, в общем виде формула для вычисления вероятности безотказной работы может быть составлена в виде ряда, содержащего экспоненты чисел $-\lambda_1 t, -\lambda_2 t, -\lambda_3 t, -\lambda_4 t$.

$$P_4(t) = A(t) \cdot e^{-\lambda_1 t} + B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t}$$

Функции $A(t), B(t), C(t), D(t)$ представляют собой многочлены по степени t , количество слагаемых которых определяется количеством соответствующих одинаковых элементов системы. То есть, если в системе 2 элемента с интенсивностью отказов λ_1 , то многочлен $A(t)$ содержит 2 слагаемых:

$$A(t) = a_0 + a_1 t$$

В общем случае количество одинаковых элементов в системе не известно. При последовательном подсоединении элементов к системе, если появляется новый тип элементов, то в выражении образуется новый тип экспоненты, а если тип подключаемого элемента совпадает с каким либо уже подключенным, то в соответствующем многочлене появляется новое слагаемое. Например, для системы из 4-х элементов возможно два вида «краевых» случая:

- 4 различных элемента – тогда все многочлены содержат ровно одно ненулевое слагаемое и имеются все виды экспонент;

- 4 одинаковых типа элементов – имеется только один многочлен, содержащий 4 элемента и один вид экспоненты.

Чтобы описать подобную систему, дополним все многочлены нулевыми коэффициентами, чтобы они содержали максимальное количество элементов.

$$A(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$B(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3$$

$$C(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3$$

$$D(t) = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3$$

Представим для наглядности коэффициенты в виде матрицы:

$$\begin{array}{c|cccc} & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 \\ & - & - & - & - \\ t^0 & | & a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ t^1 & | & a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ t^2 & | & a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ t^3 & | & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{array}$$

Обозначим матрицу исходных коэффициентов A , матрицу интенсивностей отказов Λ и матрицу степеней T

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{pmatrix}$$

$$\Lambda = (\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4),$$

$$T = \begin{pmatrix} t^0 \\ t^1 \\ t^2 \\ t^3 \end{pmatrix}.$$

Введем также вспомогательную функцию $F(A, t)$, преобразующую матрицы по следующему правилу:

$$B = F(A, t), \text{ где } B_{ij} = e^{-t \cdot A_{ij}}.$$

Тогда ВБР системы, характеризуемой матрицей A , всегда можно определить по формуле:

$$P(t) = A^T \cdot T \cdot F(\Lambda, t)^T.$$

Пример. Выведенные функции ВБР $P(t)$ характеризуются следующими матрицами с соответствующими вспомогательными матрицами T и Λ :

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t},$$

$$A = (1),$$

$$P_2(t) = (1 + \lambda_1 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_1 t},$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \lambda_1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_2 t},$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} & \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_3(t) = \left(1 + \lambda_1 \cdot t + \frac{\lambda_1^2}{2} \cdot t^2\right) \cdot e^{-\lambda_1 t},$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_1^2}{2} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_3(t) = \left(\frac{\lambda_2^2 - 2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot t\right) e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1^2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} \cdot e^{-\lambda_2 t},$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_2^2 - 2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} & \frac{\lambda_1^2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} & 0 \\ \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_3(t) = \frac{\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1)} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)} \cdot e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3) \cdot (\lambda_2 - \lambda_3)} \cdot e^{-\lambda_3 t},$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1)} & \frac{\lambda_1\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2)} & \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3) \cdot (\lambda_2 - \lambda_3)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Выводы

Выведен и математически обоснован метод представления аналитического выражения для вычисления ВБР системы из любого числа элементов, находящихся в ненагруженном резерве. Подобное представление

может быть использовано для отображения данных в памяти ЭВМ. При известных коэффициентах матрицы такое представление позволит избежать интегрирования и дифференцирования при вычислении ВБР, что значительно ускоряет вычисления и повышает точность результатов.

Библиографический список

1. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа/ М.: ООО «Журнал «Надежность» 2012 -295с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. /СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704с.
3. Кривопапов Д.М. Доклад «Особенности динамического программирования в надежностном проектировании программно-технических систем космических

аппаратов». Пятая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва 2017 г.

Сведения об авторах:

Дмитрий М. Кривопапов, инженер ФГБУН Институт проблем управления В.А.Трапезникова Российской Академии наук, Москва, Россия, +7 926-840-06-58, e-mail: persival92@rambler.ru

Евгений В. Юркевич, д.т.н., профессор, г.н.с. ФГБУН Институт проблем управления В.А.Трапезникова Российской Академии наук, Москва, Россия, +7 495-334-88-70, e-mail: yurk@ipu.ru

Поступила 29.08.2017

Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры

Игорь А. Тарарычкин, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск



Игорь А.
Тарарычкин

Целью работы является изучение закономерностей развития процесса прогрессирующего повреждения сетевых структур трубопроводных систем и разработка рекомендаций по обеспечению стойкости таких инженерных объектов. Под процессом прогрессирующего повреждения понимается процедура перехода линейных элементов (трубопроводов) системы в состояние неработоспособности, осуществляемая в случайной последовательности. Оценка способности системы противостоять развитию процесса прогрессирующего повреждения выполнялась при помощи показателя стойкости F_w , представляющего собой среднюю долю трубопроводов, переход которых в состояние неработоспособности приводит к отключению от источника всех потребителей продукта. **Методы исследования.** Определение значений $0 < F_w < 1$ выполнялось с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. При выполнении структурного анализа систем множество всех линейных элементов рассматривалось как состоящее из 5-ти подмножеств $G_1, \dots, G_5$ соединяющих точечные элементы различных типов. **Результаты.** Установлено, что элементы, принадлежащие различным подмножествам, оказывают разное влияние на стойкость системы к прогрессирующим повреждениям. Наибольшее влияние оказывают элементы подмножеств G_1 и G_2 . Эти элементы формируют «ядро» сетевого объекта. Наименьшее влияние на стойкость к повреждениям оказывают элементы принадлежащие подмножествам G_4 и G_5 . Их можно рассматривать как «дальнюю периферию» сетевой структуры. Дальняя периферия взаимодействует с ядром при помощи элементов, принадлежащих подмножеству G_3 . Это «ближняя периферия», обеспечивающая связь ядра с дальней периферией. Влияние элементов подмножества G_3 на стойкость к повреждениям оказывается слабее, чем элементов, принадлежащих ядру, однако сильнее, чем элементов, принадлежащих дальней периферии. Таким образом, строение трубопроводной системы можно представить в виде некоторого многослойного объекта. В составе ядра находятся линейные элементы, связывающие между собой потребителей продукта и источник. При этом чем больше связей будет в ядре, тем выше будет и стойкость сетевой структуры. **Выводы.** Установлено, что стойкость сетевых структур трубопроводных систем к развитию процесса прогрессирующего повреждения зависит от их состава, а множество всех трубопроводов можно разделить на 5 подмножеств, элементы которых в различной степени влияют на стойкость всей системы. Сетевая структура трубопроводной системы может быть представлена в виде многослойного объекта с ядром, ближней и дальней периферией. Установлено, что стойкость к повреждениям в значительной мере зависит от количественного состава и характера взаимодействия элементов отдельных слоев. Сетевые структуры типа «дерево» характеризуются низким уровнем стойкости к прогрессирующим повреждениям. Повысить показатель стойкости таких объектов можно путем формирования ядра и введения в состав системы дополнительных линейных элементов.

Ключевые слова: трубопровод, система, структура, стойкость, сеть, повреждения.

Формат цитирования: Тарарычкин И.А. Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 26-31. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-26-31

Введение. Трубопроводные транспортные системы используют в различных областях хозяйственной деятельности и промышленного производства. Их применяют в энергетике, машиностроении, металлургии, химической отрасли, нефтегазовом комплексе. Эксплуатационные свойства таких сложных инженерных объектов зависят от их структуры, которая формируется на этапе проектирования с учетом ожидаемых характеристик системы в целом. Оценивая возможность повреждения сетевых структур трубопроводных систем в результате перехода в неработоспособное состояние

отдельных линейных элементов, следует отметить, что такого рода процессы могут быть связаны как с развитием внутренних процессов в системе, так и внешних причин. При возникновении и развитии аварийных ситуаций наблюдается, как правило, процесс последовательного перехода в неработоспособное состояние ряда трубопроводов, который может сопровождаться отключением части или всех потребителей от источника целевого продукта.

В дальнейшем процесс последовательного перехода линейных элементов (трубопроводов) системы в нера-

ботоспособное состояние, осуществляемый в случайном порядке, называется прогрессирующим повреждением [1]. Способность трубопроводной системы сопротивляться развитию процесса прогрессирующего повреждения зависит, прежде всего, от её сетевой структуры и характеризуется таким понятием как стойкость.

Стойкость структуры к развитию процесса прогрессирующего повреждения оценивается при помощи показателя стойкости F_w , который представляет собой среднюю долю от общего числа линейных элементов (трубопроводов), перевод которых в неработоспособное состояние сопровождается прекращением доставки целевого продукта всем потребителям.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей развития процесса прогрессирующего повреждения сетевых структур трубопроводных систем и разработка рекомендаций по обеспечению стойкости таких инженерных объектов.

Стойкость трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры

Определить значения показателя стойкости для заданной сетевой структуры аналитическим путем не представляется возможным. Это связано с необходимостью генерации случайной последовательности повреждения линейных элементов и оценкой результатов каждого акта повреждения с последующим формированием базы данных, необходимых для определения F_w . В то же время современные методы имитационного моделирования наилучшим образом приспособлены для решения подобного рода задач [2].

Так, при разработке компьютерной программы в системе MathCAD размеченный граф исходной сетевой структуры задавался с использованием матрицы смежности [3]. Каждый акт повреждения ребер графа, соответствующий переходу отдельного трубопровода системы в состояние неработоспособности, осуществлялся случайным образом, в соответствии с возможностями вычислительного комплекса MathCAD [4]. Последствия

повреждения элементов сетевой структуры оценивались с учетом наличия связей между источником и потребителями продукта при помощи матриц достижимости [5].

Полученный таким образом набор матриц достижимости использовался для определения доли линейных элементов, переход которых в состояние неработоспособности приводит к полному отключению от источника всех потребителей целевого продукта.

Многочисленное повторение указанного вычислительного алгоритма использовалась для формирования базы данных, необходимой для определения статистических характеристик случайной величины F_w .

В общем случае трубопроводы транспортной системы соединяют между собой различные точечные объекты, при этом множество всех линейных элементов можно разделить на 5 подмножеств, характеристики которых приводятся в табл. 1. Результаты проведенных исследований показывают, что элементы, принадлежащие различным подмножествам, оказывают разное влияние на стойкость функционирующей системы к прогрессирующим повреждениям.

Так, количественный состав подмножеств сетевой структуры показанной на рис. 1 приводится в табл. 2. Здесь же указаны и значения показателя стойкости F_w , установленные в результате имитационного компьютерного моделирования. При проведении исследований исходная сетевая структура SK (рис. 1) трансформировалась таким образом, что из её состава по очереди исключались элементы принадлежащие подмножествам $G1, \dots, G5$. У возникающих при этом сетевых объектов $SK1, \dots, SK5$ оценивались соответствующие значения F_w (табл. 2).

Полученный результат позволяет заключить, что наибольшее влияние на стойкость сетевой структуры к прогрессирующим повреждениям оказывают элементы подмножества $G1$. Элементы остальных подмножеств оказывают меньшее влияние, степень которого непрерывно убывает по мере перехода от $G2$ к $G3$ и далее от $G4$ к $G5$.

Результаты имитационного моделирования показывают, что установленные закономерности справедливы

Таблица 1. Обозначение подмножеств линейных элементов в составе сетевой структуры

Обозначение подмножества линейных элементов	Характеристики соединения точечных элементов	Условное графическое изображение элементов соответствующих подмножеств	Количество элементов подмножества в составе сетевой структуры
$G1$	Источник – потребитель		g_1
$G2$	Потребитель – потребитель		g_2
$G3$	Потребитель – распределительный узел		g_3
$G4$	Распределительный узел – распределительный узел		g_4
$G5$	Источник – распределительный узел		g_5

и для более сложных структурных объектов с большим числом потребителей и структурных элементов.

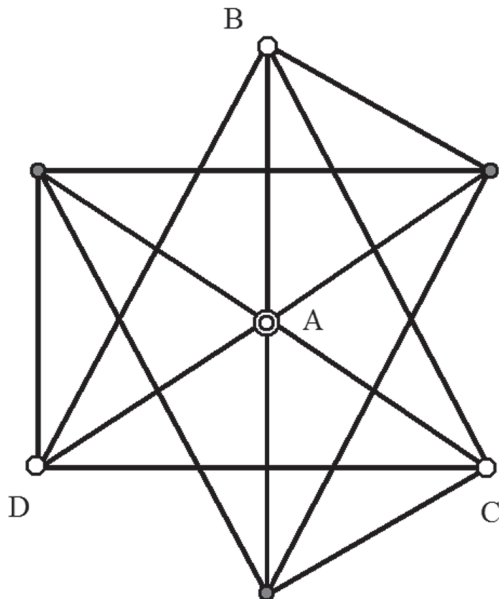


Рисунок 1 – Структурная схема системы с условным обозначением SK

В целом анализ полученных результатов позволяет установить наличие следующих закономерностей.

1. Наибольшее влияние на стойкость к повреждениям сетевой структуры оказывают элементы подмножеств $G1$ и $G2$. Эти элементы формируют своеобразное «ядро» сетевого объекта.

2. Наименьшее влияние на стойкость к повреждениям оказывают элементы принадлежащие подмножествам $G4$ и $G5$. Их можно рассматривать как своеобразную «дальнюю периферию» сетевой структуры.

3. Дальняя периферия взаимодействует с ядром при помощи элементов принадлежащих подмножеству $G3$. Их совокупность можно рассматривать как своеобразную «ближнюю периферию», обеспечивающую связь ядра с дальней периферией. Влияние элементов подмножества $G3$ на стойкость к повреждениям оказывается слабее, чем элементов, принадлежащих ядру, однако сильнее, чем элементов, принадлежащих дальней периферии.

Полученный результат позволяет заключить, что в общем случае строение трубопроводной системы можно

представить в виде некоторого многослойного объекта, схематично представленного на рис. 2.

В составе ядра находятся линейные элементы, связывающие между собой потребителей продукта и источник. При этом чем больше элементов будет в ядре, тем выше будет и стойкость сетевой структуры.

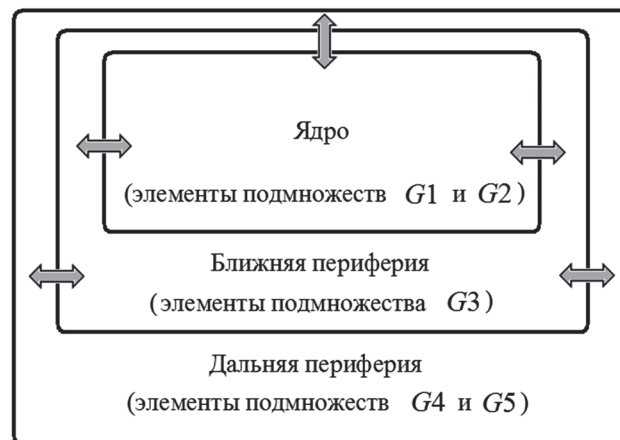


Рисунок 2 – Схематическое изображение трехслойного структурного объекта

Стойкость к прогрессирующим повреждениям сетевых структур, построенных на основе ациклических графов

Проектирование и изготовление трубопроводных транспортных систем во многих случаях связано с необходимостью распределения и доставки целевого продукта большому числу различных потребителей. При этом потребители продукта группируются определенным образом в соответствии с принятой технологической схемой. Например, распределительный центр в масштабе предприятия направляет целевой продукт в заданных объемах потребителям по отдельным цехам. В каждом цехе продукт распределяется по пролетам, участкам и отдельным рабочим местам (группам технологического оборудования).

Возможное распределение целевого продукта и схема его подачи отдельным потребителям, расположенным на различных технологических участках показаны на рис. 3. Сетевые структуры такого рода описываются при помощи ациклических графов называемых также «деревьями» [6].

Особенностью такого рода структур является то, что связь между любыми вершинами графа осуществляется

Таблица 2. Результаты моделирования процесса прогрессирующего повреждения для различных сетевых структур

Условное обозначение структуры	Состав сетевой структуры					Показатель стойкости F_w
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	
SK1	0	3	3	3	3	0,586±0,006
SK2	3	0	3	3	3	0,660±0,006
SK3	3	3	0	3	3	0,677±0,008
SK4	3	3	3	0	3	0,741±0,005
SK5	3	3	3	3	0	0,748±0,007

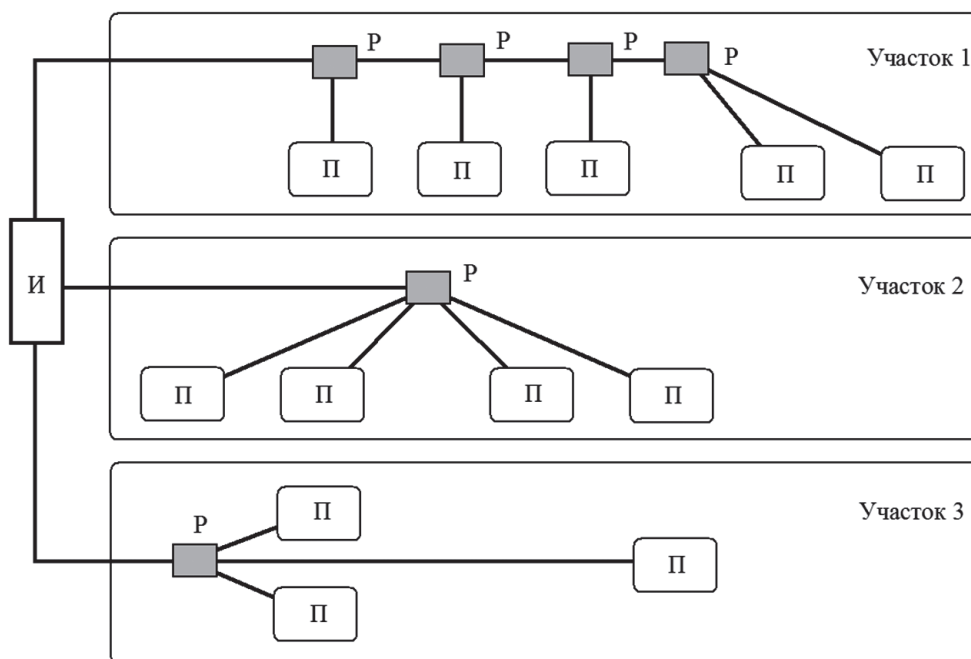


Рисунок 3 – Схема доставки продукта от источника (И) через распределители (Р) к отдельным потребителям (П)

единственным образом и только через определенные ребра. Другими словами из одной вершины попасть в другую можно единственным путем.

Использование уровней для характеристики «деревьев» позволяет установить соподчиненность отдельных элементов иерархической структуры и оценить их роль в процессе доставки целевого продукта потребителям.

Рассматривая объект типа «дерево» с точки зрения возможного развития процесса прогрессирующего повреждения можно утверждать, что такая структура является весьма уязвимой. Исключение из ее состава любого линейного элемента будет сопровождаться разделением сетевого объекта на отдельные части.

С практической точки зрения такого рода ситуация является весьма опасной, поскольку любое событие, связанное с переходом линейных элементов в состояние неработоспособности, будет сопровождаться отключением от источника как минимум одного потребителя продукта. Это означает, что структуры типа «дерево» характеризуются низким уровнем стойкости к прогрессирующим повреждениям.

В этой связи требуется оценить стойкость к прогрессирующим повреждениям сетевых структур построенных на основе ациклических графов, а также установить возможность и эффективность реализации различных мероприятий, направленных на повышение значений F_w .

Рассмотрим свойства сетевой структуры трубопроводной транспортной системы, построенной на основе дерева и показанной на рис. 4. Эта структура характеризуется следующим составом: $g_1 = 0$; $g_2 = 0$; $g_3 = 12$; $g_4 = 6$; $g_5 = 3$.

Её представление в форме многослойного объекта показано на рис. 5. Видно, что у этого структурного

образования полностью отсутствуют элементы ядра. По этой причине ожидать высоких значений показателя стойкости к прогрессирующим повреждениям у такого объекта не следует.

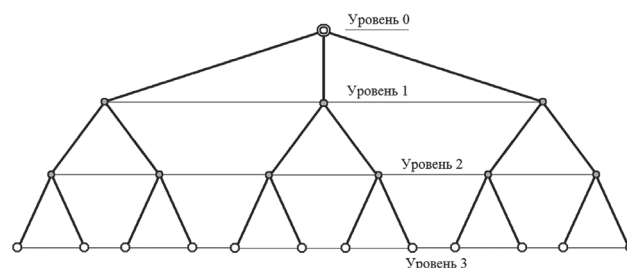


Рисунок 4 – Схема сетевой структуры, построенной на основе «дерева»

Указанная особенность приводит к тому, что исключение из состава объекта одного или нескольких линейных элементов сопровождается существенным уменьшением эксплуатационных возможностей всей системы. При этом из-за иерархического характера связей между отдельными узлами наиболее опасным оказывается повреждение элементов, принадлежащих подмножествам G_5 и G_4 .

Выполнение процедуры имитационного моделирования процесса прогрессирующего повреждения для рассмотренной структуры типа «дерево» позволяет установить значение: $F_w = 0,291$. Повысить значение F_w наиболее эффективным образом можно, сформировав ядро сетевого объекта.

На практике это означает необходимость введения дополнительных линейных элементов между источником и каждым потребителем. Однако при наличии большого

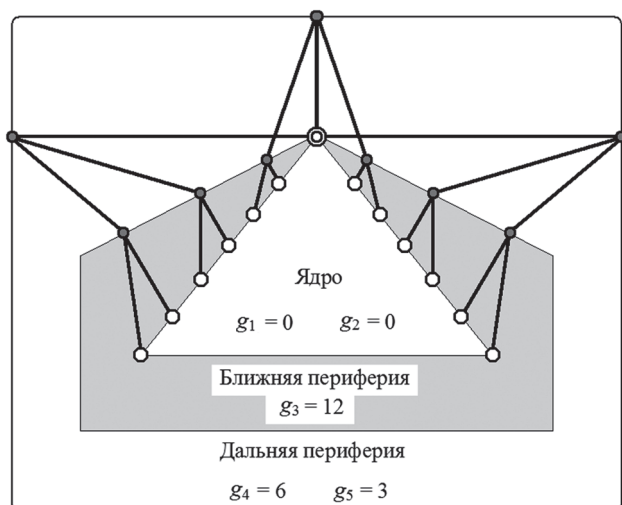


Рисунок 5 – Представление сетевой структуры в виде многослойного объекта

числа потребителей целевого продукта реализовать такое решение весьма проблематично.

Кроме того, возможно установление связей между парами узлов-потребителей продукта. Здесь наиболее приемлемым с практической точки зрения оказывается вариант соединения между собой отдельных потребителей. Это приводит к необходимости добавления в состав показанной на рис. 4 структуры 11-ти элементов подмножества G_2 , соединяющих между собой потребителей, расположенных на уровне 3. Имитационное моделирование процесса прогрессирующего повреждения такого объекта позволяет получить следующее значение показателя стойкости: $F_w = 0,447$.

Видно, что использование простейшего метода повышения значения F_w для структуры типа дерево оказывается достаточно эффективным и приводит к росту значений показателя стойкости примерно на 54%.

Если такой рост оценивается как недостаточный, то резервы для повышения значений F_w существуют и связаны с возможностью использования перечисленных ранее мероприятий.

Однако здесь следует иметь в виду, что образование новых связей будет сопровождаться как увеличением количества линейных элементов, так и общего уровня сложности всей трубопроводной системы. По этой причине принятие окончательного варианта в любом случае оказывается результатом компромиссного решения.

Рассмотрим теперь структурную схему трубопроводной системы с топологией «шина» (рис. 6), которая является частным случаем ациклического графа. Такой сетевой объект может быть представлен как многоуровневый со структурой типа «дерево» со следующими характеристиками состава: $g_1 = 0$; $g_2 = 0$; $g_3 = 5$; $g_4 = 3$; $g_5 = 1$.

Видно, что у рассматриваемого объекта отсутствуют элементы, образующие ядро. Эта особенность приводит к возникновению низких значений показателя стойкости к прогрессирующим повреждениям.

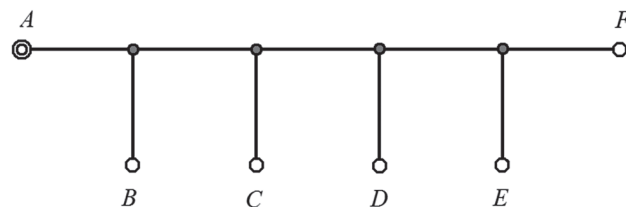


Рисунок 6 – Схема соединения элементов системы в соответствии с топологией «шина»

Так, в результате имитационного моделирования процесса повреждения, получено следующее значение показателя стойкости: $F_w = 0,259$. Это означает, что для прекращения доставки целевого продукта всем потребителям необходимо перевести в состояние неработоспособности в среднем около 26% от общего числа трубопроводов системы.

Для повышения стойкости к прогрессирующим повреждениям можно соединить всех потребителей целевого продукта при помощи линейных элементов, так как это показано на рис. 7.

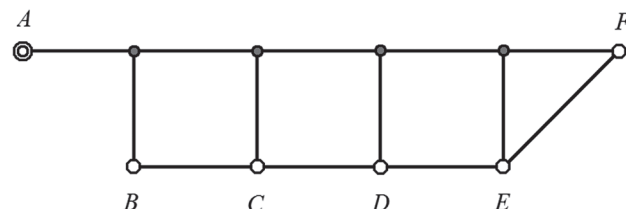


Рисунок 7 – Схема сетевой структуры с соединенными между собой потребителями целевого продукта

Моделирование процесса прогрессирующего повреждения позволяет для такой структуры получить значение $F_w = 0,369$, которое на 42% выше, чем установленное ранее для сетевой структуры с топологией «шина».

В случае необходимости возможно принятие и иных решений, направленных на повышение значений F_w . Кроме того, все рекомендации, сделанные ранее и связанные с обеспечением стойкости структур построенных на основе ациклических графов, остаются справедливыми в отношении сетевых структур с топологией «шина».

Выводы

1. Установлено, что стойкость сетевых структур трубопроводных транспортных систем к развитию процесса прогрессирующего повреждения зависит от их состава, а множество всех трубопроводов можно условно разделить на 5 подмножеств, элементы которых в различной степени влияют на стойкость к повреждениям всей системы.

2. В общем случае сетевая структура трубопроводной системы может быть представлена в виде многослойного объекта с ядром, ближней и дальней периферией. Установлено, что стойкость к повреждениям в значительной мере зависит от количественного состава и возможного взаимодействия элементов отдельных слоев.

3. Показано, что сетевые структуры типа «дерево» характеризуются низким уровнем стойкости к прогрессирующим повреждениям. Повысить показатель стойкости таких объектов можно путем формирования ядра и введения в состав системы дополнительных линейных элементов.

Библиографический список

1. Тарарычкин И.А. Структурный синтез трубопроводных транспортных систем, стойких к повреждениям линейных элементов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. №. 1 (107). С. 96 – 106.

2. Строгалева В.П. Имитационное моделирование / В.П. Строгалева, И.О. Толкачева. 2-е изд. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 295 с.

3. Басакер Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т.Саати. М.: Наука, 1973. – 368 с.

4. Охорзин В.А. Компьютерное моделирование в система Mathcad: учеб. пособие / В.А. Охорзин. М.: Финансы и статистика, 2006. – 144 с.

5. Кристофиденс Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофиденс. М.: Мир. 1978. – 432 с.

6. Зыков А.А. Основы теории графов / А.А.Зыков. М.: Вузовская книга. 2004. – 664 с.

Сведения об авторах

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

Поступила 25.01.2017

Основные определения надежности представителей интенсивных профессий

Николай И. Плотников, Акционерное общество научно-исследовательский проектный институт гражданской авиации «АвиаМенеджер», Новосибирск, Россия



Николай И.
Плотников

Резюме. Актуальность проблемы. Проектирование деятельности представителей интенсивных (экстремальных) профессий вызывается необходимостью выхода в пространство новых и ранее неизвестных техносферных областей жизнедеятельности. В истории авиации вопросы критической важности и вычисления необходимых и достаточных свойств пилота и летного экипажа являются предметом непрекращающихся поисков и исследований в целях нормативного регулирования в эксплуатации воздушного транспорта. До настоящего времени остаются неопределенными предметные знания, теория и методы, которые могли бы учитывать различия свойств для стандартизации в управлении летной эксплуатацией. Данные проблемы неопределенности предметных знаний и дефицит методов вычисления характеристик пилотов и экипажей воздушных судов гражданской авиации рассматриваются как чрезвычайно острые, не решенные в эксплуатации воздушного транспорта гражданской авиации. Таким образом, свод проблем, необходимость поиска и создания новых знаний состоит в ограничении доступных теорий и методов формализации, вычисления свойств и управления надежностью человека. Актуальность темы отражена в фундаментальных исследованиях и прикладных разработках многочисленных трудов отечественных и зарубежных ученых. В настоящей работе представлены основные определения надежности представителей интенсивных профессий на примере пилота гражданской авиации. Постановка задачи надежности пилота. Универсальным основанием деления объема понятия надежности человека-оператора (пилота) является шкала времени. Основное свойство деятельности человека называется категория назначения. Назначения можно оценивать в структурированном родовидовом делении понятии надежности. Техническое содержание категории назначения структурируется при установлении задаваемого номинального описания объектов: пилота (П), транспортного средства или воздушного судна (ВС) и избранной среды деятельности (С). В работе выполнена формализация постановки задачи надежности деятельности человека. Аксиоматика свойств ресурсов пилота. Разнообразная природа свойств человека составляет фундаментальную проблему их описания и нормирования для выработки стандартов деятельности. Свойства обладают сходством и взаимоподобием, различием и независимостью. В настоящей работе формулируется аксиомы как исходные положения разрабатываемой теории ресурсов человека. Положения постулируются аксиомами равнозначности, независимости и полноты свойств, параметров и показателей ресурсов пилота. Практическое значение аксиоматики свойств ресурсов пилота состоит в том, что их формализованное описание дает возможность получить алгоритмы для автоматизированных и экспертных технологий управления летной эксплуатацией. Далее представлены формализации определений надежности. Заключение. Теоретические определения эффективности управления и гарантированной эффективности управления устанавливают понятия различимости пространства благоприятных исходов деятельности. Аксиоматика свойств пилота позволяет преодолеть фундаментальную сложность формализованного описания разнообразной природы свойств человека и создает условия для достоверного учета и вычислений состояний для целей управления летной эксплуатацией. Формулируются определения назначения пилота, надежности пилота и определения надежности трех различных видов – индивидуальной, профессиональной, операционной на основании фундаментальной базы наблюдения во времени.

Ключевые слова: пилот, назначение, эффективность управления, гарантированная эффективность управления, индивидуальная надежность, профессиональная надежность, операционная надежность.

Формат цитирования: Плотников Н.И. Основные определения надежности представителей интенсивных профессий // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 32-37. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-32-37

1. Введение

В истории авиации вопросы критической важности и вычисления необходимых и достаточных свойств пилота и летного экипажа являются предметом непрекращающихся поисков и исследований в целях нормативного регулирования в эксплуатации воздушного транспорта.

Предмет надежности человека (пилота) и групп (экипажа) в современных исследованиях имеет характер представлений и ограничивается статистическими и эмпирическими оценками. Сформированная теория надежности сложных объектов, человека и групп людей, аналогичная теории надежности техники, в настоящее время отсутствует, поэтому существует актуальность ее разработки. Надежность деятельности человека и технического объекта имеют одинаковый U-образный профиль жизненного цикла [1, 2]. Поэтому теория надежности технических объектов может обоснованно использоваться в разработке теории организационных объектов и человека. Показатели надежности человека имеют отличающуюся природу, динамику, интенсивность изменений во времени.

Проблема описания деятельности пилота состоит в отсутствии единого понятия, которое определяет основание деятельности. Существует многочисленный перечень понятий, который используют для описания свойства деятельности человека: профессионализм, профессиональная пригодность, годность, готовность, подготовка, подготовленность, надежность, ответственность, трудоспособность, работоспособность, специальность, квалификация, опыт [3, 4]. В целом, обилие понятийных описаний возможно рассматривать как проблему идентификации предмета деятельности.

Конкурентная среда открытого мирового рынка воздушных перевозок активно направлена против нормативного регулирования и стандартизации деятельности авиапредприятий. Авиакатастрофы последних десятилетий выявляют основные причины – дефицит профессиональных свойств и перегрузки состояний рабочей нагрузки летных экипажей, в условиях которых совершаются полеты гражданской авиации [5]. Данная ситуация создана не только коммерческим прессингом, но и критическим недостатком научно обоснованных методов управления летной эксплуатацией в части человеческих ресурсов.

В соответствии с вышеизложенным, свод проблем, необходимость поиска и создания новых знаний состоит в ограничении доступных теорий и методов формализации, вычисления свойств и управления надежностью человека. Актуальность темы отражена в фундаментальных исследованиях и прикладных разработках многочисленных трудов отечественных и зарубежных ученых [6, 7, 8]. В настоящей работе представлены основные определения надежности представителей интенсивных профессий на примере пилота гражданской авиации.

2. Логические основания теории профессиональной деятельности

В теории деятельности различают род и виды занятий, которые могут выполнять все или большинство индивидов общества и профессии, к которым предъявляются особые требования [3]. Профессии с особыми требованиями, подобные профессии пилота гражданской авиации, в настоящей работе называются интенсивными (экстремальными, чрезвычайными). Проектирование деятельности представителей данных профессий вызывается необходимостью выхода в пространство новых, ранее неизвестных техносферных областей жизнедеятельности или имеющих постоянную критическую ответственность за исход деятельности.

Установление свойства любого объекта материального или нематериального, искусственной или естественной природы является нетривиальной задачей. Эту задачу мы структурируем следующим образом: а) поиск понятия, наиболее обобщающего и соответствующего свойству объекта; б) поиск и установление необходимого основания структурирования и наблюдения (измерения, оценивания) свойства; в) установление термина, наиболее соответствующего состояниям (изменениям) свойства.

Сделаем пояснения данной задачи в содержании теории понятия (раздел логики). Каждое понятие имеет объем и содержание. Оценка абстрактных понятий (категорий) осуществляется следующим аксиоматическим эвристическим постулированием: а) оценка вида понятия по объему и б) установление основания его деления, в) содержание и наличие признаков, г) установление отношений понятий [9, 10].

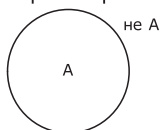
Логическая классификация понятий. «Совокупность единичных понятий (или единичных представлений), обозначающих эти предметы, называется объемом понятия». Пример: в объем понятия «полет» входит совокупность единичных понятий «самолет», «птица». «Совокупность мыслимых в понятии признаков, тождественных во всех особях класса, называется содержанием общего понятия» [11, с. 92]. Пример: понятие класса «полет» содержит признаки перемещения в трехмерном пространстве для всех объектов (особей): летательных аппаратов, воздушных судов, птиц. Объем и содержание понятия находятся в обратной зависимости: обогащая содержание, уменьшают объем и наоборот. Закон работает для согласимых понятий, когда признак свойственен части объема исходного понятия и для понятий, связанных родовидовыми отношениями.

Виды понятий по объему. Единичное понятие содержит один предмет или элемент: «Аэрофлот», «Delta Airlines». Единичные понятия и представления объема не имеют, так как означают один предмет, а не класс предметов. Единичные понятия имеют содержание, поскольку обладают не менее чем одним признаком. Общее понятие содержит несколько или множество предметов – «аэропорт», «авиакомпания». Общие понятия могут быть регистрирующими и бесконечными. В регистрирующих

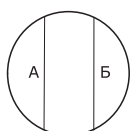
ЛОГИЧЕСКИЕ ОТНОШЕНИЯ ПОНЯТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Несогласимые
(противоположные)

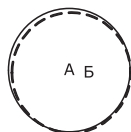
Противоречание

А – пилот
Б – «непилот»

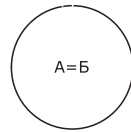
Противные

А – опасный
Б – безопасный

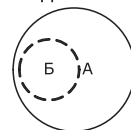
Согласимые

Равнозначные
(тождественные)А – авиакомпания
Б – авиаперевозчик

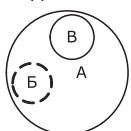
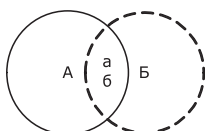
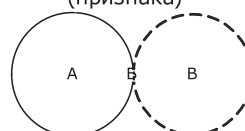
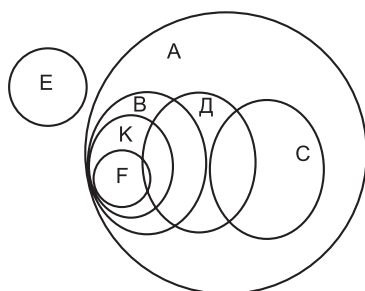
Совпадающие

А – сын, Б – внук
объемы одинаковые,
содержания разные

Подчинение

А – капитан
(подчиняющее)
Б – 2-й пилот
подчиненное

Соподчинение

А – авиатор
Б – пилот
В – авиадиспетчерПерекрещивание
(части объемов)А – пилот
Б – капитанПерекрещивание
(признака)А – опасность
Б – безопасность
В – защищенность

Пример соотношений согласимых понятий

А – летательный аппарат
 В – воздушное судно
 С – вертолет
 Д – двигатель
 Е – пилот
 F – ИЛ-62
 К – дальнемагистральный самолет.

Рисунок 1 – Логические отношения между понятиями безопасности

понятиях множество элементов может учитываться и может быть зафиксировано, например, «полет». В бесконечных понятиях множество элементов не ограничено, не поддается учету и имеет бесконечный объем. Например, «авиация». Пояснения излагаемого содержания представлено на схеме (Рисунок 1).

Виды понятий по содержанию. По содержанию различают четыре пары понятий. Абстрактное (отвлеченное) обозначает отвлеченно-идеальное бытие, признаки предмета образуют самостоятельный объект мышления, мысль без наличия объекта, например – «риск», «безопасность». Конкретное понятие обозначает реальный объект, например – «самолет», «авиация» (совокупность исчисляемых реальных объектов). Понятия подвергаются обобщению или ограничению. Общие понятия могут быть и конкретными, и абстрактными. Например, понятие «пилот» является общим и конкретным, а понятие «пилотирование» общим и абстрактным. Положительными называются понятия при наличии свойств предмета, отрицательными – при отсутствии свойств предмета. Пример: «опасность» – «безопасность». В сосуществующих понятиях мыслятся предметы, называющие существование другого, например, «пилот» – «летательный аппарат». В независимых понятиях предметы мыслятся отдельно: «город», «лес».

Собирательное понятие, состоящее из предельного набора однородных объектов как целое, например, «флот», «экипаж», «авиаэскадрилья». Несобирательные понятия, обозначают неисчисляемый единый объект – «небо», «безопасность», или исчисляемое единство разнородных объектов – «авиация».

Как показано в работе [12], основное свойство деятельности пилота называет категория назначения (как способность управления летательным аппаратом в трёхмерном пространстве). Положение наблюдателя, определяющее наилучшую различимость свойств объекта, называется базой наблюдения. Существует разнообразие видов базы наблюдения: время, пространство, группы и их комбинации: время-пространство, время-группа, пространство-группа. Наиболее универсальными основаниями наблюдения являются абстрактные понятия или категории – пространство и время (Дж. Клир) [13]. Поэтому основанием деления объема понятия надежности человека-оператора (пилота) в настоящей работе принята шкала времени. Именно свойство назначения, по нашему мнению, можно оценивать в структурированном родовидовом делении состояний надежности: индивидуальной, профессиональной, операционной. Данное деление дает возможность обосновать представленный ниже вывод определений.

3. Общая постановка задачи вычисления надежности свойств и состояний пилота

Техническое содержание категории назначения структурируется при установлении задаваемого номинального описания объектов: пилота (П), транспортного средства или воздушного судна (ВС) и избранной среды деятельности (С) трехмерного воздушного пространства. Признаки наблюдения объектов становятся возможными при установлении следующих четырех типов субъект-объектных отношений: самонаблюдение пилотом собственной деятельности $П \rightarrow П$; наблюдение пилотом воздушного судна $П \rightarrow ВС$; наблюдение пилотом среды $П \rightarrow С$; наблюдение пилотом взаимовоздействия воздушного судна и среды $П \rightarrow (ВС \leftrightarrow С)$. Совокупность данных объектов и отношений является общей задачей назначения деятельности пилота в полете $A_{ном}$:

$$A_{ном} = \left\{ \begin{array}{l} П \rightarrow П \\ П \rightarrow ВС \\ П \rightarrow С \\ П \rightarrow (ВС \leftrightarrow С) \end{array} \right\}.$$

Заданный назначением полет является процессом $П_{пол}$ с конечной суммой n операций, составленных из: (1) предписанных стандартами $П_{см}$, (2) неизвестными заранее отклонениями от плана полета по производственным условиям $П_{пр}$, (3) случайными изменениями параметров полета $П_{сл}$. Параметры операций (1) и (2) являются параметрами назначения. Параметры операций (3) пилот формирует по анализу величин отклонений $\Delta\omega$ параметров от номинальных $\omega_{ном}$:

$$П_{пол} = n \sum_{i=1}^{\omega} (\omega_{ном} - \Delta\omega) V_{\omega_i},$$

где V_{ω_i} – скорость изменений параметров, $d\omega/dt$.

В соответствии организационной теорией [14], деятельность пилота описывается множеством A допустимых действий $y=(y \in A)$. Результатом деятельности называем $z \in A_0$, где A_0 – множество допустимых результатов. Связь между $(y \in A)$ и $(z \in A_0)$ нечеткая и неопределенная. Пилот может сравнивать результаты, обладая предпочтениями $R_{A_0} \in$, где R_{A_0} – предпочтения, $\mathfrak{R}_{A_0}$ – множество возможных предпочтений. Возможному R_{A_0} ставится во взаимно однозначное соответствие значение параметра $r \in \Omega$ из подмножества Ω действительной оси $\mathfrak{R}^1$. При выборе действия $y \in A$ пилот руководствуется а) своими предпочтениями и б) влиянием (оцениванием) выбираемого действия на результат деятельности $z \in A_0$. Совокупность (а) и (б) составляет некоторый закон $W(\cdot)$, характеризующий ситуацию, информацию которой отражается переменной I . Выбор действия определяется правилом индивидуального рационального выбора, которое диктуется стандартами летной эксплуатации, профессиональным опытом и выделяет множество предпочтительных действий:

$$P^{W_i}(\mathfrak{R}_{A_0}, A, I) \subseteq A.$$

Целевая функция управляющих воздействий $u \in U$ равно:

$$K(B) = \max_{y \in P(u)} f_0(u, y).$$

D 1. Величина $K(u)$, $u \in U$ называется эффективностью управления.

D 2. Если действия пилота осуществляются на наименее предпочтительный выбор в пространстве благоприятных исходов деятельности, то величина $K(u)$, $u \in U$ называется гарантированной эффективностью управления:

$$K(u) = \min_{u \in U} f_0(u, y).$$

Таким образом, задача управления формулируется: найти допустимые действия в пространстве благоприятных исходов, которые ведут к наилучшим результатам, то есть к оптимальному управлению: $K(u) \rightarrow \max$. Показанная модель управления в настоящей работе является первоначальным представлением (постановкой) для проектирования ресурсного комплекса надежности пилота. Последующая формализация для целей вычисления свойств и состояний ресурсов человека в данном классе задач теории деятельности аппаратом классической теории множеств не представляется возможной. Задача формализована в псевдофизической модели деятельности – отношений действий и исходов (действий), содержание которой изложено в [4, 14].

4. Аксиоматика свойств ресурсов пилота

Разнообразная природа свойств человека составляет фундаментальную проблему их описания и нормирования для выработки стандартов деятельности. Свойства обладают сходством и взаимоподобием, различием и независимостью. Например, различные и независимые свойства, такие как профессиональный опыт, социальная зрелость, возраст человека сходны, взаимоподобны и соразмерны по величине во времени жизни. Сходство свойств позволяет преодолевать указанную проблему путем выбора ограниченного количества свойств. Взаимоподобие свойств дает возможность по данным известных величин показателей и параметров устанавливать значения величин неизвестных показателей и параметров, в которых исследуемые характеристики рассматриваются «изолированно от всех остальных» [13, с. 348-354]. Обоснованием могут быть теоретические постулаты и аксиомы. В настоящей работе впервые постулируются аксиомы как исходные положения новой ресурсной теории деятельности человека.

Логические выводы предлагаемых аксиом взаимосвязаны. Истинность совокупности умозаключений основывается на их непротиворечивости. Аксиомы выводятся из опыта (эмпирического наблюдения), форму-

лируются путем эвристических высказываний, правдоподобных суждений и умозаключений. Нижеследующие положения постулируются аксиомами равнозначности, независимости и полноты свойств, параметров и показателей ресурсов пилота. Практическое значение аксиоматики свойств ресурсов пилота состоит в том, что их формализованное описание дает возможность получить алгоритмы для автоматизированных и экспертных технологий управления летной эксплуатацией.

Выдвигаемая аксиоматика свойств объекта нечисловой природы (человека) и сложного объекта формально отображается мерами упорядоченности, непрерывности и расстояния. Свойства обладают частичной упорядоченностью Q множества и определяется как бинарное отношение на множестве состояний или параметрическом множестве: $Q \subset V_i + V_i$ и удовлетворяет следующим требованиям: рефлексивность $(x, y) \in Q$; антисимметричность при $(x, y) \in Q$ и $(y, x) \in Q$, то $x = y$; транзитивность – если $(x, y) \in Q$ и $(y, z) \in Q$, то $(x, z) \in Q$; если $(x, y) \in Q$, то x называется предшественником y , а y называется преемником x ; если $(x, y) \in Q$ и не существует $z \in Q$, такого, что $(y, z) \in Q$ и $(z, x) \in Q$, то x называется непосредственным предшественником y , а y – непосредственным преемником x ; связность – для всех $x, y \in V_i$ если $x \neq y$, то $(x, y) \in Q$ или $(y, x) \in Q$.

Аксиоматика свойств дает возможность осуществлять упрощение проектирования и относительно простые расчеты в принятых шкалах и единицах во времени как показано в [11]. Комплекс ресурсов пилота, разработанный на основаниях изложенной аксиоматики свойств, впервые дает возможность получить алгоритмы для автоматизированных и экспертных систем управления [14].

5. Вывод определений ресурсов (состояний) надежности пилота

Ресурс назначения определяется понятием надежности.

Д 3. Способность управлять летательным аппаратом в трехмерном воздушном пространстве называется ресурсом назначения пилота.

Д 4. Надежностью называем совокупность свойств и состояний объекта в метрике нормативного пространства деятельности.

В работах [4, 14] представлено структурирование надежности в трех видах: ресурсы индивидуальной надежности (РИН), ресурсы операционной надежности (РОН), ресурсы профессиональной надежности (РПН). Обоснованием решения является единое основание – различимость каждой из групп ресурсов во *времени*.

Д 5. *Индивидуальная надежность* – совокупность эволюционных видовых биологических свойств человека в среде обитания. Индивидуальная надежность обладает значением видовой эволюции, бесконечно превышающей продолжительность жизни конкретного человека.

Д 6. *Профессиональная надежность* – совокупность обретаемых в профессии свойств человека в избранной среде деятельности. Профессиональная надежность обладает значением продолжительности трудовой занятости человека примерно в период от 20 до 60 лет.

Д 7. *Операционная надежность* – совокупность условий и состояний полета, задаваемых для реализации организованной деятельности в избранной среде назначения. Операционная надежность наблюдается в операционный период одного года.

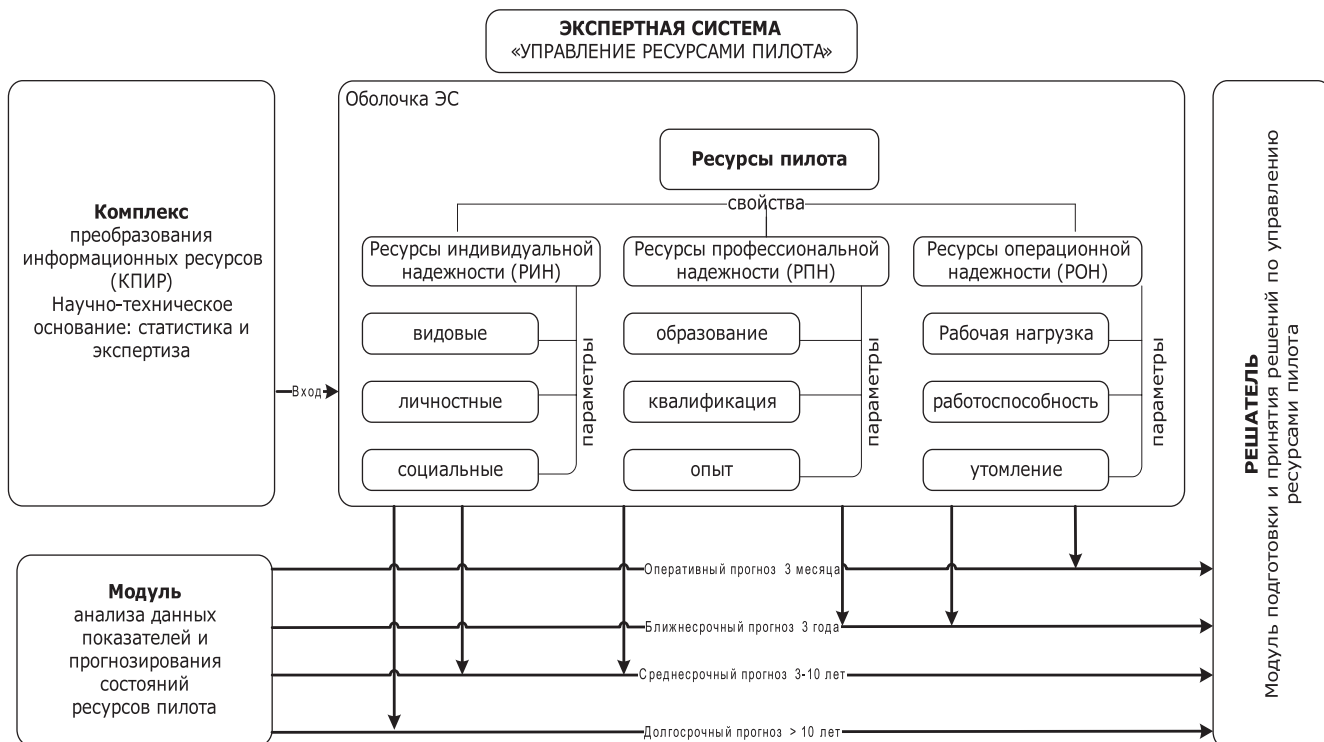


Рисунок 2 – ЭС «Управление ресурсами пилота»

6. Выводы

Категория назначения деятельности называет предмет того, ЧТО именно осуществляется в целесообразной деятельности, а категория надежности называет КАК наблюдать (измерять, оценивать) предмет.

Дальнейшей задачей является детальная разработка категорий назначения и надежности в лингвистическом, онтологическом и техническом содержании. Задача лингвистического анализа необходима для установления предметной семантики слов. Онтологическая задача устанавливает предметную область и субъектно-объектные отношения.

Техническое содержание определяет термины, структуру деятельности и метод наблюдения предмета. Данный подход составляет основу представляемого метода технического моделирования деятельности пилота и реализации проекта вычисления и управления [15].

Теоретические определения эффективности управления и гарантированной эффективности управления устанавливают понятия различимости пространства благоприятных исходов деятельности.

Теоретические основания и выводимые определения позволяют осуществлять разработки экспертных систем и автоматизированных систем прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок [15] (Рисунок 2).

Аксиоматика свойств пилота позволяет преодолеть фундаментальную сложность формализованного описания разнообразной природы свойств человека и создает условия для достоверного учета и вычислений состояний для целей управления летной эксплуатацией.

Формулируются определения назначения пилота, надежности пилота и определения надежности трех различных видов – индивидуальной, профессиональной, операционной на основании фундаментальной базы наблюдения во времени.

Таким образом, могут быть созданы новые основания для теории деятельности и выполнена формализация постановки задачи свойства деятельности человека любой специальности. Для представителей интенсивных профессий категория надежности может быть универсальной. Для представителей образования, науки – возможно, другие понятия – компетентность, квалификации. Для профессий физического труда – производительность, эффективность.

Библиографический список

1. ГОСТ-Р 53480-2009. – Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010.
2. Головкин А.М. Основы теории надежности. Практикум / А.М. Головкин, С.В. Гуров. – СПб, ПХВ Петербург. – 2006, 560 с.: ил.
3. Бодров В.А. Психология и надежность: человек в системах управления техникой / В.А. Бодров, В.Я. Орлов. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 1998. – 288 с.

4. Плотников Н.И. Ресурсы пилота. Надежность. Монография / Н.И. Плотников. – Новосибирск: ЗАО ИПЦ «АвиаМенеджер», 2013. – 264 с. Скачать: http://aviam.org/images/sampled_data/book/2015_prd.pdf

5. Авиационные происшествия, инциденты и авиакатастрофы в СССР и России. факты, история, статистика <http://airdisaster.ru/>.

6. Wiener E. L., Kanki B.G., Helmreich R.L. Cockpit Resource Management. – N.Y., USA: Academic Press. – 1993. – 519 p.

7. Махутов Н. А. Безопасность России. Том 2. Безопасность и защищенность критически важных объектов. В 2 ч. Часть 1 / Н. А. Махутов, М. И. Фалеев, В. А. Пучков. – М: МГФ Знание, 2012. – 896 с.

8. Иванов А.И. Методологические основы испытаний сложных систем. Безопасность полетов летательных аппаратов при испытаниях и учениях разнородных сил / А.И. Иванов, А.С. Иванющенко, С.Р. Нарбут, Н.И. Перевозчиков, Н.Е. Соловцов, Б.Ф. Чельцов. – М.: 2003. – 728 с.

9. Гетманова А.Д. Учебник по логике. 2-е изд. / А.Д. Гетманова – М.: «ВЛАДОС», 1995. – 303 с.

10. Гончаров С.С. Введение в логику и методологию науки / С.С. Гончаров, Ю.Л. Ершов, К.Ф. Самохвалов. – М.: Интерпракс, Новосибирск: Институт математики СО РАН, 1994. – 256 с.

11. Лосский Н.О. Логика / Н.О. Лосский. – Обелиск, 1923. – 168 с.

12. Плотников Н.И. Основания теории надежности человека-оператора (пилота) / Н.И. Плотников // Надежность. – 2015. – № 2 (53). – С. 90-93.

13. Клир Джордж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.

14. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 2-е изд / Д.А. Новиков. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.

15. Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок. Промежуточный, этап № 4: «Адаптация разработанных алгоритмов и программных средств АС». – Научно-технический отчет, шифр «2010-218-02-068», № госрегистрации 01201150118 от 12.01.2011, Инв. № 194. – Ульяновск. – 2012. – 1340 с. / Н.И. Плотников – Раздел 3. Метод оценки рисков для безопасности полетов авиакомпании на основе управления и прогноза ресурсов пилота. – С. 154-238, 1048-1258.

Сведения об авторах:

Николай И. Плотников, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, генеральный директор, Акционерное общество научно-исследовательский проектный институт гражданской авиации «АвиаМенеджер», Новосибирск, Россия, e-mail: am@aviam.org

Поступила 07.08.2017

Возможные пути повышения надёжности профессионального психологического отбора диспетчеров управления воздушным движением

Ольга В. Ариничева, кафедра «Лётная эксплуатация и безопасность полётов в гражданской авиации», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Санкт-Петербург, Россия

Алина Е. Герасименкова, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Санкт-Петербург, Россия

Алексей В. Малишевский, кафедра «Лётная эксплуатация и безопасность полётов в гражданской авиации», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Санкт-Петербург, Россия

Михаил Г. Чепик, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Санкт-Петербург, Россия



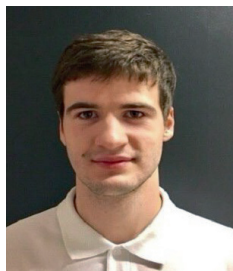
Ольга В.
Ариничева



Алина Е.
Герасименкова



Алексей В.
Малишевский



Михаил Г. Чепик

Резюме. Цель. В данной работе исследован один из возможных путей повышения надёжности профессионального психологического отбора диспетчеров управления воздушным движением с использованием диагностических методик, базирующихся не на субъективных, а на объективных принципах. **Методы.** В исследовании были использованы: стационарный EyeTrackerTobii REX и специальный компьютерный продукт, созданный во Всероссийском научно-исследовательском институте радиоаппаратуры и предназначенный для анализа различных аспектов перемещения взгляда в процессе выполнения заданного упражнения, а также целый ряд психодиагностических методик: тест для определения уровня субъективного контроля, опросник А. Басса – А. Дарки для определения склонности к различным формам агрессивного поведения, социометрический тест «ММ-1», тест Г. Ю. Айзенка для оценки уровня интеллекта, тест Г. Ю. Айзенка ЕРІ для определения темперамента, тест «ММЯ-1» для определения общего стиля поведения, опросник К. Томаса для определения стиля поведения в конфликте и опросник «Прогноз» для оценки нервно-психической устойчивости участников эксперимента. Для статистической обработки результатов исследования были использованы коэффициент корреляции Браве-Пирсона и критерий χ^2 -Пирсона. **Результаты.** В эксперименте приняло участие 48 студентов третьего курса специализации «Использование воздушного пространства» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУ ГА). По своим психологическим характеристикам группа достаточно типична для представителей данной специализации СПбГУ ГА. Результаты психодиагностики коррелируют с результатами данного эксперимента достаточно слабо, а между собою, в целом, в соответствии с теоретическими предположениями. Чем ниже нейротизм, характеризующий уравновешенность нервной системы, тем лучше нервно-психическая устойчивость. Чем лучше нервно-психическая устойчивость, тем выше интернальность любого вида, особенно же общая интернальность и интернальность в области неудач. Также люди с хорошей нервно-психической устойчивостью менее склонны к агрессивному поведению, как в целом по всем её видам, так и, в особенности, к аутоагрессии. Участники с высоким уровнем общей интернальности ожидаемо оказались категорически не склонны к такому типу поведения в конфликте, как «избегание», которое является квинтэссенцией безответственности. Также люди с высоким уровнем интернальности оказались не склонны и к агрессивному поведению. По результатам эксперимента выявлены достаточно противоречивые закономерности в перемещениях взгляда у испытуемых. **Выводы.** Все полученные результаты представляют определённый интерес. Поэтому, невзирая на некоторую их противоречивость, представляется целесообразным продолжать исследования с использованием прибора EyeTrackerTobii REX. Выявленные слабые стороны в организации эксперимента, позволили скорректировать план дальнейших исследований, базирующихся на использовании аппаратуры EyeTrackerTobii REX и направленных на повышение надёжности профессионального психологического отбора.

Ключевые слова: профессиональный психологический отбор, управление воздушным движением, надёжность, ай-трекер, нервно-психическая устойчивость, коэффициент интеллекта, темперамент.

Формат цитирования: Ариничева О.В., Герасименкова А.Е., Малишевский А.В., Чепик М.Г. Возможные пути повышения надёжности профессионального психологического отбора диспетчеров управления воздушным движением // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 38-45. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-38-45

Введение. Эффективность системы организации воздушного движения определяется ее совершенством, надежностью и безотказностью технических средств, профессиональной подготовкой диспетчеров, организацией, дисциплиной и профессиональной подготовкой обслуживающего персонала. Эффективность зависит от показателей качества функционирования названных составных – точности, надежности и полноты отображения информации о состоянии воздушного пространства, объема выполняемых задач и др. [1].

Человеческий фактор – это главный из факторов, оказывающих негативное влияние на безопасность воздушного движения. В мире ежегодно происходит ряд опасных инцидентов, связанных с организацией воздушного движения (ОрВД). Так, например, 2 августа 2016 г. в Индии произошло опасное сближение между двумя самолетами авиакомпании IndiGo. Тогда самолеты разошлись так близко, что из-за шока медицинская помощь понадобилась четырем пассажирам и двум бортпроводникам. По состоянию на 10 июля в 2016 г. в этой стране было зарегистрировано 17 аналогичных ситуаций, а в 2015 только в Индии произошло 25 опасных сближений, а в 2014 г. – 31 [2]. В России в 2015 г. произошло 24 инцидента, связанных с нарушениями интервалов эшелонирования воздушных судов (в 2014 г. по этим причинам произошло 35 инцидентов) [3]. Среди факторов инцидентов, связанных с нарушением интервалов эшелонирования, преобладают причины, связанные с персоналом ОрВД. А уже в первом полугодии 2016 г. произошло 9 инцидентов, связанных с нарушениями интервалов эшелонирования воздушных судов (за аналогичный период 2015 г. произошло 6 инцидентов). Семь из происшедших в течение 2016 г. инцидентов явились следствием ошибок персонала по ОрВД, два инцидента произошло из-за ошибок экипажей воздушных судов. Кроме того, в первом полугодии 2016 г. зафиксировано 17 случаев срабатывания бортовых систем предупреждения столкновений или же систем предупреждения опасных сближений в ситуациях, напрямую не связанных с нарушениями интервалов эшелонирования [4]. Межгосударственный авиационный комитет, также среди типичных недостатков выделяет «допуск к полётам и управлению воздушным движением (УВД) лётного и диспетчерского составов, не имеющих необходимого опыта и подготовки» [5].

Цель работы. Существуют различные пути постепенного снижения негативного влияния человеческого фактора на безопасность воздушного движения [6-9]. И одним из главных является дальнейшее совершенствование профессионального психологического отбора (ППО) диспетчеров УВД. Важность правильной организации ППО авиационных специалистов, в том числе диспетчеров УВД для дальнейшего повышения безопасности полётов вполне очевидна, поскольку фактически, это первый заслон на пути в авиацию лиц, которые по различным причинам не пригодны для подобной работы. «ППО – это комплекс мероприятий,

направленных на обеспечение качественного отбора персонала организации на основе оценки соответствия уровня развития необходимых психофизиологических (индивидуальных) качеств и свойств личности требованиям профессиональной деятельности» [10]. Существующий ППО пилотов и диспетчеров УВД [11], по мнению авторов работы [12], имеет ряд существенных недостатков и нуждается в дальнейшем совершенствовании. Эти вопросы были рассмотрены в статьях [12, 13] и ряде других работ. В частности, в статье [12] рассматривались недостатки тестов типа «личностный опросник», применяемых в ППО авиационных специалистов. Необходимо отметить, что тесты типа «личностный опросник» вообще не очень надёжны. Основные проблемы их использования связаны с возможностью фальсификации ответов, а также со снижением достоверности полученных данных в силу влияния факторов, имеющих установочную природу, и различий в понимании вопросов обследуемыми [14]. Фальсификация ответов, о вероятности которой следует помнить при проведении некоторых обследований (в частности, как раз при ППО – прим. авторов), типична не для всех диагностических ситуаций. Сложнее обстоит дело с установками, реализующимися в процессе ответов на вопросы опросника [14]. Помимо же факторов, имеющих установочную природу, на достоверность ответов в опроснике существенно влияет интеллектуальная оценка вопросов обследуемым (особенности понимания вопросов). Было показано, что неясность, трудность вопросов приводят к изменчивости ответов при повторном обследовании, а это свидетельствует о малой надёжности. В то же время оказывается, что вопросы, ответы на которые остаются неизменными при повторном обследовании, нередко обладают низкими дискриминативными возможностями [14]. Поэтому одним из путей повышения надёжности ППО диспетчеров УВД представляется более широкое использование диагностических методик, базирующихся не на субъективных, а на объективных принципах.

Методы. В порядке изучения подобных возможностей, А. Е. Герасименковой, И. Ю. Гиренко, А. А. Дибровым, Е. Ю. Лысановой и М. Г. Чепиком под руководством А. В. Малишевского и О. В. Ариничевой в ноябре 2016 был проведён следующий эксперимент с использованием стационарного прибора EyeTracker Tobii REX. Анализ и обработка данных производилась с помощью специального компьютерного продукта (разработка А. П. Плясовских, Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры), предназначенного специально для анализа различных аспектов перемещения взгляда, в процессе выполнения заданного упражнения. Частично результаты эксперимента были описаны авторами в работах [15-17].

Результаты и их обсуждение. В эксперименте приняли участие 48 студентов третьего курса факультета лётной эксплуатации специализации «Использование воздушного пространства» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации

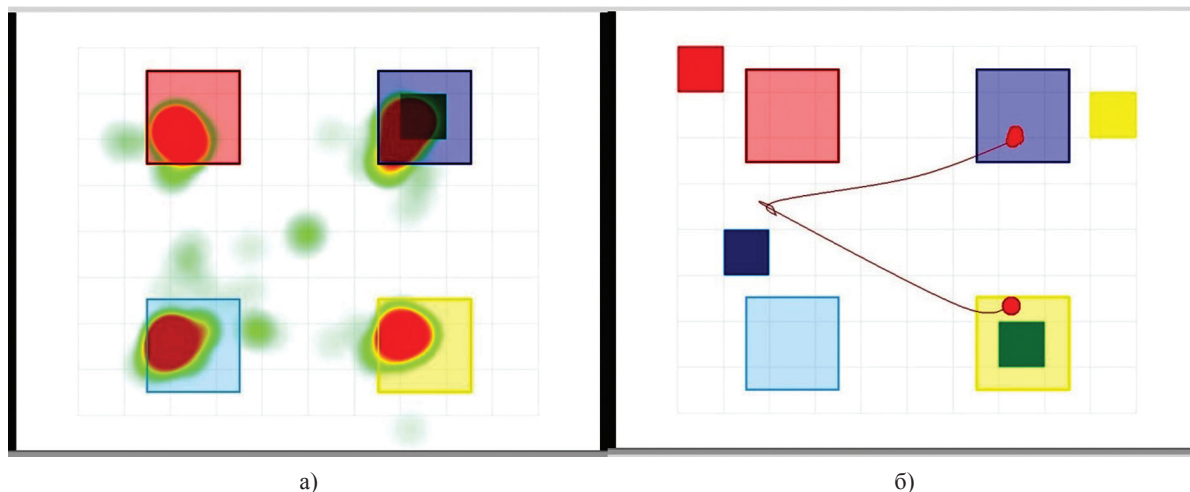


Рисунок 1 –Фрагменты визуального отображения взгляда испытуемого:

а) пример тепловой карты взгляда испытуемого; б) пример первоначально ошибочной траектории взгляда (верхнее левое положение – зона 1, далее нумерация по часовой стрелке).

(СПбГУ ГА). В качестве упражнения, было выбрано то, в котором на первом этапе задачей испытуемых было фиксировать взгляд на перемещающемся по экрану монитора зелёном квадрате. На втором этапе эксперимента задача перед испытуемыми стояла та же, но одновременно с зелёным на экране монитора появлялись квадраты других цветов, то есть создавалась помеха. Предполагалось, что характеристики распределения и переключения внимания на втором этапе будут хуже. И далее сравнивались полученные различия в характеристиках внимания с итогами психодиагностики, проведённой на данной выборке студентов.

С помощью специальной компьютерной программы определяется время пребывания взгляда в одной из четырёх зон. В идеале, в каждой зоне взгляд должен был бы фиксироваться на протяжении 25% от общего времени этапа упражнения. Далее нами вычислялись суммы квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (Σ_A и Σ_B), а также общие сумма (Σ_Σ) и разность между двумя этими суммами (R_Z).

$\Sigma_\Sigma = \Sigma_B + \Sigma_A$; $R_Z = \Sigma_B - \Sigma_A$,
где: $\Sigma_A = t_{A1}^2 + t_{A2}^2 + t_{A3}^2 + t_{A4}^2$,
 $\Sigma_B = t_{B1}^2 + t_{B2}^2 + t_{B3}^2 + t_{B4}^2$,
 $t_{A1} = \left| \frac{25 - T_{A1}}{25} \right|$; $t_{A2} = \left| \frac{25 - T_{A2}}{25} \right|$;
 $t_{A3} = \left| \frac{25 - T_{A3}}{25} \right|$; $t_{A4} = \left| \frac{25 - T_{A4}}{25} \right|$;
 $t_{B1} = \left| \frac{25 - T_{B1}}{25} \right|$; $t_{B2} = \left| \frac{25 - T_{B2}}{25} \right|$;
 $t_{B3} = \left| \frac{25 - T_{B3}}{25} \right|$; $t_{B4} = \left| \frac{25 - T_{B4}}{25} \right|$;
 $T_{A1}, T_{A2}, T_{A3}, T_{A4}$ – время пребывания взгляда (%), соответственно в зоне 1, в зоне 2, в зоне 3 и в зоне 4 (на первом этапе упражнения, т.е. без помех);

$T_{B1}, T_{B2}, T_{B3}, T_{B4}$ – время пребывания взгляда (%), соответственно в зоне 1, в зоне 2, в зоне 3 и в зоне 4 (на втором этапе упражнения – с помехами).

На тепловой карте взгляда (например, см. рис. 1(а)) видно, что испытуемые действительно достаточно хорошо фиксировали взгляд в пределах заданных зон. Однако результаты данного эксперимента получились весьма противоречивыми, поскольку значительное количество его участников (22 из 48) лучше выполнило более сложную задачу. Хотя, как это хорошо видно на рис. 1(б) по траектории

Таблица 1 – Интеркорреляции между результатами эксперимента

	Σ_Σ	$ R_Z $	Σ_A	t_{A1}	t_{A2}	t_{A3}	t_{A4}	Σ_B	t_{B1}	t_{B2}	t_{B3}	t_{B4}
Σ_Σ		+0,5784	+0,9089	-0,0163	+0,1334	+0,6403	+0,5747	+0,9039	+0,0070	-0,0580	+0,6382	+0,5316
$ R_Z $	$P \geq 0,999$		+0,2983	+0,0802	-0,1759	+0,1577	+0,3072	+0,7562	-0,1007	+0,0857	+0,3582	+0,6460
Σ_A	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$		+0,0567	+0,2312	+0,7171	+0,5232	+0,6432	-0,0244	-0,1171	+0,5691	+0,2834
t_{A1}	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		+0,2001	-0,1919	-0,2994	-0,0880	+0,3520	+0,1288	-0,1801	-0,2010
t_{A2}	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		-0,0570	-0,2142	+0,0077	+0,3872	-0,2141	+0,0677	-0,1154
t_{A3}	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		+0,2250	+0,4402	-0,2644	-0,0459	+0,5434	+0,1563
t_{A4}	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		+0,5186	+0,0046	+0,0879	+0,1764	+0,4682
Σ_B	$P \geq 0,999$	$P \geq 0,999$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P \geq 0,99$	$P \geq 0,999$		+0,0378	+0,0137	+0,5881	+0,6854
t_{B1}	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P \geq 0,95$	$P \geq 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		+0,2495	-0,2519	-0,3923
t_{B2}	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		-0,1235	-0,2223
t_{B3}	$P \geq 0,999$	$P \geq 0,95$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P < 0,95$		+0,2352
t_{B4}	$P \geq 0,999$	$P \geq 0,999$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	$P \geq 0,99$	$P \geq 0,999$	$P \geq 0,95$	$P < 0,95$	$P < 0,95$	

движения взгляда, во многих случаях на помехи испытуемые реагировали.

Кроме того, 8 полученных результатов оказались очевидно некорректными. Возможные причины: либо человек поворачивал голову, либо имела место плохая калибровка прибора для данного испытуемого. Если исключить заведомо некорректные результаты, то по оставшимся 40 испытуемым картина получается следующая (см. табл. 1). Корреляционная связь между суммой сумм квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (Σ_z) и суммой квадратов отклонений на каждом из этапов (Σ_A и Σ_B) практически одинакова.

Однако данная сумма сумм (Σ_z) практически не зависит от отклонений от идеального времени пребывания взгляда в верхних зонах (t_{A1} , t_{A2} , t_{B1} , t_{B2}) и очень высоко значимо зависит от аналогичных отклонений в нижних зонах (t_{A3} , t_{A4} , t_{B3} , t_{B4}). А вот корреляция между модулем разности сумм квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов ($|R_z|$) и суммой квадратов отклонений на первом этапе (Σ_A) практически отсутствует, а с суммой квадратов отклонений на втором этапе (Σ_B) она сильная и очень высоко значимая. Причём в это основную лепту вносит левая нижняя зона (t_{B4}). Что это означает, сказать пока сложно. Вполне вероятен вариант, что данные корреляции связаны со слишком низким расположением монитора компьютера относительно глаз испытуемых.

Также кроме выполнения самого описанного здесь ранее упражнения все испытуемые прошли достаточно обширное психодиагностическое обследование, с использованием 8 различных тестов. Были использованы:

- тест ЕРІАйзенка на определение темперамента (Σ – экстраверсия, n – нейротизм) [14];
- опросник «Прогноз», для оценки нервно-психической устойчивости (НПУ) ($N_{НПУ}$ – НПУ в баллах, $O_{НПУ}$ – оценка НПУ) [18];
- опросник А. Басса – А. Дарки для определения склонности к различным формам агрессивного поведения ($A_{Об}$, $A_{Ф}$, $A_{К}$, $A_{Р}$, $A_{Н}$, $A_{О}$, $A_{П}$, $A_{В}$, $A_{А}$) [14];
- опросник для определения уровня субъективного контроля для оценки общих и частных показателей интернальности ($I_{О}$, $I_{Д}$, $I_{Н}$, $I_{С}$, $I_{П}$, $I_{М}$, $I_{З}$) [14];
- тест «ММЯ-1» для определения стиля поведения (α_z – эгонаправленность, α_l – направленность на людей, α_p – направленность на работу, γ – расстояние от «идеальной» точки на сетке μ_2 [8]);
- опросник К. Томаса для определения стиля поведения в конфликте ($\beta_{СП}$, $\beta_{СТ}$, $\beta_{КМ}$, $\beta_{ИЗ}$, $\beta_{ПР}$) [14];
- соционический тест «ММ-1» [19] для определения составляющих соционической модели человека ($S_{ИЛЭ}$, $S_{СЭИ}$, $S_{ЭСЭ}$, $S_{ЛИИ}$, $S_{ЭИЭ}$, $S_{ЛСИ}$, $S_{СЛЭ}$, $S_{ИЭИ}$, $S_{ЛИЭ}$, $S_{ЭСИ}$, $S_{СЭЭ}$, $S_{ИЛИ}$, $S_{ЛСЭ}$, $S_{ЭИИ}$, $S_{ИЭЭ}$, $S_{СЛИ}$), а также характеристик по отдельным дихотомиям ($S_{Э/И}$, $S_{Л/Э}$, $S_{С/И}$, $S_{Р/И}$) и интегрального показателя пригодности по соционическим критериям (ξ);

- тест Г. Ю. Айзенка для определения уровня развития интеллекта [20] (IQ – коэффициент интеллекта).

Наиболее значимые статистические зависимости, выявленные в ходе эксперимента, представлены в табл. 2. Ни одна из полученных нами корреляционных зависимостей по силе не превышает умеренной. Значимость корреляций колеблется в очень широких пределах, от незначимых до очень высоко значимых.

Совершенно чёткие корреляции (см. табл. 2) были получены для нервно-психической устойчивости ($N_{НПУ}$ – нервно-психическая устойчивость в баллах, при этом, чем больше балл, тем хуже оценка НПУ ($O_{НПУ}$)). Чем ниже был нейротизм (n), характеризующий уравновешенность нервной системы, тем лучше была НПУ. Чем лучше была оценка НПУ, тем выше была интернальность любого вида, особенно же общая интернальность ($I_{О}$) и интернальность в области неудач ($I_{Н}$). То есть люди с хорошей нервно-психической устойчивостью готовы проявить и большую социальную ответственность. Также люди с хорошей НПУ менее склонны к агрессивному поведению, как в целом по всем её видам ($A_{Об}$), так и, в особенности, к аутоагрессии ($A_{А}$ – чувство вины, угрызания совести). Это достаточно важно, так как, сделав ошибку в работе, необходимо срочно размышлять об её исправлении, а не заниматься рефлексированием, которое способно лишь только привести к дополнительным ошибкам.

Участники с высоким уровнем общей интернальности ожидаемо оказались категорически не склонны к такому типу поведения в конфликте, как «избегание» ($\beta_{ИЗ}$), которое является квинтэссенцией безответственности. Также люди с высоким уровнем интернальности оказались не склонны и к агрессивному поведению. Наиболее высокой общая интернальность ($I_{О}$) оказалась у людей с относительным преобладанием в их соционической модели человека такого социотипа как логико-интуитивный экстраверт ($S_{ЛИЭ}$), но у этих лиц оказалась и наиболее высокая эгонаправленность (α_z).

Наиболее неподходящий стиль поведения по интегральному показателю (γ) оказался у лиц с относительным преобладанием в их соционической модели человека такого социотипа как логико-сенсорный экстраверт ($S_{ЛСЭ}$).

Лица с более высокой экстраверсией (Σ) оказались более склонны в конфликте к такому стилю поведения как «соперничество» ($\beta_{СП}$). А лица с наиболее высокой общей агрессивностью ($A_{Об}$), оказались наименее склонны в конфликте к такому стилю поведения как «приспособление» ($\beta_{ПР}$).

В связи с тем, что результаты компьютерных испытаний в данном эксперименте коррелируют с результатами психодиагностики достаточно слабо, далее был поставлен вопрос, существует ли достоверная разница по целому ряду характеристик между отдельными группами участников эксперимента.

Во-первых, поскольку группа обследуемых лиц была представлена практически равным количеством мужчин

Таблица 2 – Корреляции, полученные в ходе психодиагностического обследования в группе участников эксперимента

Первая величина	Вторая величина	$r_{\text{корр}}$	Вывод о силе корреляции	Вывод о значимости корреляции	
$N_{\text{нпу}}$	n	+0,4923	умеренная	$P \geq 0,999$	очень высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$I_{\text{О}}$	-0,4395	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$I_{\text{Д}}$	-0,3778	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$I_{\text{Н}}$	-0,4594	умеренная	$P \geq 0,999$	очень высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$I_{\text{С}}$	-0,4042	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$I_{\text{М}}$	-0,3506	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$N_{\text{нпу}}$	$A_{\text{К}}$	+0,4171	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$A_{\text{Р}}$	+0,3868	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$A_{\text{А}}$	+0,4270	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$N_{\text{нпу}}$	$A_{\text{Об}}$	+0,4067	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$\mathcal{E}$	$A_{\text{О}}$	-0,3086	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$\mathcal{E}$	$\beta_{\text{СП}}$	+0,3468	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$\mathcal{E}$	$S_{\mathcal{E}/\text{И}}$	+0,4654	умеренная	$P \geq 0,999$	очень высоко значимая
n	$A_{\text{К}}$	+0,4135	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
n	$A_{\text{Р}}$	+0,3416	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
n	$A_{\text{О}}$	+0,3736	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
n	$A_{\text{А}}$	+0,4669	умеренная	$P \geq 0,999$	очень высоко значимая
$I_{\text{О}}$	$\beta_{\text{ИЗ}}$	-0,4333	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$I_{\text{О}}$	$S_{\text{ЛИЭ}}$	+0,3419	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{О}}$	$S_{\text{Р/И}}$	+0,3314	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Д}}$	$\alpha_{\mathcal{E}}$	-0,3213	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Д}}$	$\alpha_{\text{Р}}$	+0,3763	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$I_{\text{Д}}$	$A_{\text{Ф}}$	-0,3514	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Д}}$	$A_{\text{О}}$	-0,3257	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Д}}$	$A_{\text{Об}}$	-0,3616	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Д}}$	$\beta_{\text{ИЗ}}$	-0,3457	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Н}}$	$A_{\text{Ф}}$	-0,3018	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Н}}$	$A_{\text{Р}}$	-0,3436	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Н}}$	$A_{\text{П}}$	-0,3246	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{Н}}$	$A_{\text{Об}}$	-0,4214	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$I_{\text{Н}}$	$\beta_{\text{ИЗ}}$	-0,3038	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$I_{\text{С}}$	$A_{\text{Об}}$	-0,4144	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$I_{\text{П}}$	$\beta_{\text{ИЗ}}$	-0,4597	умеренная	$P \geq 0,999$	очень высоко значимая
$I_{\text{М}}$	$A_{\text{Об}}$	-0,4772	умеренная	$P \geq 0,999$	очень высоко значимая
$\alpha_{\mathcal{E}}$	$S_{\text{ЛИЭ}}$	+0,3379	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
$\alpha_{\text{Л}}$	$S_{\text{ЛСЭ}}$	-0,4059	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
r	$A_{\text{Об}}$	+0,3082	умеренная	$P \geq 0,95$	значимая
r	$S_{\text{ЛСЭ}}$	+0,4196	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая
$A_{\text{Об}}$	$\beta_{\text{ПР}}$	-0,4425	умеренная	$P \geq 0,99$	высоко значимая

и женщин (27 мужчин и 21 женщина), была проведена проверка наличия достоверных различий по гендерному признаку. Так в табл. 3 показано распределение оценок ($O_{НПУ}$) нервно-психической устойчивости (НПУ), коэффициента интеллекта (IQ) и темперамента у лиц мужского и женского пола, участвовавших в эксперименте.

В целом все участники эксперимента имеют НПУ не ниже удовлетворительной, хотя разброс 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 χ^2 -Пирсона [21] не выявлено ($\chi^2 = 0,7385 < \chi^2_{кр,0,95} = 5,991$ для $v = 2$ [21]).

Необычно распределение IQ в обследованной группе. У 13 человек IQ оказался сверхвысоким. По сравнению с данными из статьи [22] поражает разброс показателя. IQ колеблется от 87 (70 – считается границей умственной отсталости) до 171 (у А. Эйнштейна IQ был 160-180 (правда лишь по косвенным оценкам – реально он тест не проходил) [23]). Между выборками мужчин и женщин по коэффициенту интеллекта (IQ) выявлены достоверные различия по критерию χ^2 -Пирсона [21] ($\chi^2_{кр,0,99} = 9,210 > \chi^2 = 7,8652 > \chi^2_{кр,0,95} = 5,991$ для $v = 2$ [21]). Причём у женщин IQ очевидным образом выше, нежели у мужчин. Эти данные по диспетчерам женщинам и мужчинам вполне совпадают с данными из [22, 24].

Данные по темпераменту, по данным, полученным в СПбГУ ГА, также отличаются от стандартных. Стандартно много сангвиников – 25 человек. Но очень много и холериков – 12 испытуемых (25%). Это очень много для лётных и диспетчерских выборок. Флегматиков же всего 6 (12,5%), обычно их процент несколько больше. Есть даже один меланхолик, то есть представитель,

имеющий слабый тип нервной системы. Среди лётного и диспетчерского состава подобный тип темперамента встречается весьма редко. Ещё 4 человека имеют смешанные, т. е. не выраженные чётко типы темперамента. В табл. 3 смешанные типы были учтены как 0,5 человека отнесённые к каждому из основных 4 типов. По нейротизму (n) между выборками мужчин и женщин (табл. 3) выявлены достоверные различия по критерию χ^2 -Пирсона [21] ($\chi^2_{кр,0,99} = 3,841 > \chi^2 = 4,0114 > \chi^2_{кр,0,95} = 6,635$ для $v = 1$ [21]). Причём у женщин нейротизм явно выше (большее процентное соотношение меланхоликов и, особенно холериков среди всех типов темперамента), нежели у мужчин, то есть их (женщин) нервная система менее уравновешена.

Ещё один рассмотренный нами фактор – это наличие в выборке лиц с положительными (26 чел.) или отрицательными (22 чел.) разностями между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z). Как уже упоминалось, предполагалось, что характеристики распределения и переключения внимания на втором этапе будут хуже, чем на первом. Однако значительное количество испытуемых (22 чел.) лучше выполнило более сложную задачу. Результаты этих и некоторых других распределений показаны в табл. 4.

Как видно из приведенных в табл. 4 данных, если по признаку пола достоверные различия в ряде результатов психодиагностики имеются, то в результатах, полученных в ходе эксперимента, их нет.

По распределению положительных и отрицательных разностей между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z) между выборками мужчин и женщин (табл. 4) достоверных различий по критерию χ^2 -Пирсона [21] не выявлено ($\chi^2 = 2,025 < \chi^2_{кр,0,95} = 3,841$ для $v = 1$ [21]).

Таблица 3 – Распределение результатов психодиагностики по признаку пола

Распределение оценок НПУ ($O_{НПУ}$) по признаку пола у испытуемых										
$O_{НПУ}$	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
Распределение коэффициента интеллекта (IQ) по признаку пола у испытуемых										
IQ	сверхнизкий < 70		низкий 70-100		средний 101-110		высокий 111-130		сверхвысокий > 130	
женщины	0		1		3		9		8	
мужчины	0		5		11		6		5	
Распределение типов темперамента и нейротизма (n) по признаку пола										
женщины	сангвиники		флегматики		холерики			меланхолики		
	8		3		8,5			1,5		
	n <12					n >12				
	11					10				
мужчины	сангвиники		флегматики		холерики			меланхолики		
	18		3,5		5			0,5		
	n <12					n >12				
	21,5					5,5				

Таблица 4 – Сравнение результатов, полученных в ходе эксперимента, по критерию χ^2

Распределение положительных и отрицательных разностей между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z) по признаку пола у участников эксперимента										
			$R_z < 0$				$R_z > 0$			
женщины			12				9			
мужчины			10				17			
Распределение суммы сумм квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (Σ_z) по признаку пола у участников										
		$\Sigma_z < 10,4$		$10,4 \leq \Sigma_z < 19,1$		$19,1 \leq \Sigma_z < 30$		$\Sigma_z \geq 30$		
женщины		4		6		5		6		
мужчины		8		6		7		6		
Распределение суммы сумм квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (Σ_z) по наличию положительных или отрицательных разностей между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z)										
		$\Sigma_z < 10,4$		$10,4 \leq \Sigma_z < 19,1$		$19,1 \leq \Sigma_z < 30$		$\Sigma_z \geq 30$		
$R_z < 0$		4		5		6		7		
$R_z > 0$		8		7		6		6		
Распределение оценок нервно-психической устойчивости ($O_{нпу}$) по наличию положительных или отрицательных разностей между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z)										
$O_{нпу}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_z < 0$	0	0	1	1	3	5	8	2	1	1
$R_z > 0$	0	0	0	5	3	8	4	4	1	1

По распределению суммы сумм квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (Σ_z) между выборками мужчин и женщин (табл. 4) достоверных различий по критерию χ^2 -Пирсона [21] не выявлено ($\chi^2 = 0,9312 < \chi^2_{кр,0,95} = 7,815$ для $v = 3$ [21]).

По распределению суммы сумм квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (Σ_z) между выборками лиц с положительными или отрицательными разностями между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z) (табл. 4) достоверных различий по критерию χ^2 -Пирсона [21] не выявлено ($\chi^2 = 1,6783 < \chi^2_{кр,0,95} = 7,815$ для $v = 3$ [21]).

По оценкам нервно-психической устойчивости ($O_{нпу}$) между выборками лиц с положительными или отрицательными разностями между суммами квадратов отклонений от идеального времени пребывания взгляда в каждой из зон на каждом из этапов (R_z) (табл. 4) достоверных различий по критерию χ^2 -Пирсона [21] не выявлено ($\chi^2 = 1,2417 < \chi^2_{кр,0,95} = 5,991$ для $v = 2$ [21]).

Выводы. Известно, что «влияние психологических факторов на надёжность работы оператора определяют такие показатели, как безопасность, своевременность, восстанавливаемость, готовность и психофизиологическая напряжённость» [25]. А поскольку «безопасность – свойство оператора сохранять работоспособность в течение определённого времени до совершения ошибки» [25], и при этом его (оператора) восстанавливаемость

зависит от силы нервной системы, т. е. от такой характеристики как темперамент, то данный эксперимент перекрыл так или иначе все аспекты, определяющие надёжность деятельности оператора (в нашем случае диспетчера УВД). Все полученные результаты представляют определённый интерес. Невзирая на некоторую противоречивость полученных нами результатов, данный эксперимент оказался весьма полезным, поскольку высветил также и слабые стороны в его планировании. Это позволило скорректировать порядок проведения дальнейших исследований с использованием аппаратуры EyeTrackerTobii REX, направленных на повышение надёжности ППО диспетчеров УВД.

Библиографический список

1. Авиационная транспортная система [Электронный ресурс] / AVIA.PRO – URL: <http://avia.pro/blog/aviacionnaya-transportnaya-sistema> (дата обращения 27.10.2017).
2. Опасное сближение в Индии [Электронный ресурс] / Aviasafety.ru. 22.08.2016. URL: <http://aviasafety.ru/10346/> (дата обращения 27.10.2017).
3. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2015 году. М.: ФАВТ, 2016. 90 с.
4. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в первом полугодии 2016 года. М.: ФАВТ, 2016. 34 с.
5. Состояние безопасности полётов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражд-

данской авиации и об использовании воздушного пространства в 2015 году. М.: МАК, 2016. 114 с.

6.Ариничева О.В., Коваленко Г.В., Малишевский А.В., Михальчевский Ю.Ю. Взаимодействие экипажа воздушного судна со службой управления воздушным движением: соционический аспект проблемы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2016. № 4 (13). С. 5-16.

7.Малишевский А.В., Власов Е.В., Каймакова Е.М. Возможные пути решения проблемы снижения негативного влияния человеческого фактора в чрезвычайных ситуациях на транспорте // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2015. № 1. С. 108-114.

8.Малишевский А.В., Ариничева О.В., Власов Е.В. Возможные пути решения проблемы снижения негативного влияния человеческого фактора на безопасность полётов // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 2. С. 12-20.

9.Ариничева О.В., Коваленко Г.В., Малишевский А.В., Михальчевский Ю.Ю. Анализ динамической воздушной обстановки // Проблемы лётной эксплуатации и безопасность полётов. 2016. Вып. X. С. 85-119.

10.Маклаков А.Г. Профессиональный психологический отбор персонала. Теория и практика: учеб.для вузов. СПб.: Питер, 2008. 480 с.

11. Руководство по психологическому обеспечению отбора, подготовки и профессиональной деятельности летного и диспетчерского состава гражданской авиации Российской Федерации. М.: Воздушный транспорт, 2001. 279 с.

12.Ариничева О.В., Малишевский А.В. Недостатки существующего профессионального отбора пилотов и проблема его совершенствования // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 6. С. 41-51.

13. Михайлик Н.Ф., Малишевский А.В. Концепция национальной системы специальной психологической подготовки летного состава // Прикладная психология. 1999. № 4. С. 30-44.

14. Бурлачук Л.Ф. Словарь-справочник по психодиагностике. СПб.: Питер, 2008. 688 с.

15. Ариничева О.В., Герасименкова А.Е., Чепик М.Г. Влияние гендерных различий в ходе эксперимента с использованием оборудования EyeTrackerTobii REX // Проблемы лётной эксплуатации и безопасность полётов. 2017. Вып. XI. С. 137-146.

16.Ариничева О.В., Герасименкова А.Е., Малишевский А.В., Михальчевский Ю.Ю., Чепик М.Г. Исследование профессионально важных качеств диспетчера по ОВД с использованием оборудования EyeTrackerTobii REX // Проблемы лётной эксплуатации и безопасность полётов. 2017. Вып. XI. С. 113-120.

17. Герасименкова А.Е., Гиренко И.Ю., Диброва А.А., Лысанова Е.Ю., Чепик М.Г. Исследование профессионально важных качеств диспетчера по ОВД с использованием психодиагностики // Проблемы лётной эксплуатации и безопасность полётов. 2017. Вып. XI. С. 155-163.

18.Практикум по психологии состояний: учеб.пособ. / Под ред. проф. А. О. Прохорова. СПб.: Речь, 2004. 480 с.

19. Малишевский А.В. Некоторые вопросы совершенствования соционической психодиагностики авиационного персонала // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 2. С. 23-30.

20. Айзенк Г.Ю. Новые IQ тесты. М.:ЭКСМО-Пресс, 2003. 192 с.

21. Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии. СПб.: Речь, 2007. 350 с.

22. Ариничева О.В. Анализ диагностики интеллектуальных способностей будущих авиационных специалистов // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 2. С. 15-22.

23. Какой IQ у Альберта Эйнштейна? [Электронный ресурс] / Большой вопрос.ru URL: <http://www.bolshoyvopros.ru/questions/2092639-kakoj-iq-u-alberta-enshtejna.html> (дата обращения 27.10.2017).

24. Ариничева О.В. Исследование интеллектуальных способностей студентов университета гражданской авиации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2016. № 4 (13). С. 38-57.

25. Данилов, Б.Д. Безопасность полетов [Электронный ресурс] : электрон.учеб. пособие / Б. Д. Данилов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). Электрон.текстовые и граф. дан. (2,75 Мбайт). Самара, 2012. – 1 эл. опт.диск (CD-ROM).

Сведения об авторах

Ольга В. Ариничева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лётная эксплуатация и безопасность полётов в гражданской авиации», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Россия, Санкт-Петербург, e-mail: 2067535@mail.ru, тел. +79052067535.

Алексей В. Малишевский, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Лётная эксплуатация и безопасность полётов в гражданской авиации», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Россия, Санкт-Петербург, e-mail: 9909395@bk.ru

Алина Е. Герасименкова, студентка 5-го курса факультета лётной эксплуатации СПбГУ ГА. Специализация «Организация использования воздушного пространства (ИВП)», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Россия, Санкт-Петербург, e-mail: uthfcvtyrjdf@mail.ru

Михаил Г. Чепик, студент 5-го курса факультета лётной эксплуатации СПбГУ ГА. Специализация «Организация использования воздушного пространства (ИВП)», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», Россия, Санкт-Петербург, e-mail: Mixagtr@gmail.com

Поступила 10.11.2017

Формирование системы с более высоким уровнем полноты безопасности из компонентов с низким уровнем полноты безопасности

Шебе Хендрик, T V Rheinland InterTraffic, Кёльн, Германия



Шебе Хендрик

Резюме. Цель. Технические системы становятся все более сложными. Все большее число технических систем содержит электронное оборудование и программное обеспечение, и, таким образом, уровень их функциональной безопасности имеет большее значение. Уровень полноты безопасности задается дискретным номером, который характеризует набор мер против случайных и систематических отказов в зависимости от заданных требований по уменьшению риска. Концепция уровней полноты безопасности (УПБ) была разработана в рамках различных систем стандартов. При обсуждении архитектуры безопасности системы возникает основной вопрос: как при компонентах или подсистемах с низким УПБ формируются системы с более высоким УПБ? Ответ на этот вопрос позволит использовать уже существующие и сертифицированные компоненты для создания системы с заданным уровнем безопасности, возможно, также с более высоким УПБ, чем УПБ составных компонентов. **Методы.** Анализируются и сравниваются существующие правила комбинирования систем с уровнями безопасности, приведенные в различных стандартах функциональной безопасности, таких как EN 50126/8/9, ISO 26262, IEC 61508, DEF-STAN-00-56, SIRF и Желтая Книга (Yellow Book). Помимо допустимых интенсивностей отказов, требования к конструкции системы должны рассматриваться таким образом, что подсистемы с низкими УПБ комбинируются для построения системы с более высоким уровнем УПБ. Самый обширный набор методов определен для достижения УПБ 4. Однако этот набор методов не может быть переработан для всех возможных систем в форму простого правила для комбинации подсистем с более низким УПБ для формирования систем с более высоким УПБ. В общем случае комбинирование подсистем в серийную структуру приведет к системе, имеющей уровень полноты безопасности являющейся минимумом уровней подсистем. Ориентировочно можно исходить из того, что, комбинируя две подсистемы с тем же уровнем полноты безопасности, можно создать систему с уровнем полноты безопасности на одну степень выше уровня подсистем. **Результаты.** Показано, что общее правило для распределения УПБ, как установлено в стандарте DEF-STAN 00-56, в Желтой книге или в стандарте SIRF, не может рекомендоваться для всех стран и во всех ситуациях. Должны быть приняты во внимание интенсивности отказов и/или интервалы наблюдения. Обосновано, что общие правила могут быть даны только для подсистем, подключенных параллельно, и для некоторых комбинаций УПБ (см., например, Желтая книга, SIRF). В каждом случае общие отказы должны учитываться. Общее правило может быть следующим: для достижения УПБ системы на один уровень выше исходного уровня должны соединяться параллельно две составные подсистемы, имеющие УПБ на одну степень ниже. Другие архитектуры системы должны быть подробно изучены.

Ключевые слова: уровень полноты безопасности, комбинация подсистем, допустимая интенсивность опасных отказов.

Формат цитирования: Шебе Х. Формирование системы с более высоким уровнем полноты безопасности из компонентов с низким уровнем полноты безопасности // Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 46-52. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-46-52

1. Введение

Технические системы становятся все более сложными. Все большее число технических систем содержит электронное оборудование и программное обеспечение, и, таким образом, уровень их функциональной безопасности имеет большее значение. Уровень полноты безопасности задается дискретным номером, который характеризует набор мер против случайных и систематических отказов в зависимости от заданных требований по уменьшению риска. Концепция уровней полноты безопасности (УПБ) была разработана в рамках различных систем стандартов. При обсуждении архитектуры безопасности системы возникает основной вопрос: как при компонентах или подсистемах с низким УПБ формируются системы с более высоким УПБ? Ответ на этот вопрос позволит использовать уже существующие и сертифицированные компоненты для создания системы с заданным уровнем безопасности, возможно, также с более высоким УПБ, чем УПБ составных компонентов.

Концепция уровней полноты безопасности определяется и используется в различных стандартах, таких как МЭК 61508 [6], DEF-STAN 0056 [1], EN 50126 [2], EN 50128 [3], EN 50129 [4] и многих других (см., например, [5, 7, 8]). Это обычная практика в указанных стандартах – определять различные четыре уровня полноты безопасности.

Уровень полноты безопасности определяется следующими двумя основными аспектами:

а) Чтобы справиться со случайными отказами, не должна быть превышена максимально допустимая интенсивность опасных отказов всех выполняемых системой функций безопасности

б) Должен быть установлен набор мер, позволяющий защитить систему от систематических отказов.

Следует обратить внимание на то, что для программного обеспечения имеют значение только систематические отказы и не предусматривается определение значений интенсивности отказов. Это вызвано тем фактом, что нормальное программное обеспечение не должно иметь случайных ошибок.

2. Уровни полноты безопасности

В таблице 1 приводятся четыре уровня полноты безопасности и приемлемые для них уровни TNR допустимой интенсивности опасных отказов, как определено в трех стандартах [1], [4] и [6].

Таблица 1 – Четыре значения для различных УПБ и стандартов

УПБ	МЭК 61508 / EN 50129	DEF-STAN-00-56
1	$10^{-6} \text{ 1/ч} \leq \text{THR} < 10^{-5} \text{ 1/ч}$	Частая $\approx 10^{-2} \text{ 1/ч}$
2	$10^{-7} \text{ 1/ч} \leq \text{THR} < 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Вероятная $\approx 10^{-4} \text{ 1/ч}$
3	$10^{-8} \text{ 1/ч} \leq \text{THR} < 10^{-7} \text{ 1/ч}$	Случайная $\approx 10^{-6} \text{ 1/ч}$
4	$10^{-9} \text{ 1/ч} \leq \text{THR} < 10^{-8} \text{ 1/ч}$	Маловероятная $\approx 10^{-8} \text{ 1/ч}$

Допустимая интенсивность опасных отказов системы есть такой максимально допустимый уровень опасных отказов составного технического оборудования, который разрешен установленным для этого оборудования уровнем полноты безопасности. Здесь мы отмечаем, что значения УПБ идентичны для [4] и [6] и отличаются для [1]. Таким образом, их УПБ не сопоставимы. Даже несмотря на то, что значения TNR для [4] и [6] совпадают, предусмотренные в них меры защиты от систематических отказов отличаются, так что их УПБ не идентичны.

Стандарты [2] и [3] не содержат целевых показателей интенсивности опасных отказов. Стандарт [2] требует только наличия уровней полноты безопасности, тогда как стандарт [3] посвящен программному обеспечению и дает описание УПБ без числовых значений для TNR. Стандарт [1] содержит целевые показатели опасных отказов неявно, заявив только словесные эквиваленты.

3. Комбинирование уровней полноты безопасности

В этом разделе мы опишем правила комбинации уровней полноты безопасности так, как они используются в различных стандартах.

3.1. Стандарт DEF-STAN 0056

Правила стандарта [1] приводятся в приложении 7.4.4, таблица 8. Читателю не следует смешивать эти правила комбинирования УПБ ([1]) с УПБ для [4], так как они являются различными характеристиками.

Эти правила сводятся к следующему:

Сочетание двух устройств с УПБ 3, включенных параллельно, дает систему с УПБ 4;

Сочетание двух устройств с УПБ 2, включенных параллельно, дает систему с УПБ 3;

Сочетание двух устройств с УПБ 1, включенных параллельно, дает систему с УПБ 2;

Сочетание двух устройств с УПБ x и УПБ y , включенных параллельно, дает систему с $\max(x, y)$ УПБ.

Обратите внимание, что «сочетание устройств, включенных параллельно» означает, что два устройства или функции комбинируются таким образом, что только опасный отказ обоих компонентов (или их функций) может вызвать опасный отказ системы. Из этих правил мы видим, что сочетание двух устройств приведет в лучшем случае к УПБ, который только на один уровень выше, чем УПБ составных компонент. Кроме того, система с определенным УПБ не может строиться путем объединения устройств или функций без УПБ – по крайней мере, не используя эти общие правила сочетания УПБ.

3.2. Желтая книга

Еще один интересный источник – Желтая книга [10]. Желтая книга является инструментом национального регулирования Великобритании, который устарел с по-

явлением общих методов обеспечения безопасности. Тем не менее, она предоставляет интересную информацию. УПБ в [10] определяется так же, как и в [4], но эти правила весьма отличаются от тех, которые определены в стандарте [1].

Таблица 2 – Сочетание правил для УПБ в Желтой книге (Таблица 17-2)

Верхний уровень УПБ	УПБ функции нижнего уровня		Комбинатор (если присутствует)
	Главная	Другие	
УПБ 4	УПБ 4	нет	нет
	УПБ 4	УПБ 2	УПБ 4
	УПБ 3	УПБ 3	УПБ 4
УПБ 3	УПБ 3	нет	нет
	УПБ 3	УПБ 1	УПБ 3
	УПБ 2	УПБ 2	УПБ 3
УПБ 2	УПБ 2	нет	нет
	УПБ 1	УПБ 1	УПБ 2
УПБ 1	УПБ 1	нет	нет

3.3. ГОСТ Р/МЭК 61508

В стандарте [6] нет такого хорошего правила сочетания УПБ, как в ранее рассмотренных стандартах. Тем не менее, этот стандарт обеспечивает возможность достижения уровня повышенной полноты безопасности через комбинацию более низких УПБ составных подсистем. Общее правило заключается в следующем (см. МЭК 61508-2, приложение 7.4.4.2.4): «Выбор канала с высоким уровнем полноты безопасности, который был достигнут для функции безопасности, и затем добавление N уровней полноты безопасности для достижения максимального уровня полноты безопасности путем общей комбинации подсистемы». Здесь N – это количество допускаемых в системе опасных ошибок параллельно скомбинированных элементов, т.е. количество опасных ошибок, которые допускаются в системе. Следует обратить внимание на то, что для достижения определенного уровня полноты безопасности системы комбинацией составных элементов, требования для количества допускаемых в системе опасных ошибок и доли безопасных отказов элементов должны быть выполнены согласно таблице МЭК 61508-2. Здесь надо различать элементы/системы типа А/В систем (МЭК 61508-2, глава 7.4.4.1.2).

Элемент может рассматриваться как элемент типа А, если для компонентов, необходимых для достижения функции безопасности, выполняются следующие условия:

- а) виды отказов всех составных компонентов четко определены;
- б) характер поведения элемента при неисправности может быть полностью определен;
- в) существует достаточно надежный массив данных,

чтобы подтверждать, что заявленные интенсивности отказов для обнаруживаемых и не обнаруживаемых опасных отказов выполняются.

Другие элементы / системы относятся к типу В. Правила для достижения требуемых УПБ систем типа А и типа В согласно МЭК 61508-2-2 приведены в таблицах 3 и 4 соответственно

Таблица 3 – Правила для достижения требуемых УПБ систем типа А

Доля безопасных отказов элемента	Количество допускаемых в системе опасных ошибок		
	0	1	2
< 60%	УПБ 1	УПБ 2	УПБ 3
60%–< 90%	УПБ 2	УПБ 3	УПБ 4
90%–< 99%	УПБ 3	УПБ 4	УПБ 4
> 99%	УПБ 3	УПБ 4	УПБ 4

Таблица 4 – Правила для достижения требуемых УПБ систем типа В

Доля безопасных отказов элемента	Количество допускаемых в системе опасных ошибок		
	0	1	2
< 60%	Не допускается	УПБ 1	УПБ 2
60%–< 90%	УПБ 1	УПБ 2	УПБ 3
90%–< 99%	УПБ 2	УПБ 3	УПБ 4
> 99%	УПБ 3	УПБ 4	УПБ 4

Эти обе таблицы 3 и 4 наглядно показывают, что стандарт [6] не дает простого правила для комбинирования УПБ. Не только варианты объединения подсистем и количество допускаемых в системе опасных ошибок решают вопрос о полноте уровня безопасности системы, но и доля безопасных отказов элемента. Однако можно наблюдать, что с увеличением количества допускаемых в системе опасных ошибок и сохранения доли безопасных отказов элемента при использовании подсистем того же типа (А или В), УПБ увеличивается на единицу. Это означает, что если есть две подсистемы с одинаковым УПБ с одной и той же долей безопасных отказов элемента, то их сочетание будет увеличить УПБ системы на одну степень. Комбинация подсистем различных типов и / или с различными долями безопасных отказов элемента может привести к другим результатам и в этом случае следует провести дополнительный анализ.

3.4. SIRF 400

Стандарт SIRF [9] – это немецкий стандарт способов обеспечения безопасности подвижного состава железных дорог, подготовленный совместно немецкой железнодорожной отраслью, немецкими железными дорогами, обществом немецких железнодорожных операторов и немецким федеральным железнодорожным органом. В Германии можно сделать ссылку на этот

документ, однако за пределами Германии, признание этого стандарта не гарантируется.

В документе описаны следующие принципы. Подключая две подсистемы в серии (например, с помощью условия «ИЛИ» в дереве отказов), наименьшее УПБ будет также результирующим УПБ такой системы.

Для комбинации параллельных подсистем предоставляются следующие правила:

а) системы с УПБ > 0 не должны быть построены из элементов с УПБ 0;

б) УПБ может быть понижен только на один уровень для условия «И» в дереве отказов;

в) исключение из (б): одна ветвь полностью берет на себя функции безопасности;

г) исключение из (б): проводится анализ общих отказов;

д) в случае пункта (г) подходящий метод (FMEA, HAZOP и т.д.) должен быть использован до самого нижнего уровня дерева отказов, чтобы показать, что возможность общих отказов исключаются.

00	01
10	11

Рисунок 1 – Допустимые комбинации для УПБ 1 (взято из стандарта [9])

00	01	02
10	11	12
20	21	22

Рисунок 2 – Допустимые комбинации для УПБ 2 (взято из [9])

00	01	02	03
10	11	12	13
20	21	22	23
30	31	32	33

Рисунок 3 – Допустимые комбинации для УПБ 3 (взято из [9])

00	01	02	03	04
10	11	12	13	14
20	21	22	23	24
30	31	32	33	34
40	41	42	43	44

Рисунок 4 – Допустимые комбинации для УПБ 4 (взято из [9])

Обратите внимание, что стандарт SIRF использует термин «SAS», который главным образом эквивалентен УПБ, но не совсем аналогичен этому понятию. На следующих рисунках 1-4 изображены разрешенные и запрещенные комбинации. Здесь зеленый цвет означает допустимые комбинации, красный показывает запрещенные комбинации и желтый означает, что только на основе глубокого анализа должны быть установлены независимости подсистем. Следующие изображения (рисунки 1-4) показывают комбинации УПБ, которые разрешены согласно [9].

Пренебрегая сочетанием двух независимых подсистем с УПБ 2 для достижения УПБ 4 системы, мы видим, что, главным образом, сочетание двух подсистем с тем же УПБ даст систему, которая имеет УПБ на один уровень выше.

3.5. Численный подход

В этом подразделе мы проведем расчет только на основе интенсивностей опасных ошибок, т.е. допустимых интенсивностей опасности, которые должны быть достигнуты путем сочетания однотипных подсистем. При этом не учитываются возможные меры защиты от систематических отказов.

Для анализа используются следующие предположения:

- 1) компаратор не требуется;
- 2) T -интервал проверки. В инспекции все неудачи и недостатки обнаружены и удалены так, что подсистема будет как новая;
- 3) система состоит из двух подсистем, которые соединены параллельно и имеют одинаковые УПБ;
- 4) нужно создать систему с УПБ, который на один уровень выше, чем УПБ у составных подсистем.

Ориентировочно интенсивность опасного отказа комбинированной системы определяется как

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T,$$

где: λ_1 – интенсивность отказа первой системы, 1/ч;

λ_2 – интенсивность отказа второй системы, 1/ч;

T – интервал наблюдения, ч.

Следующая таблица 5 содержит результаты для временного интервала $T = 10000$ ч, т.е. приблизительно один год.

Можно увидеть, что для всех трех случаев (УПБ 2...4 для системы) подсистемы будут выполнять требования (требуемый уровень), если подсистемы имеют уровни УПБ, которые на одну степень ниже требуемого УПБ

Таблица 5 – УПБ и допустимые интенсивности опасных отказов подсистем и системы в целом для интервала наблюдения 10000 часов,

Система		Подсистемы		
УПБ	Значение интенсивности	Требуемый уровень интенсивности	УПБ	Значение интенсивности
4	10^{-8} 1/ч	10^{-10} 1/ч	3	10^{-7} 1/ч
3	10^{-7} 1/ч	10^{-8} 1/ч	2	10^{-6} 1/ч
2	10^{-6} 1/ч	10^{-6} 1/ч	1	10^{-5} 1/ч

для системы. Однако это вычисление еще необходимо дополнить анализом общих отказов. Для этого мы используем [6]. Хотя, [4] дает другой подход в 3.2, мы используем [6] по той простой причине, что он дает численное значение. В худшем случае бета – коэффициент учета общих отказов – будет составлять 10%. Это та доля интенсивности отказов, которая должна быть использована для описания общих отказов. Затем, при определении интенсивности опасных отказов комбинированной системы, общие отказы будут доминировать. Если теперь каждая подсистема имеет УПБ n , то интенсивность опасных ошибок комбинированной системы будет составлять 10% от $10^{-(n+4)} 1/ч$, то есть, будет равна $10^{-(n+5)} 1/ч$.

Таким образом, комбинированная система в лучшем случае сможет иметь УПБ $(n+1)$. Следует заключить, что без особых предположений об общих отказах безопасность системы может быть повышена на один уровень при комбинировании двух подсистем с тем же УПБ.

3.6. Краткое резюме методов комбинаций УПБ

Помимо допустимых интенсивностей отказов, требования к конструкции системы должны рассматриваться таким образом, что подсистемы с низкими УПБ комбинируются для построения системы с более высоким уровнем УПБ. Стандарт [1] требует в приложении 7.3.3: «Проектирование, правила и методы, соответствующие каждому уровню полноты безопасности... должны быть определены до начала осуществления...». Никаких конкретных правил нет.

Стандарты [6] (часть 2, приложение А3, приложение В) и [4] (Приложение Е) содержат различные методы для различных УПБ. Самый обширный набор методов определен для достижения УПБ 4. Однако этот набор методов не может быть переработан для всех возможных систем в форму простого правила для комбинации подсистем с более низким УПБ для формирования систем с более высоким УПБ. Однако общее правило, кажется, состоит в том, что улучшить УПБ системы на один уровень возможно путем объединения двух подсистем с некоторыми более низкими УПБ.

4. Примеры

Пример 1

Система состоит из двух подсистем и не содержит программного обеспечения. Компаратор не нужен. Каждая подсистема проверяет различие между собой и

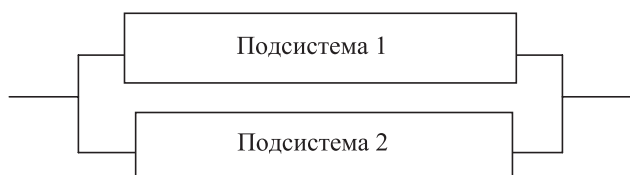


Рисунок 5 – Блок-схема системы примера 1

другой подсистемой и выключает другую подсистему в случае существования различия. Это означает, что отключение всей системы является безопасной ситуацией. На рисунке 5 показана блок-схема системы примера 1.

Если уровень полноты безопасности обеих подсистем есть УПБ 3 и они независимы, то они могут быть комбинированы в систему с УПБ 4. Правила проектирования имеют незначительные отличия между построением систем с УПБ 3 и УПБ 4. Если система должна иметь УПБ 2, то достаточно объединить две подсистемы с УПБ 1. Если обе подсистемы имеют УПБ 2 и система должна иметь УПБ 3, требуется более глубокое исследование относительно системы. Правила проектирования, необходимые для системы с УПБ 3, отличаются от тех правил, которые предъявляются при проектировании системы с уровнем УПБ 2.

Пример 2

Система в основном аналогична примеру 1, однако обе подсистемы находятся в ведении общего программного обеспечения (см. рисунок 6).

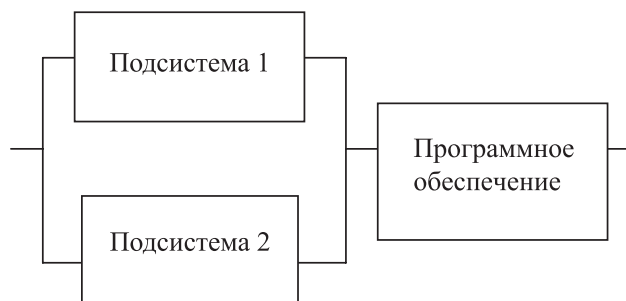


Рисунок 6 – Блок-схема системы примера 2

Если система должна иметь УПБ 4, то программное обеспечение должно также иметь уровень УПБ 4. (УПБ программного обеспечения должно быть, по крайней мере, таким же высоким, как и у самой системы). Системы с УПБ 2 могут быть построены из двух параллельных систем УПБ 1 с программным обеспечением УПБ 2. Если система должна иметь УПБ 3, то программное обеспечение также должно иметь УПБ 3. Если аппаратное обеспечение имеет УПБ 2, то для достижения в системе уровня УПБ 3 должны быть учтены дополнительные соображения такие же, как и в примере 1.

Пример 3

Эта система также похожа на систему примера 1, однако она содержит разнообразное программное обеспечение. На рисунке 7 показана блок-схема системы примера 3.

Есть разнообразные программы, используемые в обеих подсистемах. Те же соображения, как и в примере 1, применяются относительно распределения УПБ. Уровень УПБ 4 системы может быть обеспечен с помощью двух подсистем УПБ 3, где каждая с программным обеспечением УПБ 3. Системы с УПБ 2 могут быть

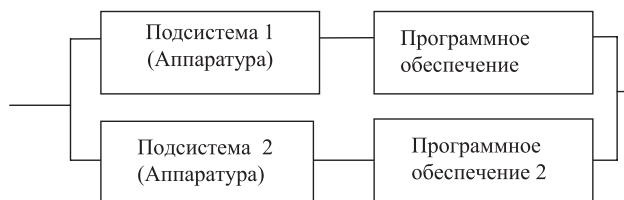


Рисунок 7 – Блок-схема системы примера 3

построены из двух подсистем УПБ 1. Для построения системы с УПБ 3 из двух подсистем с УПБ 2 каждая, необходимо учитывать дополнительные соображения.

Пример 4

Система состоит из одного канала аппаратного оборудования, но программное обеспечение является избыточным (рисунок 8). «Избыточность» программного обеспечения может быть создана с помощью двух различных пакетов программ или избыточных методов программирования (разнообразное программное обеспечение). В любом случае должно быть обеспечено разнообразие программного обеспечения.

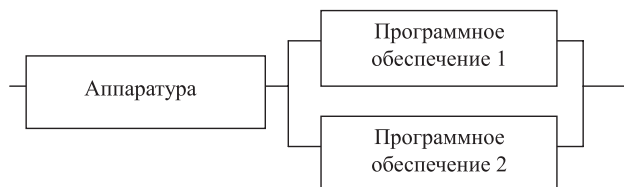


Рисунок 8 – Блок-схема системы примера 4

Пусть система должна иметь УПБ 4. В этом случае и аппаратное оборудование должно иметь УПБ 4, а обе версии программного обеспечения должны быть созданы, по крайней мере, согласно УПБ 3. Кроме того, должно быть доказано, что каждый отказ оборудования обнаруживается программным обеспечением, т.е. созданы хотя бы две версии программного обеспечения, и что существуют средства для приведения системы в безопасное состояние. Если система должна иметь УПБ 2, то оборудование должно иметь УПБ 2 и две версии программного обеспечения, разработанные хотя бы с УПБ 1 каждая. Достижение УПБ 3 системы возможно, если аппаратное обеспечение имеет уровень УПБ 3 и каждая из версий программного обеспечения соответствует уровню УПБ 2. Однако при этом необходимо детальное изучение такой возможности. Вопрос о независимости двух версий программного обеспечения, работающих в том же самом оборудовании, не является тривиальным. В любом случае программное обеспечение должно быть разнообразным.

Пример 5

В этом примере, мы рассматриваем электронную подсистему, состоящую из аппаратного и программного обеспечения и другого оборудования системы, действующего параллельно (аппаратный обход) (рисунок 9).

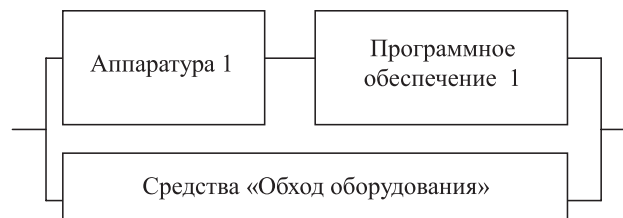


Рисунок 9 – Блок-схема системы примера 5

Если средства «обход оборудования» имеют необходимый для системы УПБ, то к аппаратному обеспечению 1 и программному обеспечению 1 не нужно предъявлять каких-либо требований по УПБ. Кроме того, может применяться та же логика, как и в примере 1: УПБ 4 системы могут быть достигнуты из УПБ 3 подсистем (аппаратного 1 и программного обеспечения 1 на одной стороне и УПБ 3 средств «обхода оборудования» на другой стороне). Программное обеспечение 1 должно иметь УПБ не ниже, чем УПБ аппаратуры 1.

5. Заключение

Общее правило для распределения УПБ как установлено в стандарте DEF-STAN-00-56, в Желтой книге или в стандарте SIRF не может рекомендоваться для всех стран и во всех ситуациях. Должны быть приняты во внимание интенсивности отказов и/или интервалы наблюдения. Общие правила могут быть даны только для подсистем, подключенных параллельно, и для некоторых комбинаций УПБ (см., например, Желтая книга, SIRF). В каждом случае общие отказы должны учитываться. Общее правило может быть следующим: для достижения УПБ системы на один уровень выше исходного уровня должны соединяться параллельно две составные подсистемы, имеющие УПБ на одну степень ниже. Другие архитектуры системы должны быть подробно изучены. Хорошим показателем соответствия выбранной архитектуры системы заданному УПБ является выполнение условия, когда требуемая интенсивность отказа системы согласно УПБ не превышает значения интенсивности отказов системы, рассчитанного по интенсивности отказов составных подсистем. Как правило, путем сочетания подсистем в серии создается система, которая имеет уровень полноты безопасности, соответствующий минимальному УПБ составных подсистем.

6. Библиографический список

1. DEF-STAN 0056 (1996) Требования для систем обороны по управлению безопасностью. Часть 1: требования. Часть 2: руководство. Выпуск 2, 13.2.1996.
2. EN 50126 – ГОСТ Р МЭК 62278 Определение и подтверждение надежности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS) на железных дорогах, 2008.
3. EN 50128 – СТБ ИЕС 62279 Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение

для систем управления и защиты на железных дорогах, 2011.

4. EN 50129 – СТБ IEC 62425 Системы связи, сигнализации и обработки данных. Электронные системы сигнализации, связанные с безопасностью, 2011.

5. Gräfling, S., Schäbe, H. (2012), Сельскохозяйственный уровень полноты производительности – или, как вы называете это?, ESREL 2012 / PSAM 11, статья 26 Fr2_1, 10 p.

6. IEC 61508 (2010), Функциональная безопасность электрических / электронных / программируемых электронных связанных с безопасностью систем – части 1-7, 1.4.2010.

7. Schäbe, H. (2014), Определение уровней полноты безопасности и влияния предположений, методов и принципов, труды PSAM 7 / ESREL 2004: Вероятностный анализ безопасности и управления (Редакторы С. Spitzer, U. Schmocker, V.N. Dang), Vol 4, pp. 1020-1025.

8. Schäbe, H., Jansen, H. (2010), Компьютерные архитектуры и распределения уровней полноты безопасности. Функциональная и информационная безопасность железнодорожного оборудования (Редактор G. Sciutto) WIT Press, 2010, стр. 19-28.

9. SIRF (2011), Правила политики безопасности транспортных средств, версия 1,1.6.2011.

10. Жёлтая книга (2007), Техника управления безопасностью (Желтая книга), тома 1 и 2. Основные принципы и руководящие указания, выпуск 4.

Примечание: Желтая книга заменена руководством по применению CSMREA.

Сведения об авторах:

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

Поступила 28.11.2017

Функциональная зависимость между количеством вагонов в сходе из-за неисправностей вагонов или пути и факторами движения¹

Алексей М. Замышляев, АО «НИИАС», Москва, Россия

Алексей Н. Игнатов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Андрей И. Кибзун, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Евгений О. Новожилов, АО «НИИАС», Москва, Россия



Алексей М.
Замышляев



Алексей Н. Игнатов



Андрей И. Кибзун



Евгений О.
Новожилов

Цель. Одним из наиболее опасных видов транспортных происшествий являются сходы железнодорожного подвижного состава, которые в зависимости от тяжести последствий могут также классифицироваться как аварии и крушения. Последствия схода могут быть весьма различны: от незначительного повреждения верхнего строения железнодорожного пути и повреждения вагонов в объеме текущего отцепочного ремонта до повреждения пути, требующего усиленного капитального ремонта, и повреждения вагонов до исключения из инвентаря, а также утраты груза и прерывания железнодорожного движения на длительный период времени. Необходимо отметить, что помимо ущерба от повреждения инфраструктуры и подвижного состава, при сходе вагонов существует риск создания экологической катастрофы. Российская Федерация наряду с США, Китаем и Индией обладает наиболее протяженной железнодорожной сетью в мире, которая проложена, в том числе, вдоль особо охраняемых природных территорий, например, национальных заповедников и парков. Поэтому, если поезд перевозил опасные грузы, например, бензин или токсичные газы, и часть его вагонов сошла с рельсов, то к последствиям схода добавится ущерб от экологической катастрофы. В этой связи актуальной задачей представляется оценка функциональной зависимости между потенциальным числом вагонов в сходе и различными факторами, например, скоростью движения поезда, его весом, для последующей выработки рекомендаций по снижению потенциального числа вагонов в сходе, а, следовательно, и по снижению возможного ущерба. **Методы.** Использованы методы теории вероятностей и математической статистики: метод максимального правдоподобия, отрицательная биномиальная регрессия. **Результаты.** Для различных групп происшествий: сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки; сход вследствие неисправности рельсов вне стрелки; сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом – определены специфические функции среднего количества вагонов в сходе. Получена формула, которая позволяет при заданном наборе различных факторов движения: скорости поезда, плана и профиля пути, длины, веса поезда – определить ряд распределения количества вагонов в сходе. **Выводы.** В результате предварительного анализа имеющихся российских протоколов по сходам с рельсов подвижного состава в грузовых поездах было выявлено, что для различных групп транспортных происшествий описательные статистики соответствующих выборок значительно отличаются, что соответствует данным аналогичных американских протоколов. В результате построения функциональной зависимости между средним количеством вагонов в сходе и различными факторами по причине неисправности вагонов или секций локомотива вне стрелок было выявлено, что имеющихся протоколов недостаточно для прогнозирования количества вагонов в сходе в прямых участках пути. Для сходов по причине неисправности пути вне стрелок и сходов на стрелках построены математические модели с небольшим параметром сверхдисперсии.

Ключевые слова: сход с рельсов, крушение, факторы движения, метод максимального правдоподобия, отрицательная биномиальная регрессия.

Формат цитирования: Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Новожилов Е.О. Функциональная зависимость между количеством вагонов в сходе из-за неисправностей вагонов или пути и факторами движения¹// Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 53-60. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-53-60

¹ Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки № 2.2461.2017/ПЧ и при поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-03050 офи_м_РЖД

1. Введение

Отправной точкой при анализе факторов, приводящих к наиболее тяжелым последствиям при сходе вагонов при поездной работе, является исследование протоколов транспортных происшествий. За 2013-2016 гг. имеется 262 протокола сходов с рельсов вагонов в грузовых и пассажирских поездах, которые произошли в Российской Федерации, не считая протоколов транспортных происшествий, которые классифицированы как крушения. Если рассматривать железные дороги США и Индии, то из [1, 2] следует, что в США за 2015-2016 гг. произошло 2493 схода, а в Индии за промежуток с 2010-2011 по 2014-2015 годы произошло 293 сходов, данные по Китаю являются закрытыми. Логичным представляется использование для анализа американских протоколов, как это было сделано, например, для оценки ущерба от транспортных происшествий в [3], или индийских протоколов. Однако хотя содержание протоколов транспортных происшествий в России и в США в целом является похожим, существуют и отличия: в российских протоколах имеется информация о наличии или отсутствии стрелочного перевода в месте схода, плане и профиле участка пути, на котором произошел сход. Данные факторы мы полагаем влияющими не только на сам сход вагонов, но и на тяжесть последствий от схода. По транспортным происшествиям в Индии детальная информация в открытых источниках отсутствует. Поэтому использование американских или индийских протоколов не представляется целесообразным, и анализ будет производиться исключительно по российским данным.

При исследовании количества вагонов в сходе можно построить доверительный интервал для потенциального числа сошедших вагонов или попытаться установить закон распределения числа вагонов в сходе, однако этих характеристик недостаточно, поскольку они будут такими же, например, и для поезда, состоящего из 3 вагонов, и для поезда, состоящего из 63 вагонов. Поэтому необходимо отыскание функциональной зависимости между количеством вагонов в сходе и различными факторами. В [4] в качестве факторов, влияющих на последствия схода, были выделены скорость поезда в момент схода, остаточная длина состава (общее количество подвижных единиц, начиная с первой сошедшей), наличие дополнительных локомотивов в середине/хвосте состава, доля груженых вагонов. Однако информация о радиусе кривой и наличии уклона в месте схода в расчет не принималась. В [5] оценивался уровень схода (уровень опасности), зависящий от класса пути, пропущенного тоннажа, наличия систем сигнализации (например, контролирующей занятость поездом секции). Но получаемая зависимость носит интегральный характер и не позволяет для конкретного поезда снизить риск схода вагонов. В [6] исследовалась схожая задача поиска функциональной зависимости между вероятностью схода и длиной подвижного состава, пройденным количеством

километров поездом и классом пути. Однако геометрические особенности пути также не были учтены. В этой связи необходимо уточнение и модификация предложенных в [4-6] зависимостей для исследуемой задачи с целью выработки практических рекомендаций.

Исследование российских протоколов по случаям схода вагонов показало, что некоторые из них заполнены частично, т.е. имеет место проблема пропущенных данных. Пропущенные значения имеют место как по скорости движения поезда, при которой произошел сход, так и по количеству вагонов в поезде. Поскольку восстановить эти параметры довольно сложно, то из дальнейшего анализа эти наблюдения были исключены. Помимо этого некоторые сходы произошли не вследствие технических причин (состояния пути, состояния тележек вагонов), а вследствие погодных условий или человеческого фактора, которые невозможно выразить в номинальной шкале, потому такие наблюдения также были исключены из рассмотрения. Вследствие чего построение различных функциональных зависимостей в работе проводилось на основе 172 наблюдений, а также было проведено сравнение выборок с пропущенными данными и без таковых.

2. Предварительный анализ данных

Вначале построим диаграмму частот количества вагонов в сходе, а также найдем описательные статистики количества вагонов в сходе.

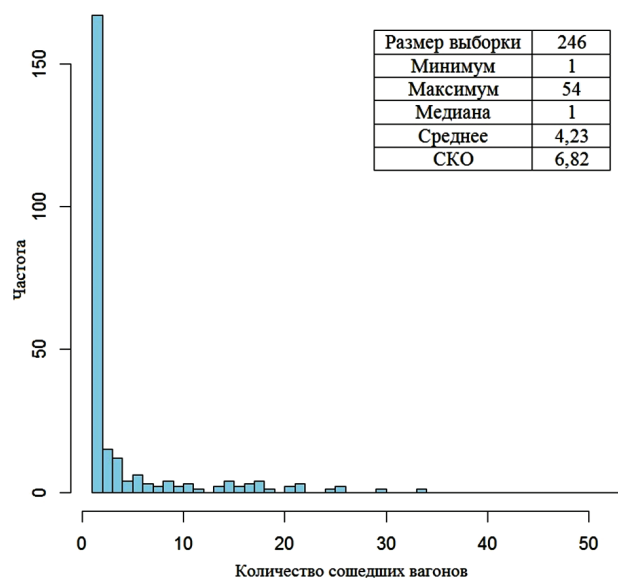


Рисунок 1 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов и крушении грузовых поездов

Как видно из рисунка 1, большинство происшествий происходит с одним вагоном в сходе, при этом среднее количество вагонов в сходе находится примерно на уровне 4 вагонов, а СКО составляет примерно 1,5 выборочного среднего. Поэтому важно отыскать функ-

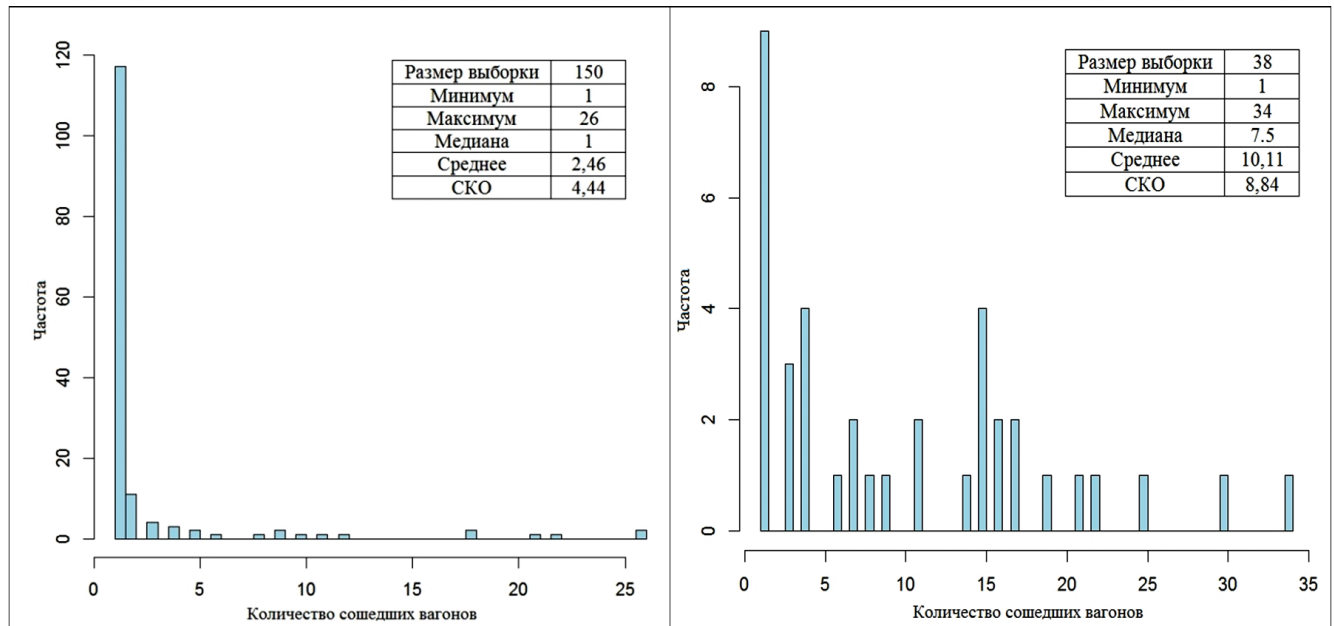


Рисунок 2 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов вне стрелок вследствие неисправности вагонов или секций локомотива (слева) и вследствие неисправности пути (справа)

циональную зависимость между количеством вагонов в сходе и параметрами сопутствующих факторов с целью уменьшения тяжести последствий схода.

При этом в зависимости от того, какая причина повлекла сход с рельсов подвижного состава и имелся ли стрелочный перевод в месте схода, описательные статистики количества вагонов в сходе будут отличаться.

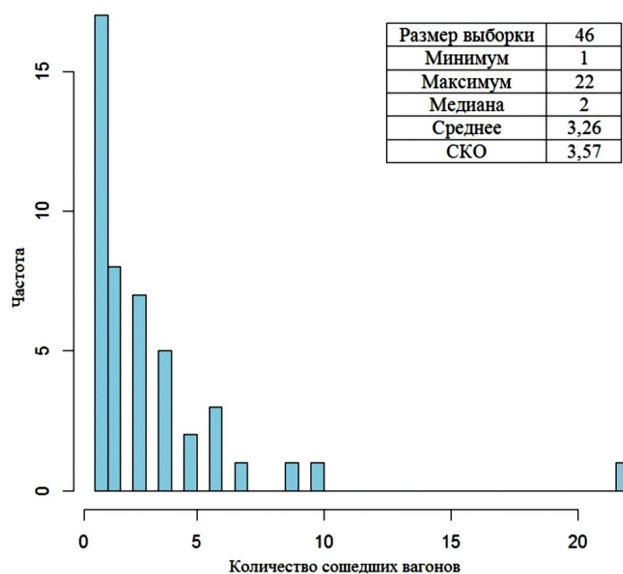


Рисунок 3 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов на стрелках, которые не вызваны ранее сошедшим составом, по причине неисправности пути или вагонов/секций локомотива

В дальнейшем будем проводить анализ отдельно для трех групп происшествий: сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки; сход

вследствие неисправности рельсов вне стрелки; сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом, по причине неисправности пути или вагонов/секций локомотива. Отметим, что за рассматриваемый промежуток времени произошло 4 схода на стрелках вследствие того, что сошедший вагон, проходя стрелку, повредил ее, чем вызвал дополнительно сход других вагонов. Эти случаи мы классифицируем отдельно, поскольку не всегда сошедшая единица подвижного состава при прохождении стрелки вызывает дополнительно сход других вагонов.

3. Основные обозначения

Рассмотрим в j -й группе происшествий среди n_j протоколов транспортных происшествий, в которых произошел сход грузовых вагонов при поездной работе, некоторый i -й ($i = 1 \dots n_j$) протокол. Пусть для данного протокола

c_{ij} – общее количество сошедших единиц подвижного состава (секций локомотива и вагонов);

k_{ij} – номер (от головы поезда) первой из сошедших единиц подвижного состава;

v_{ij} – скорость поезда в момент схода, км/ч;

l_{ij} – количество вагонов в поезде;

l_{ij}^L – количество секций локомотивов в поезде;

w_{ij} – вес поезда, т;

α_{ij} – кривизна кривой в месте схода (величина, обратно пропорциональная радиусу кривизны кривой; для прямой кривизна полагается равной нулю), m^{-1} ;

γ_{ij} – профиль пути в месте схода, измеряемый в тысячных, имеющий знак минус, если уклон представляет спуск, и знак плюс, если уклон представляет подъем.

Также введем вспомогательную переменную $c_{ij}^{\max} = l_{ij}^L + l_{ij} - k_{ij} + 1$, которая является реализацией некоторой случайной

величины $C^{\max} = l' + l - K + 1$, где K – случайная величина, соответствующая номеру (от головы поезда) первой из сошедших единиц подвижного состава. В дальнейшем будем называть случайную величину $C^{\max}$ остаточной длиной поезда. Отметим, что имеется статистическая связь между количеством вагонов в сходе и остаточной длиной поезда [4, 7-8]. Введем вспомогательную функцию, характеризующую степень загруженности (loading factor в [4]) поезда полезной нагрузкой, которая зависит от веса поезда w и количества l перевозимых им вагонов, и вычисляемую по формуле

$$\tilde{\mu}(w, l) \stackrel{\text{def}}{=} \pi_1 \frac{w}{l} + \pi_2, \quad (1)$$

где π_1 и π_2 – неизвестные параметры. Соответственно, чем ближе функция $\tilde{\mu}(w, l)$ к нулю, тем больше порожних вагонов перевозит поезд. И наоборот, чем ближе к единице функция $\tilde{\mu}(w, l)$, тем меньше порожних и больше груженых вагонов перевозит поезд. Так как тара 4-осных вагонов составляет порядка 23 тонн, а грузоподъемность – порядка 69 тонн, то, приняв данные значения за основу, коэффициенты π_1 и π_2 можно найти, решив систему линейных уравнений

$$\begin{cases} 23\pi_1 + \pi_2 = 0, \\ (23 + 69)\pi_1 + \pi_2 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Решив систему (2), получаем $\pi_1 = 1/69$, $\pi_2 = -1/3$. Подставив полученные значения π_1 и π_2 в (1), получаем

$$\tilde{\mu}(w, l) = \frac{w}{69l} - \frac{1}{3},$$

Обозначив $\tilde{\mu}_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{\mu}(w_{ij}, l_{ij})$, получим степень загруженности поезда полезной нагрузкой при i -м сходе в j -й группе происшествий. Отметим, что в американских протоколах происшествий количество груженых вагонов указано явно, в то время как в российских протоколах такая характеристика отсутствует, поэтому приходится выполнять некоторую оценку отношения количества груженых вагонов к общему количеству вагонов.

Отметим, что в некоторых протоколах могут отсутствовать те или иные характеристики или они могут быть указаны нечетко, поэтому возникает проблема пропущенных данных. Часто пропущенные значения усредняют имеющимися, однако в данной задаче такой подход не представляется возможным, поскольку каждое транспортное происшествие уникально, а их количество не велико. Поэтому в дальнейшем для каждой группы происшествий будем сравнивать выборки с пропущенными значениями и с полным набором требуемых характеристик.

4. Постановка задачи и метод ее решения

Рассмотрим j -ю группу транспортных происшествий, общее количество которых за рассматриваемый проме-

жуток времени равно n_j . Пусть C_j – случайная величина, характеризующая количество вагонов и секций локомотива, которые сойдут при сходе с рельсов для некоторой группы происшествий. Поскольку в сходе обязательно будет не менее одной единицы подвижного состава, то имеет место равенство

$$C_j = 1 + \tilde{C}_j,$$

где $\tilde{C}_j$ – вспомогательная неотрицательная случайная величина, закон распределения которой мы в дальнейшем будем оценивать, имеющая значения во множестве Z_+ . Отметим, что ряды распределения случайных величин C_j и $\tilde{C}_j$ зависят от набора параметров $w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma$ и от реализации $c^{\max}$ случайной величины $C^{\max}$, а реализации $\tilde{c}_{ij}$ случайной величины $\tilde{C}_j$ можно получить из соотношения $\tilde{c}_{ij} = c_{ij} - 1$.

Так как случайная величина $\tilde{C}_j$ является дискретной, то применять аппарат линейной регрессии для оценки функциональной зависимости между этой случайной величиной и параметрами $c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma$ некорректно. Частично похожим способом на линейную регрессию для целочисленной зависимой переменной является порядковая регрессия, однако в настоящем случае ее применять также некорректно, так как не для всех чисел из диапазона значений реализации выборки имеются сходы с идентичным количеством сошедших вагонов. Еще один способ отыскания искомой зависимости – квантильная регрессия [9]. Однако в силу небольшого количества наблюдений достоверность результатов квантильной регрессии на уровне надежности, к примеру, $\alpha = 0,999$ и 40 наблюдений, вызывает сомнения. Поэтому будем использовать метод максимального правдоподобия и отрицательную биномиальную регрессию, а именно будем полагать условное распределение $\tilde{C}_j$ обобщенно отрицательно биномиальным распределением с параметрами r_j и p_j .

Соотношения отрицательной биномиальной регрессии для рассматриваемого случая имеют вид [10-11]:

$$\left\{ \begin{aligned} P\{\tilde{C}_j = \tilde{c} \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma\} &= \\ &= \frac{\Gamma(\tilde{c} + r_j)}{\Gamma(\tilde{c} + 1)\Gamma(r_j)} p_j^{\tilde{c}} (1 - p_j)^{r_j}, \\ \mathbf{M}[\tilde{C}_j \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma] &= \frac{p_j r_j}{1 - p_j}, \\ \mathbf{D}[\tilde{C}_j \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma] &= \frac{p_j r_j}{(1 - p_j)^2}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Пусть

$$\begin{aligned} \mathbf{M}[\tilde{C}_j \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma] &= \\ = f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D[\tilde{C}_j | C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma] = \\ = f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)(1 + \\ + \theta_j f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)). \end{aligned} \quad (5)$$

где $f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)$ – некоторая функция, как правило, являющаяся экспоненциальным преобразованием от линейной по подлежащим определению параметрам $a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}$ функции, параметр $\theta_j > 0$ характеризует сверхдисперсию и также подлежит определению.

Подставив (4), (5) в (3) и введя для удобства дополнительное обозначение $a_j^{\text{def}} = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j})^T$, получаем

$$p_j = \frac{\theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)}{1 + \theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)}, r_j = \frac{1}{\theta_j}.$$

Таким образом

$$\begin{aligned} P\{\tilde{C}_j = \tilde{c}_{ij} | C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma\} = \\ = \frac{\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j)}{\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1)\Gamma(1/\theta_j)} (\theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma))^{\tilde{c}_{ij}} \times \\ \times (1 + \theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma))^{-(\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j)}. \end{aligned}$$

Построим логарифмическую функцию правдоподобия

$$\begin{aligned} \bar{L}_j(a_j, \theta_j, \tilde{c}_{ij}, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}, i = \overline{1, n_j}) = \\ = \ln \left(\prod_{i=1}^{n_j} P\{\tilde{C}_j = \tilde{c}_{ij} | c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}\} \right) = \\ = -n_j \ln(\Gamma(1/\theta_j)) + \sum_{i=1}^{n_j} (\ln(\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j)) + \\ + \tilde{c}_{ij} \ln(\theta_j f_j(a_j, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij})) - \\ - (\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j) \ln(1 + \theta_j f_j(a_j, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij})) - \\ - \ln(\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1))). \end{aligned}$$

Поставим задачу по отысканию неизвестного вектора a_j и параметра θ_j

$$\begin{aligned} (\theta_j^*, a_j^*)^T = \\ = \arg \max_{a_j \in R_j^m, \theta_j > 0} \bar{L}_j(a_j, \theta_j, \tilde{c}_{ij}, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}, i = \overline{1, n_j}). \end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что качество построенной модели (выбора функции $f_j(\cdot)$) характеризуется не только оптимальным значением логарифмической функции максимального правдоподобия $\bar{L}_j(a_j^*, \theta_j^*, \tilde{c}_{ij}, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}, i = \overline{1, n_j})$, но и значением параметра θ_j^* . Чем ближе параметр θ_j^* к нулю, тем построенная модель лучше, поскольку дисперсия случайной величины $\tilde{C}_j$ линейна по параметру θ .

5. Решение задачи

Вначале опишем общие принципы выбора функций $f_j(\cdot)$. Согласно [9] функции следует выбирать экспонентами от некоторой линейной по оцениваемым параметрам регрессии функции. Согласно [4] в качестве факторов, сопутствующих транспортному происшествию, выбираются логарифмы скорости поезда, логарифмы остаточной длины поезда, степень загруженности поезда полезной нагрузкой, а также их различные комбинации. Теперь рассмотрим отдельно каждую группу транспортных происшествий.

5.1. Сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки

Для данной группы транспортных происшествий выберем функцию $f_j(\cdot)$ вида

$$\begin{aligned} f_1(a_1, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = f_1(a_1, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = \\ = \chi_{\mathfrak{a} \neq 0} \exp\{a_{11} + a_{21} \mathfrak{a} \ln(v) + a_{31} (1 - \tilde{\mu}) \ln(c^{\max}) \ln(v) \cdot \\ \cdot \min(0, \gamma) + a_{41} (1 - \tilde{\mu}) \ln(c^{\max}) + a_{51} (1 - \tilde{\mu})^2 \ln(c^{\max}) \ln(v) \cdot \\ \cdot \min(0, \gamma) + a_{61} \tilde{\mu} + a_{71} \chi_{\gamma > 0} \tilde{\mu} \ln(c^{\max}) \ln(v)\} + \\ + \chi_{\mathfrak{a} = 0} \exp\{a_{81} + a_{91} \chi_{\gamma < 0} \ln(c^{\max}) \ln(v) + a_{101} \chi_{\gamma > 0} \tilde{\mu} \ln(v) \ln^2(c^{\max})\}, \end{aligned}$$

где χ_A – характеристическая (индикаторная) функция некоторого события A , т.е.

$$\chi_A = \begin{cases} 0, & x \notin A, \\ 1, & x \in A. \end{cases}$$

Прокомментируем выбор функции $f_j(\cdot)$. Функция распадается на два слагаемых: первое характеризует тяжесть последствий от схода в кривых ($\chi_{\mathfrak{a} \neq 0}$), а второе – тяжесть последствий от схода в прямых участках пути ($\chi_{\mathfrak{a} = 0}$).

В части, связанной со сходами в кривых, можно выделить три группы слагаемых: первая группа содержит слагаемые с параметрами a_{11} и a_{21} , которые инвариантны относительно степени загруженности поезда, вторая группа содержит слагаемые с параметрами a_{31}, a_{41}, a_{51} , влияние которых увеличивается с уменьшением степени загрузки поезда, третья группа содержит слагаемые с параметрами a_{61}, a_{71} , влияние которых увеличивается с увеличением степени загрузки поезда. Тяжесть последствий для перегруженных поездов усиливает наличие подъема, а для порожних поездов усиливает не только наличие спуска, но и его величина. Общим для всех групп слагаемых является то, что практически в каждом слагаемом есть либо логарифм скорости движения, либо логарифм максимального количества вагонов в сходе, а порой и их произведение. Это связано с тем, что с увеличением скорости поезда и остаточной длины поезда потенциальное количество сошедших вагонов также увеличивается.

В части, связанной со сходами в прямых, слагаемое с параметром a_{91} отлично от нуля в случае движения на

Таблица 1 – Оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* по выборке со сходами в кривых и прямых участках пути

a_{11}^*	a_{21}^*	a_{31}^*	a_{41}^*	a_{51}^*	a_{61}^*	a_{71}^*	a_{81}^*	a_{91}^*	a_{101}^*	θ_1^*
-7,76	315,69	286,88	0,63	-333,03	4,32	0,17	-1,55	0,2	0,04	3,83

Таблица 2 – Оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* по выборке со сходами только в кривых участках пути (построены по 65 наблюдениям)

a_{11}^*	a_{21}^*	a_{31}^*	a_{41}^*	a_{51}^*	a_{61}^*	a_{71}^*	a_{81}^*	a_{91}^*	a_{101}^*	θ_1^*
-7,25	307,22	284,43	0,54	-329,86	3,85	0,16	—	—	—	1,87

Таблица 3 – Оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* по выборке со сходами только в прямых участках пути (построены по 35 наблюдениям)

a_{11}^*	a_{21}^*	a_{31}^*	a_{41}^*	a_{51}^*	a_{61}^*	a_{71}^*	a_{81}^*	a_{91}^*	a_{101}^*	θ_1^*
—	—	—	—	—	—	—	-1,52	0,2	0,04	6,05

спусках, слагаемое с параметром a_{101} отлично от нуля в случае движения на подъемах. При этом сходы с серьезными последствиями (более 15 вагонов в сходе) происходили не на крутых спусках или подъемах, поэтому используются лишь наличие спуска или подъема, а не сама величина подъема или спуска.

В результате решения задачи (6) получаем следующие оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* (таблица 1).

Отметим, что в случае подъема в кривых участках пути все слагаемые помимо константы в функции $f_j(\cdot)$ оказываются неотрицательными при полученных значениях параметров a_{21}^* , ..., a_{101}^* . Таким образом, любое увеличение параметров $c^{\max}$, v , $\tilde{\mu}(w, l)$, α приводит к большему среднему количеству вагонов в сходе, что соответствует физике схода. В случае спуска в кривых участках пути имеется неположительное слагаемое с параметром a_{61}^* . Это связано, в частности, с тем, что при небольшой загрузке поездов $\tilde{\mu} < 0,13587$ выборочное среднее количества вагонов в сходе составило 4,54 вагона при выборочном среднем в 1,38 вагона в случае $\tilde{\mu} \geq 0,13587$. Данный факт подтверждается предложенной моделью в силу того, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(a_1^*, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma)}{\partial \gamma} &= \\ &= f_1(a_1^*, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma)(a_{31}^*(1 - \tilde{\mu}) \ln(v) \ln(c^{\max}) + \\ &+ a_{51}^*(1 - \tilde{\mu})^2 \ln(v) \ln(c^{\max})) < 0 \Leftrightarrow a_{31}^* + a_{51}^*(1 - \tilde{\mu}) < 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 1 - \tilde{\mu} < -\frac{a_{31}^*}{a_{51}^*} \Leftrightarrow \tilde{\mu} > 1 + \frac{a_{31}^*}{a_{51}^*} = 0,13587. \end{aligned}$$

Отметим, что протоколов по сходу в прямых недостаточно, поскольку, если рассмотреть отдельно выборки по сходам в прямых и в кривых участках пути, получаются следующие результаты (таблица 2).

Сравнивая результаты в таблицах 1, 2, 3, заключаем, что совместное рассмотрение сходов в кривых и прямых участках пути несколько видоизменяет прогнозируемое

среднее количество вагонов в сходе в кривых участках пути, оставляя практически неизменным среднее количество вагонов в сходе в прямых участках пути. При этом дисперсия, характеризуемая параметром θ_1^* , изменяется существенно. Поэтому следует разделять сходы в кривых участках пути и сходы в прямых участках пути.

Более того, при обработке данных оказалось, что выборочное среднее количества сошедших вагонов в прямых больше выборочного среднего количества сошедших вагонов в кривых участках пути (3,74 вагона против 2,23 вагона). Поэтому желательно дополнительное исследование как с точки зрения глубины исследования (увеличения количества рассматриваемых протоколов), так и с точки зрения качества рассматриваемых протоколов, а именно уточнения сведений о причинах происшествий и характеристик пути в месте схода, особенно для сходов с рельсов в прямых участках пути.

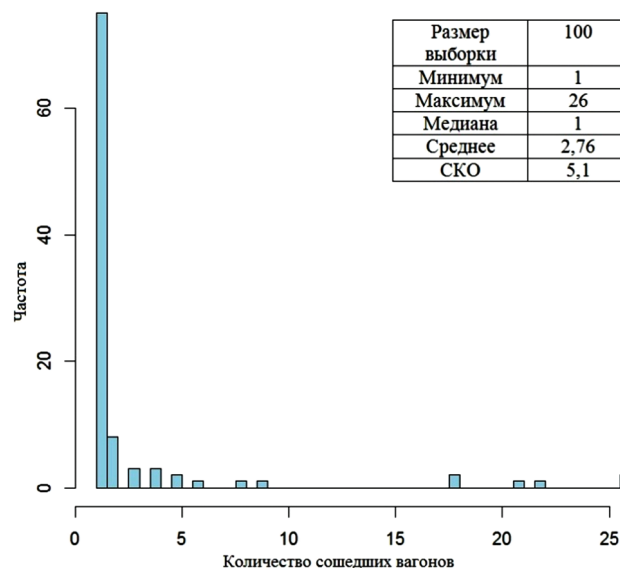


Рисунок 4 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов вне стрелок вследствие неисправности вагонов или секций локомотива по выборке без пропущенных данных

Подробный пример использования полученных соотношений приведен в [12].

Анализ в данном разделе проводился по выборке со следующими характеристиками (рисунок 4).

5.2. Сход вследствие неисправности пути вне стрелки

Для данной группы транспортных происшествий выберем функцию $f_2(\cdot)$ вида

$$f_2(a_2, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = f_2(a_2, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = \exp\{a_{12} + a_{22}\tilde{\mu} + a_{32} \ln(v) + a_{42} \ln(c^{\max})\}.$$

Принцип построения функции $f_2(\cdot)$ схож с принципом построения функции $f_1(\cdot)$ и одновременно данная функция похожа на функцию, предлагаемую для оценки среднего количества вагонов в сходе по причине неисправности пути [4]. Кроме того, в функции $f_2(\cdot)$, в отличие от функции $f_1(\cdot)$, отсутствует параметр γ . Это связано с тем, что из 38 происшествий, произошедших по причине неисправности пути, в 11 случаях не удастся определить величину спуска или уклона. Также отсутствует параметр $\mathfrak{a}$, поскольку с учетом данного параметра не найдена модель с наилучшим значением логарифмической функции правдоподобия.

В результате решения задачи (6) получаем следующие оценки максимального правдоподобия $a_{12}, a_{22}, a_{32}, a_{42}, \theta_2^*$ (таблица 4).

Таблица 4 – Оценки максимального правдоподобия $a_{12}^*, a_{22}^*, a_{32}^*, a_{42}^*, \theta_2^*$

a_{12}^*	a_{22}^*	a_{32}^*	a_{42}^*	θ_2^*
-6,4	1,01	0,68	1,48	0,3

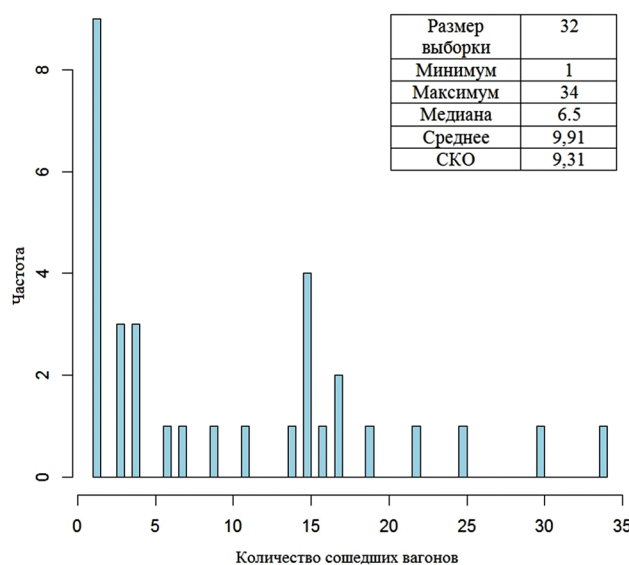


Рисунок 5 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов вне стрелок вследствие неисправности пути по выборке без пропущенных данных

Все слагаемые функции $f_2(\cdot)$ оказываются положительными, а значит, любое увеличение параметров движения приведет к большему среднему количеству вагонов в сходе, что является логичным.

Анализ в данном разделе проводился по выборке со следующими характеристиками (рисунок 5).

5.3. Сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом

Для данной группы транспортных происшествий выберем функцию $f_3(\cdot)$ вида

$$f_3(a_3, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = f_3(a_3, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = \exp\{a_{13} + a_{23}\tilde{\mu} \ln(v) + a_{33}\tilde{\mu} \ln^2(c^{\max}) + a_{43} \ln(v) + a_{53} \ln(v) \ln(c^{\max})\}.$$

Отметим, что в данном случае функция $f_3(\cdot)$ не содержит переменных γ и $\mathfrak{a}$, поскольку их определение для происшествий на стрелках только исходя из протоколов крайне затруднительно, а порой и вовсе невозможно.

В результате решения задачи (6) получаем следующие оценки максимального правдоподобия $a_{13}, a_{23}, \dots, a_{53}, \theta_3^*$ (таблица 5).

Таблица 5 – Оценки максимального правдоподобия $a_{13}^*, a_{23}^*, \dots, a_{53}^*, \theta_3^*$

a_{13}^*	a_{23}^*	a_{33}^*	a_{43}^*	a_{53}^*	θ_3^*
-1,49	0,99	-0,16	-0,91	0,43	0,41

Анализ в данном разделе проводился по выборке со следующими характеристиками (рисунок 6).

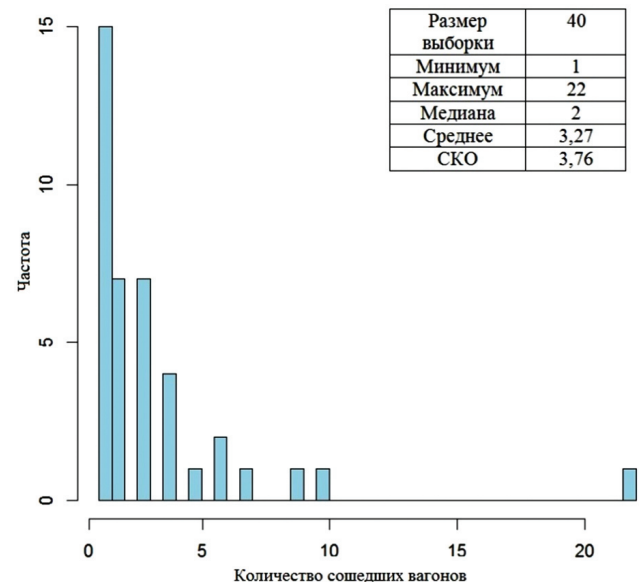


Рисунок 6 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов на стрелках, которые не вызваны ранее сошедшим составом

6. Заключение

В настоящей статье построена функциональная зависимость между средним количеством грузовых вагонов в сходе с рельсов и различными факторами движения: скоростью поезда, планом и профилем пути, длиной и массой поезда. Определены различные группы транспортных происшествий: сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки; сход вследствие неисправности рельсов вне стрелки; сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом. Для каждой группы транспортных происшествий при помощи метода максимального правдоподобия и отрицательной биномиальной регрессии получены функции среднего количества вагонов в сходе. Получена формула, которая позволяет при заданном наборе различных факторов движения: скорости поезда, плана и профиля пути, длины и веса поезда – определить ряд распределения количества вагонов в сходе. Результаты данного исследования в дальнейшем могут быть использованы при оценке рисков схода с рельсов подвижного состава в грузовых поездах на сети железных дорог Российской Федерации.

Библиографический список

1. <http://safetydata.fra.dot.gov/>
2. <http://www.indianrailways.gov.in/>
3. Горяинов А.В., Замышляев А.М., Платонов Е.Н. Анализ влияния факторов на ущерб от происшествий с помощью регрессионных моделей // Надежность. 2013. Т. 2. С. 126-144.
4. Liu X., Saat M. R., Qin X., Barkan C. P. L. Analysis of U.S. freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression // Accident Analysis and Prevention. 2013. V. 59. P. 87-93.
5. Liu X., Rapik Saat M., Barkan C. P. L. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis // Accident Analysis and Prevention. 2017. V. 98. P. 1-9.
6. Anderson R.T., Barkan C.P.L. Derailment probability analysis and modeling of mainline freight trains // Proceedings of the 8th International Heavy Haul Conference, International Heavy Haul Association, Rio de Janeiro. 2005. P. 491-497.

7. Bagheri M., Saccomanno F., Chenouri S., Fu L.P. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist // Accident Analysis and Prevention. 2011. V. 43. P. 613-620.

8. Saccomanno F.F., El-Hage S. Minimizing derailments of railcars carrying dangerous commodities through effective marshaling strategies // Transportation Research Record. 1989. V. 1245. P. 34-51.

9. Koenker R., Hallock K. F.. Quantile Regression // Journal of Economic Perspectives. 2001. V. 15. No. 4. P. 143-156.

10. DeGroot M. H., Schervish M. J. Probability and Statistics (Fourth ed.). Addison-Wesley, 2012.

11. Cameron A. C. and Trivedi P. K. Essentials of Count Data Regression in A Companion to Theoretical Econometrics (ed B. H. Baltagi). Blackwell Publishing Ltd, 2003.

12. Замышляев А.М., Игнатов А.Н. и др. Об оценке количества вагонов в сходе при поездной работе на основе факторных моделей // Труды шестой научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. ИСУЖТ-2017». 2017. С. 132-135.

Сведения об авторах

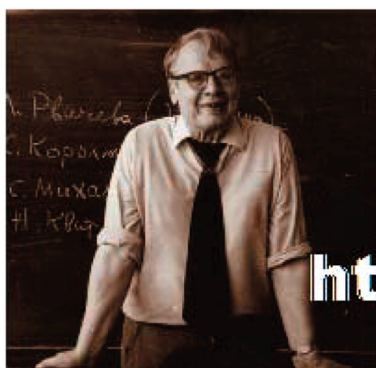
Алексей М. Замышляев – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИ-АС», Москва, Россия, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: a.zamyshlyayev@vniias.ru

Алексей Н. Игнатов – Московский Авиационный институт, аспирант, Москва, Россия, тел. +7 (906) 059 50 00, alexei.ignatov1@gmail.com

Андрей И. Кибзун – доктор физико-математических наук, профессор, Московский Авиационный институт, заведующий кафедрой, Москва, Россия, тел. +7 (499) 158-45-60, e-mail: kibzun@mail.ru

Евгений О. Новожилов – кандидат технических наук, начальник отдела АО «НИИАС», Москва, Россия, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: eo.novozhilov@vniias.ru

Поступила 16.10.2017



<http://Gnedenko-Forum.org/>

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: E.Patrikeeva@gismps.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 приставным 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 A4; 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.: 8-916-105-81-31
e-mail: evgenya.patrikeeva@yandex.ru

ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № _____ 20__ г. по № _____ 20__ г., количество экз. _____

Полное наименование организации	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо: Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Реквизиты: ООО «Журнал «Надежность»

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

Тел./факс: (495) 967-77-02 , e-mail: evgenya.patrikeeva@yandex.ru

ИНН 7709868505 КПП 770901001

р/с 40702810100430000017

к/с 30101810100000000787

Адрес доставки:

Кому: _____

Куда: _____

Для оформления подписки на журнал «Надежность» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте.

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Стоимость годовой подписки 4180-00 руб, в т.ч. НДС 10%.

Периодичность – 4 номера в год.

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