

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

Ответственный секретарь:

Замышляев Алексей Михайлович – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИАС» (Москва, 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 «Управления и защиты информации» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

Уткин Лев Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Телематика» (при ЦНИИ РТК) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Юркевич Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, Главный научный сотрудник лаборатории Технической диагностики и отказоустойчивости ИПУ 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 28.05.2018

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №

Формат 60х90/8, Бумага глянцев

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

Структурная надежность. Теория и практика

Тюрин С.Ф. Обеспечение надежности технических средств путем их троирования и расчленения	4
Похабов Ю.П. Проблемы надёжности и пути их решения при создании уникальных высокоответственных систем	10
Гадолина И.В., Побегайло П.А., Крицкий Д.Ю., Папич Любиша. Уточнение инженерной методики оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов	18
Тарарычкин И.А. Влияние структурного состава на стойкость трубопроводных систем к повреждениям узловых элементов	24
Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре	30

Функциональная надежность. Теория и практика

Финоченко Т.А., Переверзев И.Г., Баланова М.В. Физические факторы, воздействующие на надежность работы машинистов кранов на железнодорожном ходу	36
Ариничева О.В., Малишевский А.В. Повышение надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов	40

Функциональная безопасность. Теория и практика

Проневич О.Б., Шубинский И.Б. Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков	48
Гнеденко-Форум	55

Уважаемые коллеги!

Развитие теории и практики надежности неразрывно связано с созданием новых систем, технологий, процессов. При реализации современных систем и процессов в интересах пользователей производится их информатизация. Это обеспечивает эффективное и оперативное обслуживание пользователей. Теперь уже надежность рассматривают, как способность системы поставлять обслуживание, которому можно оправданно доверять. Здесь отказ системы – это переход от правильного обслуживания к неправильному, при котором не осуществляется функция системы, а ошибка – это состояние системы, при котором может возникнуть последующий отказ. Такую трактовку надежности называют гарантоспособность (англоязычная трактовка этого термина “dependability”) системы. Очевидно, что полной гарантии поставлять правильное обслуживание системой никто не может дать – всегда имеет место риск нарушения правильности обслуживания. Управление риском гарантоспособности системы – большая самостоятельная задача, включающая принципы и методы оценивания риска, методы сбора и обработки данных для управления рисками, оценка уровней рисков, оценка интегральных рисков и методы принятия решения по результатам обработки рисков. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости включить в состав основных направлений деятельности журнала «Надежность» новое самостоятельное направление: Управление рисками. Теория и практика.

Теоретические и практические проблемы надежности и безопасности систем с учетом оценки рисков привлекают к себе большое число исследователей как традиционно в Европе, США, России, так, особенно в последние годы, в странах Юго-Восточной Азии, Китае, Индии. Получено много полезных научных результатов, накоплены практические данные. Использование этих результатов в исследованиях авторов журнала «Надежность» будет способствовать повышению научного и прикладного уровней публикуемых статей и цитируемости журнала в международных базах данных.

Редколлегия журнала «Надежность» надеется на поступление в редакцию статей, обобщающих оригинальные научные результаты и/или практические исследования авторов, а также обзоры последних достижений в области гарантоспособности систем. Редакция журнала открыта для публикации обзоров о научно – технических конференциях, симпозиумах, семинарах по тематике журнала

Желаем авторам журнала «Надежность» больших творческих успехов, здоровья, благополучия.

Обеспечение надежности технических средств путем их троирования и расчетверения

Сергей Ф. Тюрин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия



Сергей Ф. Тюрин

Резюме. Резервирование, в частности, структурное является одним из основных способов повышения надёжности, обеспечивает отказо- и сбоеустойчивость элементов, устройств и систем. Согласно МПК – международной патентной классификации, класс устройств и способов G06F11/18 – «using passive fault-masking of the redundant circuits, e.g. by quadding or by majority decision circuits». У нас это трактуется как «повышение надёжности за счёт использования пассивного маскирования сбоев, например, с помощью расчетверения (quadding) или мажоритарных решающих схем». При этом, очевидно, что «fault-masking» – это маскирование не только сбоев, но и отказов. Мажоритарные решающие схемы или просто мажоритары в минимальном варианте реализуют выбор «2 из 3-х». Принятый термин «расчетверение» на взгляд автора не слишком благозвучный, ибо он может вызвать ассоциацию с четвертованием, но ничего не поделаешь. Такая избыточность согласно выше приведённой формулировке вроде как не требует специальной решающей схемы. Однако, это выполняется не всегда. В случае выдачи результирующего сигнала после учетверённой логики, например, на исполнительный орган, всё равно нужна схема выбора «3 из 4-х». Другой вариант повышения надёжности фиксирует класс G06F 11/20 – «using active fault-masking, e.g. by switching out faulty elements or by switching in spare elements». У нас он переводится как «с использованием маскирования сбоев с помощью замещения, например, выключения сбойных элементов или переключения на резервные элементы». Здесь пропущено слово «активного», таким образом имеем активную и пассивную отказоустойчивость. В статье исследуется пассивная отказоустойчивость, использующая троирование и расчетверение и сравниваются соответствующие вероятности безотказной (бессбойной) работы. При этом используется распределение Вейбулла, которое наиболее адекватно описывает надёжность в смысле радиационной стойкости в условиях воздействия тяжёлых заряженных частиц. Показывается, что в ряде случаев расчетверение имеет меньшую избыточность, чем троирование. Предлагается формула, описывающая условия предпочтительности расчетверения на транзисторном уровне.

Ключевые слова: надёжность, резервирование, троирование, расчетверение, отказы, сбои, интенсивность отказов.

Формат цитирования: Тюрин С.Ф. Обеспечение надежности технических средств путем их троирования и расчетверения // Надежность. 2019. №1. С. 4-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-4-9

Введение

Резервирование (Redundancy) согласно используемому новому ГОСТ [1] это «способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций». Особенно важно резервирование для систем, работающих в условиях радиации, например, для систем управления космическими аппаратами. В этой области применяют радиационно-стойкое проектирование (Radiation Hardened by Design, RHBD), включающее, например, троирование (Triple Modular Redundancy, TMR) [2, 3]. Мажоритарное резервирование, при котором отказ или сбой маскируются без особых временных затрат, указано в ГОСТ [1]. Однако нет соответствующего термина «пассивная» отказоустойчивость. Активная, адаптивная отказоустойчивость [4, 5] обладает меньшей избыточностью, по сравнению с пассивной, но она требует процедур контроля, диагностики, реконфигурации, на что требуется значительное время. Для особо ответственных систем (систем критического применения), работающих относительно короткое время, в том числе в условиях радиации, часто применяют мажоритарное резервирование, требующее более чем 300% избыточности. В то же время иногда может быть применено и так называемое расчленение (учетверение). Оказывается, в ряде случаев избыточность в 300% может быть затратнее избыточности в 400%, если учитывать дополнительное требуемое оборудование (так называемые «мажоритары»), которые иногда не нужны при расчленении. Рассмотрим особенности таких вариантов резервирования.

Постановка задачи

При троировании происходит голосование по принципу «два из трёх», то есть в бинарном случае – по большинству единиц. В более широком смысле под мажоритированием понимают выбор

$$(r+1) \text{ from } (2r+1), \quad (1)$$

где r – число маскируемых (парируемых) отказов.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ для экспоненциальной модели Вейбулла [6] имеет вид:

$$P_{(r+1) \text{ from } (2r+1)}(t) = \sum_{i=0}^r C_{2r+1}^{i+1} \left\{ e^{-(2r+1-i)\lambda \cdot t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^i \right\}, \quad (2)$$

где λ – интенсивность отказов одного канала (размерность 1/час); α – коэффициент распределения Вейбулла, $1 < \alpha < 2$; t – время работы в часах; r – число парируемых отказов (сбоев).

Таким образом, избыточность для r отказов (сбоев) путём мажоритирования описывается выражением

$$2r+1. \quad (3)$$

То есть, парируются отказы (сбои) в r каналах из возможных $2r+1$.

При расчленении парируется один отказ (сбой) в одном из 4-х элементов, которые могут трактоваться и как каналы, и как, например, отдельные КМОП транзисторы.

Более широкая трактовка такого резервирования может быть названа, например, «расквადрированием» и требует избыточности

$$(r+1)^2. \quad (4)$$

В этом случае парируются отказы (сбои) в r элементах из возможных $(r+1)^2$.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ при отсутствии необходимости в устройстве голосования имеет вид:

$$P_{(r) \text{ from } (r+1)^2}(t) = \sum_{i=0}^r C_{(r+1)^2}^i \left\{ e^{-[(r+1)^2-i]\lambda \cdot t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^i \right\}. \quad (5)$$

Исследуем выражения (1) – (5) с учётом особенностей различной реализации избыточности.

Теоретическая часть

При мажоритировании 2 из 3-х ($r = 1$) имеем три канала и мажоритарный элемент (МЭ), получаем структурную схему надёжности (рис. 1).

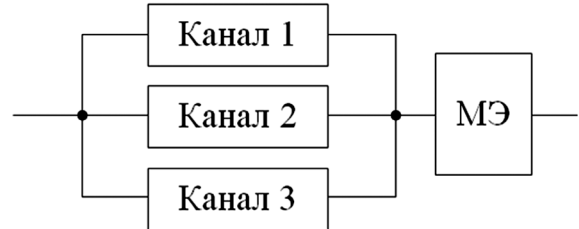


Рисунок 1 – Мажоритирование 2 из 3-х

Получаем с учетом того, что в канале n элементов (например, транзисторов) и сложность МЭ – 12 транзисторов [7]:

$$P_{*3} = \left(3e^{-2 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^\alpha} - 2e^{-3 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^\alpha} \right) e^{-(12) \cdot \lambda \cdot t^\alpha}. \quad (6)$$

С целью парирования отказов (сбоев) в МЭ получим структурную схему надёжности (рис. 2).

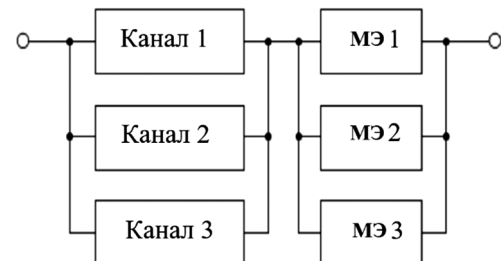


Рисунок 2 – Мажоритирование мажоритарных элементов

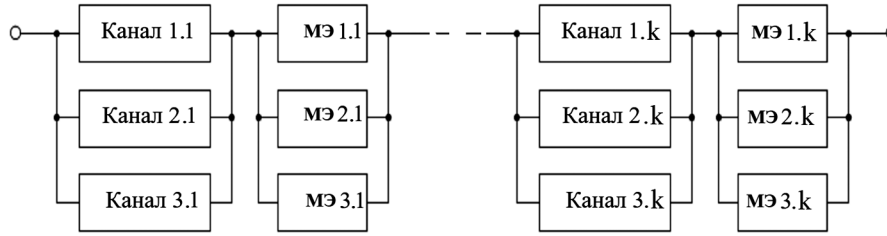


Рисунок 3 – Глубокое мажоритирование

В этом случае получим:

$$P_{*33} = (3e^{-2 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^\alpha} - 2e^{-3 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^\alpha}) \cdot (3e^{-2 \cdot (12) \cdot \lambda \cdot t^\alpha} - 2e^{-3 \cdot (12) \cdot \lambda \cdot t^\alpha}). \quad (7)$$

Кроме того, необходимы три источника питания. Таким образом, парируется либо отказ одного источника питания, либо отказ одного канала, либо отказ одного мажоритарного элемента.

Мажоритирование 3 из 5. Соответственно, необходимо пять мажоритарных элементов «3 из 5»:

$$P_{*33}^{3 \text{ из } 5}(t) = e^{-5 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} + 5e^{-4 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha}) + 10e^{-3 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^2 \cdot \left[e^{-5 \cdot \lambda_{м.э.3/5} \cdot t^\alpha} + 5e^{-4 \cdot \lambda_{м.э.3/5} \cdot t^\alpha} (1 - e^{-\lambda_{м.э.3/5} \cdot t^\alpha}) + 10e^{-3 \cdot \lambda_{м.э.3/5} \cdot t^\alpha} (1 - e^{-\lambda_{м.э.3/5} \cdot t^\alpha})^2 \right]. \quad (8)$$

Мажоритирование с возможностью работы на одном канале. В этом случае система способна переустраиваться в дублированную и из неё, в случае необходимости, – в одноканальную. Для этого нужна более сложная дополнительная аппаратура. С учётом дополнительной аппаратуры реконфигурации (интенсивность отказов λ_d) получим:

$$P_{*33} = \left[1 - (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^3 \right] \cdot \left[3e^{-2(\lambda_{м.э.} + \lambda_d) \cdot t^\alpha} - 2e^{-3(\lambda_{м.э.} + \lambda_d) \cdot t^\alpha} \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) не учитывает вероятности «промаха» в случае, если оперативное тестирование не приводит к обнаружению отказавшего канала.

При так называемом **глубоком мажоритировании** каналы «дробятся» на k частей (рис. 3).

Примем допущение, что λ – интенсивность отказов всего канала – разбивается на k одинаковых частей, тогда получим

$$P_{*33} = \left[3e^{-2 \cdot n \cdot \frac{\lambda}{k} \cdot t^\alpha} - 2e^{-3 \cdot n \cdot \frac{\lambda}{k} \cdot t^\alpha} \right]^k \cdot \left[3e^{-2 \cdot 12 \cdot t^\alpha} - 2e^{-3 \cdot 12 \cdot t^\alpha} \right]^k. \quad (10)$$

При расчетверении ($r = 1$) n элементов получим:

$$P_4(t) = \left[e^{-4 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} + 4e^{-3 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha}) \right]^n. \quad (11)$$

Однако выражение (10) справедливо лишь до ограничения $(r+1)^2 \leq q$ в связи с требованиями Мида-Конвей [8] на максимальное число последовательно соединённых транзисторов r в схеме, их не может быть больше q (до и после расчетверения).

Пусть n – количество транзисторов (при соблюдении ограничений Мида-Конвей); m – число выходов схемы. Тогда для $r = 1$, сравнивая расчетверение и троирование, получим:

$$4n \leq 3n + 12m. \quad (12)$$

Иначе, при выполнении соотношения

$$1 \leq 12 \frac{m}{n} \quad (13)$$

расчетверение «не дороже» троирования.

В случае расчетверения каналов необходимо устройство голосования «три из четырёх», поэтому получим:

$$P_4(t) = \left[e^{-4 \cdot n \cdot \lambda \cdot t^\alpha} + 4e^{-3 \cdot n \cdot \lambda \cdot t^\alpha} (1 - e^{-n \cdot \lambda \cdot t^\alpha}) \right]^n \cdot \left[e^{-4 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} + 4e^{-3 \cdot \lambda \cdot t^\alpha} (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha}) \right]^m. \quad (14)$$

Экспериментальная часть

Без учёта вероятности безотказной работы мажоритарного элемента получаем вероятность безотказной работы мажоритарной системы $P_{*33}^{2 \text{ из } 3}$ с выбором 2 из 3:

$$P_{*33}^{2 \text{ из } 3} = p^3 + 3p^2(1-p) = 1 - (1-p)^3 - 3p(1-p^2) = 3p^2 - 2p^3. \quad (15)$$

Таким образом, например, для $P = 0,9$ получаем существенный прирост:

$$P_{*33}^{2 \text{ из } 3}(t) = 3(0,9)^2 - 2(0,9)^3 = 0,972. \quad (16)$$

Мажоритирование 3 из 5 ещё более повышает надёжность:

$$P_{*33}^{3 \text{ из } 5}(t) = P^5 + 5P^4(1-P) + 10P^3(1-P)^2. \quad (17)$$

Например,

$$P_{*33}^{3 \text{ из } 5}(t) = (0,9)^5 + 5(0,9)^4(0,1) + 10(0,9)^3(0,1)^2 = 0,99144. \quad (18)$$

Без учёта этой дополнительной аппаратуры и мажоритарных элементов, которые также троированы, в случае мажоритирования с возможностью работы на одном оставшемся канале, получим:

$$P_{*33} = P^3 + 3P^2(1-P) + 3P(1-P)^2 = 1 - (1-P)^3. \quad (19)$$

В этом случае вероятность безотказной работы достигает значения

$$P_{м.с1} = 1 - (0,1)^3 = 0,999. \quad (20)$$

Получим временные графики сравнения выражений вероятности безотказной работы для одноканальной цифровой системы $e^{-\lambda t}$ с мажоритированием: 2 из 3 (5) и 3 из 5 (7) в системе компьютерной математики MathCad (рис. 4).

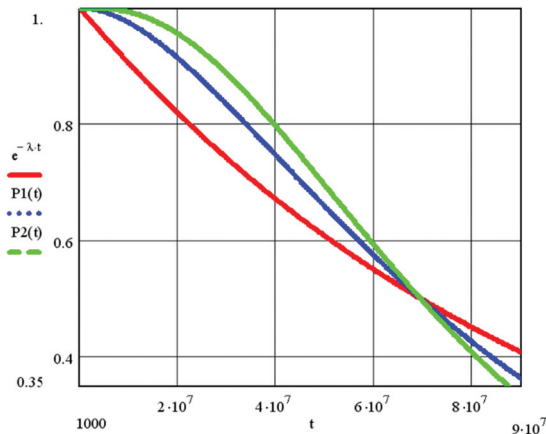


Рисунок 4 – Сравнение одноканальной цифровой системы $e^{-\lambda t}$ с мажоритированием: 2 из 3 ($P_1(t)$ – синяя линия), – 3 из 5 ($P_2(t)$ – зеленая линия) при $\lambda = 10^{-8}$, $\alpha = 1$

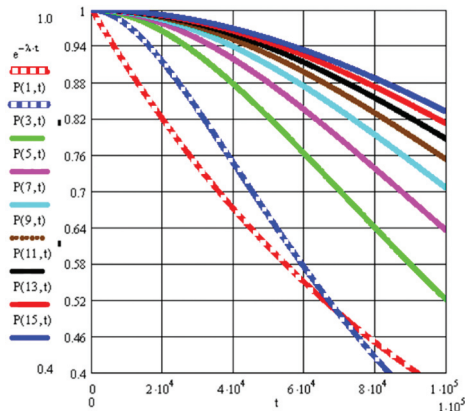
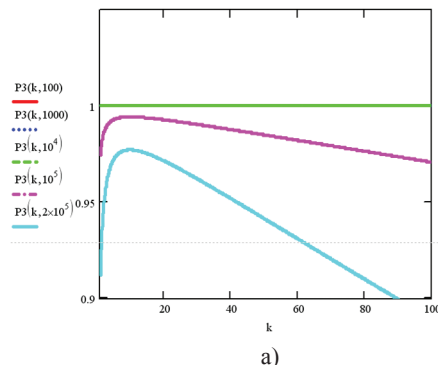


Рисунок 5 – Графики изменения вероятности безотказной работы системы без мажоритирования $e^{-\lambda t}$, с мажоритированием $P_1(t)$ и с глубоким мажоритированием $P_k(t)$ (k слоёв, $k = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$) при $\lambda = 10^{-8}$



Видим, что мажоритирование как бы «поднимает» экспоненту вверх за точку, соответствующую примерно трети временной оси, но это приводит к «провисанию» в последней трети. После некоторого значения времени вероятность безотказной работы становится менее 0,5 и нерезервированная структура становится лучше резервированной. Ясно, что до такой вероятности доводить дело не стоит. Оценим глубокое мажоритирование (рис. 5).

Видим, что глубокое мажоритирование значительно повышает надёжность по мере увеличения количества k слоёв.

Для $\lambda = 10^{-5}$, $\lambda_{м.э} = \lambda / \alpha_1$, $\alpha_1 = 10$ получим оптимум для $k = 12$, $t = 10^4$ (рис. 6, а). При $\lambda = 10^{-3}$, $\lambda_{м.э} = 10^{-5}$ получим оптимум для $k = 100$ (рис. 6, б).

При этом стоимость системы увеличивается по сравнению с обычным мажоритированием:

$$C_{м} = 3(C_{\lambda} + C_{м.э} + C_{и.п}), \quad (21)$$

где C_{λ} – стоимость одного канала, $C_{м.э}$ – стоимость мажоритара, $C_{и.п}$ – стоимость источника питания. Задержка прохождения сигнала увеличивается всего на величину задержки одного мажоритара $\tau_{м.э}$. При этом (21) не учитывает усложнение связей (трассировки). В случае глубокого мажоритирования затраты существенно больше:

$$C_{с.м} = 3(C_{\lambda} + kC_{м.э} + C_{и.п}), \quad (22)$$

а задержка прохождения сигнала увеличивается на величину задержки k мажоритаров $k \cdot \tau_{м.э}$. Обычно на это идут в случае необходимости обеспечения высокой надёжности, а снижение производительности компенсируют алгоритмическими методами.

Получим графики сравнения потранзисторного расчетверения схемы с мажоритированием. Парирование отказа одного любого транзистора в каждой транзисторной структуре – в каждой четвёрке транзисторов – требует четырёхкратной избыточности [9] и описывается выражением:

$$P_{fml}(t) = e^{-(4)\lambda \cdot t} + 4 \cdot e^{-3\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t}). \quad (23)$$

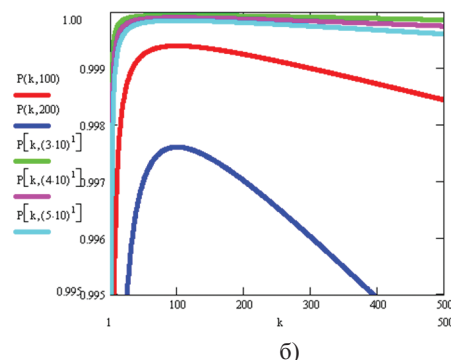


Рисунок 6 – Оптимум глубокого мажоритирования: а) $k = 12$, б) $k = 100$.

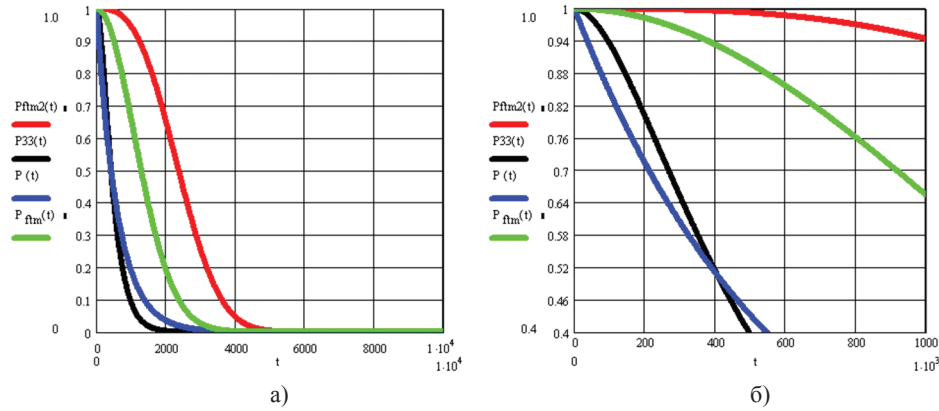


Рисунок 7 – Графики изменения вероятностей безотказной работы нерезервированной схемы $P(t)$; расчетверённой схемы, парирующей один отказ $P_{fm}(t)$; троированной схемы с тремя мажоритарными элементами $P_{33}(t)$ и схемы, парирующей два отказа $P_{fm2}(t)$ при интенсивности отказов 10^{-5} 1/час; а) в диапазоне вероятности от 1 до 0; б) в диапазоне вероятности от 1 до 0,4

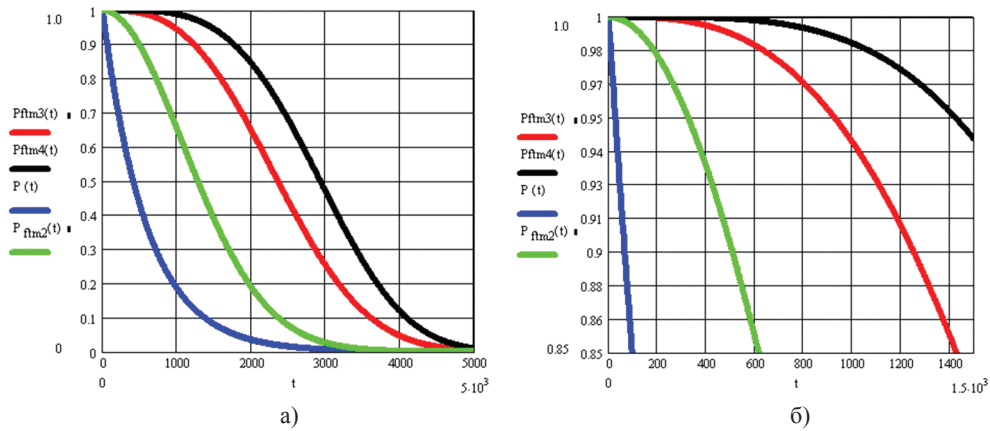


Рисунок 8 – Графики изменения вероятностей безотказной работы нерезервированной схемы $P(t)$; расчетверённой схемы, парирующей один отказ $P_{fm2}(t)$; схемы, парирующей два отказа $P_{fm3}(t)$ и схемы, парирующей три отказа $P_{fm4}(t)$ при интенсивности отказов 10^{-5} 1/час; а) в диапазоне вероятности от 1 до 0; б) в диапазоне вероятности от 1 до 0,4

Парирование отказа любых двух транзисторов в каждой транзисторной структуре требует девятикратной избыточности и описывается выражением:

$$P_{fm2}(t) = e^{-(9) \cdot \lambda \cdot t} + 9 \cdot e^{-8 \cdot \lambda \cdot t} (1 - e^{-1 \cdot \lambda \cdot t}) + 36 \cdot e^{-7 \cdot \lambda \cdot t} (1 - e^{-1 \cdot \lambda \cdot t})^2. \quad (24)$$

Соответствующие графики изображены на рис. 7.

Парирование отказа любых трех транзисторов в каждой транзисторной структуре требует шестнадцатикратной избыточности и описывается выражением:

$$P_{fm3}(t) = e^{-(16) \cdot \lambda \cdot t} + 16 \cdot e^{-15 \cdot \lambda \cdot t} (1 - e^{-1 \cdot \lambda \cdot t}) + 120 \cdot e^{-14 \cdot \lambda \cdot t} (1 - e^{-1 \cdot \lambda \cdot t})^2 + 560 \cdot e^{-13 \cdot \lambda \cdot t} (1 - e^{-1 \cdot \lambda \cdot t})^3. \quad (25)$$

Графики изменения вероятностей безотказной работы нерезервированной схемы $P(t)$; схемы FCTLUT, парирующей один отказ $P_{fm2}(t)$; схемы FCTLUT, парирующей два отказа $P_{fm3}(t)$ и схемы FCTLUT, парирующей три отказа $P_{fm4}(t)$ при $n = 4$ изображены на рис. 8.

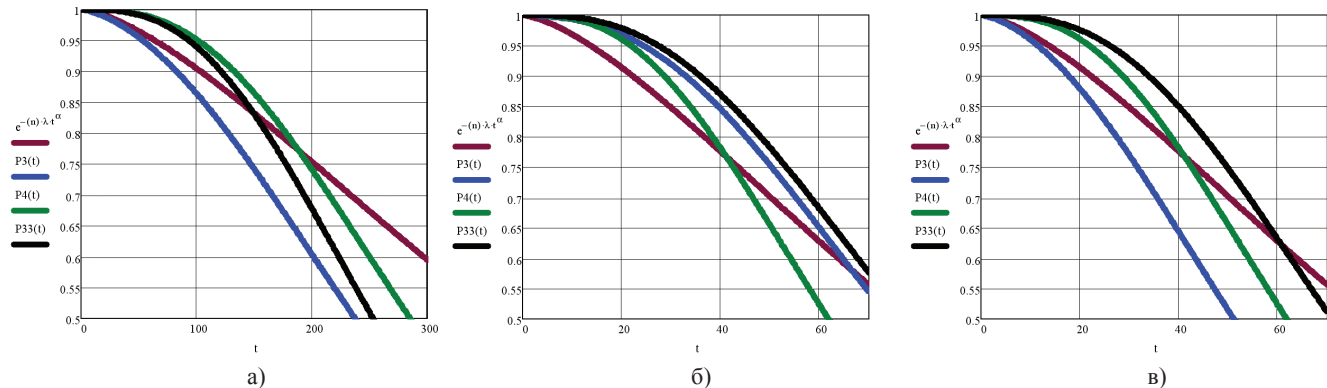


Рисунок 9 – Расчетверение каналное: а) $n = 10, m = 1$; б) $n = 100, m = 1$; в) $n = 100, m = 10$

Сравнение расчетверения канального $P_4(t)$ с нерезервированной структурой и троированием $P_3(t)$; $P_{33}(t)$ представлено на рис. 9.

Заключение

С целью проектирования радиационно-стойкой цифровой аппаратуры наиболее эффективно расчетверение на транзисторном уровне. Оно позволяет получить более высокую вероятность безотказной работы, чем троирование, причём на всём временном диапазоне. В ряде случаев избыточность расчетверения меньше троирования, если учитывать мажоритарные элементы. Для парирования любого одного отказа в каждой транзисторной структуре необходима четырёхкратная избыточность. Для парирования любых двух отказов в каждой транзисторной структуре необходима девятикратная избыточность, позволяющая достичь более существенной вероятности безотказной работы расчетверённой схемы, но и её превосходит на всём временном интервале расшестнадцатерённая схема, парирующий отказы любых трёх транзисторов в каждой транзисторной структуре, для реализации которой требуется шестнадцатикратная избыточность. С целью парирования отказов блока питания возможно использовать его дублирование в расчетверённой схеме, например, так, как предложено в [10].

Библиографический список

- ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017–03–01. – М.: Старнартинформ, 2016. – 23 с.
- Shankarnarayanan Ramaswamy, Leonard Rockett, Dinu Patel and others. A Radiation Hardened Reconfigurable FPGA [Электронный ресурс]. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/57f8/ff540360eadceafc062797b7a01065f6f9cc.pdf> (дата обращения 30.03.2018).
- Борисов Ю.И. О выборе архитектуры отказоустойчивых вычислительных комплексов для космических аппаратов [Текст] / Ю.И. Борисов // Надежность. – 2004. – № 2(21). – С.46-51.
- Шебе Х. Предельная надёжность структурного резервирования [Текст] / Х. Шебе, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2016. – № 1(56). – С.3-8.

5. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs [Электронный ресурс]. – URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (дата обращения 30.03.2018)

6. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза [Текст]: методы синтеза / И.Б. Шубинский. – М: Журнал «Надежность», 2016. – 544 с.: ил., табл.; 23 см.; ISBN 978-5-7572-0399-7 : 500 экз.

7. Васильев Н.П. Аналитическая оценка вероятности успешной адаптации к отказам модульных вычислительных систем с многоуровневой активной защитой [Текст] / Н.П. Васильев, И.Б. Шубинский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 1994. – Т. 37. – № 3-4. – С. 47.

8. Тарасов А.А. Минимизация времени функциональной реконфигурации распределенной отказоустойчивой системы [Текст] / А.А. Тарасов // Надежность. – 2010. – № 2(37). – С.24-29.

9. Тюрин С.Ф. Скользящее резервирование толерантных элементов [Текст] / С.Ф. Тюрин // Надежность. – 2017. – Т. 17. – № 1(60). – С.17-21.

10. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability [Text] / W. Weibull // Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME. – 1951. – Vol. 18. – Pp 293–297.

11. Carver A. Mead. Introduction to VLSI Systems / Carver A. Mead, Lynn Conway [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/234388249_Introduction_to_VLSI_systems (дата обращения 30.03.2018).

Сведения об авторе

Сергей Ф. Тюрин – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (www.pstu.ru),

профессор кафедры Математического обеспечения вычислительных систем ПГНИУ (www.psu.ru), Пермь, Россия, e-mail: tyurinsergfeoyandex.ru

Поступила 25.04.2018

Проблемы надёжности и пути их решения при создании уникальных высокоответственных систем

Юрий П. Похабов, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), Железнодорожск, Красноярский край, Россия



Юрий П. Похабов

Цель. Рассмотрены проблемы, обусловленные традиционными взглядами на надёжность, которые не позволяют использовать на практике анализы (оценку) надёжности как рабочий инструмент для инженеров, создающих уникальные высокоответственные системы, и обоснованы предложения по их разрешению. **Методы.** Произведён анализ проблем количественной оценки надёжности уникальных высокоответственных систем без построения вероятностно-статистических моделей. Взгляд на надёжность как на физическое свойство изделия (в результате изменения его внутреннего состояния) позволяет на физическом уровне обеспечить во времени способность выполнять требуемые функции и подсчитать количественно критерии выполнения требуемых функций, которые могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность её выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров. Такой подход приводит к необходимости учёта генезиса надёжности и рассмотрения причин возникновения маловероятных отказов, которые необходимо выявлять в результате дополнительных анализов и проводить их в параллель с расчётно-экспериментальным обеспечением работоспособности. Решение проблем нечёткой терминологии позволяет выявить взаимосвязь между качеством и надёжностью, дающую возможность на единой информационной базе – конструкторских и технологических решениях, производить анализ, синтез и оценку надёжности уникальных высокоответственных систем по параметрам работоспособности без построения вероятностно-статистических моделей.

Результаты. Решение рассмотренных проблем надёжности даёт возможность обеспечить надёжность на основе физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) причин отказов. Обеспечение надёжности уникальных высокоответственных систем должно осуществляться с самых ранних стадий жизненного цикла на основе последовательного выполнения определённых конструкторских, технологических и производственных процедур и применения методов конструкторско-технологического анализа надёжности, что позволяет дополнительно решать проблемы, косвенно связанные с надёжностью, – это повышение качества выпускаемой продукции и снижение её стоимости. **Выводы.** Показано, что применение конструкторско-технологических методов анализа (оценки) надёжности позволяет в рамках существующих взглядов, но с учётом некоторых поправок, решать задачи надёжности без привлечения математического аппарата классической теории надёжности. Достижение высокой надёжности возможно обеспечить равно теми же путями, при помощи которых получается и ненадёжность, – конструкторско-технологическими решениями. Анализ, обоснование технических решений и установление необходимых и достаточных требований к изготовлению позволяет достигать заданной надёжности инженерными средствами за счёт повышения уровня конструкторско-технологических разработок. Если относиться к надёжности как к многопараметрическому свойству, то возможно создание параметрических моделей изделий, с помощью которых можно производить оценку стабильности сохранения значений параметров во времени методами индивидуальной конструкционной надёжности и/или конструкторско-технологического анализа надёжности. При этом применение принципов единства конструкторско-технологического замысла и реализации их на производстве позволяет производить разработку изделий и оценку их надёжности на едином исходном материале – конструкторско-технологических решениях, неразрывно связанных с возможностями конкретного производства.

Ключевые слова: уникальная высокоответственная система, индивидуальная конструкционная надёжность, конструкторско-технологический анализ надёжности, обеспечение надёжности.

Формат цитирования: Похабов Ю.П. Проблемы надёжности и пути их решения при создании уникальных высокоответственных систем // Надежность. 2019. №1. С. 10-17. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-10-17

Введение. Для всяких невосстанавливаемых изделий существует два подхода к обеспечению надёжности, которые зависят от конечных целей использования:

- одни изделия предназначены для безотказной работы в течение неопределённо длительного времени или же для гарантоспособного выполнения одноразовых операций/функций (отказ их нежелателен, либо недопустим);
- другие изделия должны отработать строго определённое время (гарантийный срок), после чего их функционирование *должно быть прекращено* из-за необратимых изменений конструкции или её параметров.

Первый подход используют при создании высокоответственных уникальных изделий, которые невозможно отремонтировать или проблематично заменить на новые без критических финансовых и временных издержек, либо отказ которых приводит к фатальному нарушению безопасности. Примерами таких изделий могут служить автоматические космические аппараты и атомные объекты промышленного назначения. Второй подход применяют при изготовлении товаров широкого потребления разового (неремонтопригодного) исполнения (машин, бытовой техники, компьютеров, гаджетов и т. п.), программируя их поломки (отказы) сразу же после завершения гарантийного срока службы для того, чтобы стимулировать рынки сбыта и продаж. Пример программируемых поломок:

- обычная современная лампа накаливания должна иметь средний гарантийный срок службы 1 000 ч, причём сегодня не секрет, что это является результатом картельного сговора 1924 г., когда крупнейшие производители электрических лампочек впервые договорились искусственно ограничивать срок службы нити накаливания (фактически – стали изготавливать лампочки заведомо ухудшенного качества);

- в то же время известно, что на пожарной станции в Ливерморе (Калифорния) одна из экспериментальных лампочек производства фирмы Shelby Electric светит практически непрерывно с 1901 г. (более 1 000 000 ч), хотя при этом её номинальная мощность 60 Вт за это время упала до 4 Вт.

В первом случае, когда отказы недопустимы или нежелательны, для обеспечения требуемой надёжности изделия изготавливают с конструктивными запасами параметров работоспособности. Во втором случае, когда отказы предполагаются и допускаются, – так, чтобы обеспечить определённую вероятность сохранения стабильности параметров работоспособности на конец гарантийного срока. В обоих случаях надёжность изделий характеризуется безотказностью, но несёт в себе разный физический смысл. В первом случае отказы не планируются и не подразумеваются, а во втором случае – не исключаются и даже планируются, но допускаются с частотой возникновения, не превышающей наперёд заданной величины.

Для изделий, рассматриваемых только в предельном состоянии по прочности, указанные подходы различа-

ются выбором значений коэффициентов безопасности и запасов прочности, варьируя которыми достигают требуемой безотказности (программируют поломку или напротив делают её маловероятной). При этом расчёты на прочность при первом подходе производят детерминированными методами на основе механики деформируемого твёрдого тела, а при втором подходе – вероятностно-статистическими методами на основе теории вероятностей и математической статистики.

Если изделие находится в двух и более предельных состояниях, то расчёты надёжности при втором подходе осуществляют в вероятностно-статистической постановке с использованием метода фиктивных элементов [1]. Как рассчитать надёжность при первом подходе, когда изделие может одновременно находиться в нескольких предельных состояниях и при этом должно обеспечить безотказность, близкую к единице, современная теория надёжности ответа не даёт, несмотря на то, что решение таких задач в некоторых случаях имеет крайне важное практическое значение, например, для уникальных высокоответственных систем [2–8].

В статье рассмотрены проблемы, обусловленные традиционными взглядами на надёжность, которые не позволяют использовать на практике анализы (оценку) надёжности как рабочий инструмент для инженеров, создающих уникальные высокоответственные системы/изделия, а также даны предложения по их разрешению.

Проблема № 1: Как подсчитать надёжность без статистики отказов. В начале следует сделать важную оговорку: без изучения определённых характеристик и свойств материалов, а также соединений и элементов, создать надёжные изделия в принципе невозможно. Конечно, не помешало бы иметь хоть какую-нибудь статистику отказов, если таковую возможно получить. Однако вопрос заключается в том, а так ли необходимо проводить статистические испытания до отказа (не строя вероятностно-статистические модели), чтобы создавать изделия с заданными показателями надёжности.

Если отвлечься от терминологического определения и обратиться к смысловому понятию, то надёжность – это то, что не подведёт, на что длительное время можно положиться. Безотказность говорит сама за себя – это проявление безаварийного функционирования. Если рассматривать невосстанавливаемые объекты, то на понятийном уровне нет никакой разницы между надёжностью и безотказностью: в обоих случаях предполагается *заданная во времени и непрерывная работа без отказов*. Теперь обратимся к терминологическому определению (ГОСТ 27.002–2015), согласно которому надёжность определяется как «*свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции...*». Очевидно, что при данном определении термина «надежность» возникает вопрос (и даже проблема) – каким образом вычислить *заданное во времени и непрерывное выполнение функций* (без отказов), которые (имеется в

виду функции) к тому же ещё и требуется определить. За неимением лучшего, решение сугубо физической задачи – количественного определения свойства *непрерывно выполнять заданные функции во времени*, было перенесено при помощи инверсии в решение математической задачи – подсчёту событий, отражающих факты невыполнения функций (отказов). При таком подходе фиксировать отказы как события (не вдаваясь не только в тонкости критериев выполнения функций, но и в их количество) не вызывает особых проблем. Причём отказы можно подвергнуть статистической обработке и на основе полученных статистических данных вычислить вероятность их наступления в любой заданный промежуток времени. Таким образом, вместо исследования надёжности как физического свойства (в результате изменения внутреннего состояния объекта), которое обеспечивает *заданное во времени и непрерывное выполнение функций*, оценку надёжности стали сводить к исследованию *ненадёжности* – модели, в которой отказы априори возможны (предопределены). В итоге изучение реальных причин возникновения отказов, было сведено к изучению их следствий – отказов, как фактов проявления событий, причины которых не всегда известны. Для математиков такой подход является понятным и удобным, а для инженеров – не содержит в себе ни смысла, ни ценности, поскольку неясно, как расчёты надёжности использовать для принятия и анализа реальных технических решений.

Как следствие, возникло довольно распространённое представление – надёжность можно определить количественно только при помощи вероятностно-статистической обработки отказов эксплуатируемой техники, взятой *«по справочным данным о надёжности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надёжности объектов-аналогов...»* (ГОСТ 27.002–2015). Между тем определение термина «надежность» не устанавливает никаких ограничений на этот счёт. Например, согласно Государственному стандарту ничто не мешает характеризовать надёжность качественно (альтернативно), если существует возможность на физическом уровне обеспечить *«во времени способность выполнять требуемые функции...»*, и подсчитать количественно критерии выполнения требуемых функций, которые *«могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность её выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров»*. В конце концов количественные вычисления надёжности необходимы для сравнения различных изделий между собой или данного конкретного изделия с установленными целям разработки для оценки их эффективности, но в этом не всегда есть необходимость, например, для уникального технологического оборудования единичного изготовления, которое не с чем и незачем сравнивать (здесь главное, чтобы были обеспечены заданные параметры работоспособности в течение срока службы). Зато без качественного обеспечения надёжности (в увязке с

установлением и обоснованием значений параметров работоспособности) нельзя на физическом уровне создать надёжного изделия, но при этом не всегда есть возможность дать точную количественную оценку надёжности (без информации о статистике отказов остаются неизвестными логико-математические связи и зависимости между качественным обеспечением надёжности и её количественной мерой).

Между тем вероятностно-статистический подход к надёжности прочно укоренился в Государственных стандартах серии «Надёжность в технике» в виде: ограничительного перечня изделий, к которым применимы статистические подходы, номенклатуры и названий показателей надёжности, нормированных методов определения (контроля) надёжности и методик расчётов надёжности, и т. п. В то же время, совершенно очевидно, что любое заданное количественное требование по безотказности будет выполнено автоматически, если на физическом уровне обеспечить *«во времени способность выполнять требуемые функции...»* так, чтобы *параметры, характеризующие способность их выполнения, заведомо бы находились в допустимых пределах изменения значений этих параметров* (как того требует Государственный стандарт). Таким образом, проблема подсчёта надёжности как *заданного во времени непрерывного функционирования*, скорее всего, лежит в плоскости установления параметров функционирования конструкции и обоснования нахождения их значений в допустимой области, а не только (и не столько) в получении и обработке статистических данных о поведении изделий при эксплуатации.

Проблема № 2: Нужно ли учитывать генезис надёжности. Прямым следствием прерогативы вероятностно-статистического подхода при количественной оценке надёжности стало вольное или невольное «закрывание глаз» на генезис надёжности. Ведь физическая природа появления любого конкретного изделия становится как бы неважной, «важно» – как его возможные отказы согласуются с выбранной математической моделью. Как следствие, фокус внимания переносится из области принятия и выполнения конкретных инженерных решений на модель поведения изделий при эксплуатации (когда, к сожалению, изменить неудачные решения становится зачастую уже практически невозможно).

Чтобы осознать, насколько глубоко вероятностно-статистическое толкование надёжности (а точнее сказать ненадёжности) проникло в нормативную документацию, обратимся к ГОСТ Р 56526–2015, где пример расчёта показателей надёжности автоматического космического аппарата (АКА) единичного (мелкосерийного) изготовления предваряется следующей гипотезой: *«Предполагается, что в начальный момент времени (момент начала исчисления наработки) АКА находится в работоспособном состоянии...»*. Довольно-таки странная ситуация: высокоответственное изделие изготавливается в единственном экземпляре, но вместо того, чтобы убе-

даться, что изделие на 100 % работоспособно, об этом делается **предположение**, на которое накладывается некая вероятностно-статистическая модель поведения при эксплуатации (откуда бы ей взяться для единичного изделия) с сомнительными параметрами распределения (эксплуатация производится в условиях космического пространства, а следовательно по определению сложно получить экспериментальные данные с необходимым доверием).

С другой стороны, когда готовую математическую модель требуется подогнать под реальный физический объект, всегда используются допущения и схематизация физических состояний и процессов, которые нивелируются (подстраиваются) путём выбора параметров этой модели (на том и стоят инженерные расчёты). Выбор таких параметров основан на длительной практике наблюдений и исследований. Если же речь идёт об уникальном высокоответственном изделии, для которого нет и не может быть достоверной статистики, то допущение о том, что к началу эксплуатации изделие работоспособно (т. е. конструкция не содержит принципиальных ошибок в технической документации, а её заводское исполнение – производственного брака), является по меньшей мере спорным. Если же речь идёт о серийных изделиях, то тем самым «закрываются глаза» на тот факт, что разработчик и изготовитель, как и все люди, могут ошибаться. Из-за этих ошибок ещё задолго до начала своей эксплуатации любое изделие получает определённую наследственность отказов, которая на этапе эксплуатации обретает способность проявляться. Причём каждый этап жизненного цикла изделия, начиная с составления тактико-технического задания на проектирование, из-за вероятностей потери работоспособности имеет вполне определённую степень критичности наследственных факторов, а сама наследственность подчиняется обусловленным законам реализации. Как показано в работах [5, 9], условная безотказность изделий, определяемая факторами наследственности отказов, до момента окончания этапа конструирования имеет способность аккумулироваться, достигая тем самым своего локального максимума, а начиная с этапа технологической подготовки производства – только растрачивается, приобретая на начало эксплуатации некий локальный минимум, который при создании высокоответственных изделий следует учитывать как начальные условия.

Важно понимать, что любые отработочные испытания являются своего рода стадией квазиэксплуатации (обычно проводимой на более жёстких режимах, чем при штатной работе) и производятся на ограниченном (по финансово-экономическим соображениям) количестве объектов испытаний. Последнее обстоятельство говорит о том, что для обоснования заданной безотказности может просто не хватить объёма выборки для оценки результатов испытаний с требуемой достоверностью (даже с учётом повышенных режимов испытаний). Ведь при эксплуатации может осуществиться такая комбина-

ция технического состояния изделия, режимов работы, внешних нагрузок и воздействий, которая окажется непредусмотренной или технически нереализуемой при имитационном воздействии на объект испытаний.

Отсюда возникает задача по обнаружению и устранению потенциальных опасностей возникновения маловероятных отказов на ранних стадиях разработки уникальных высокоответственных систем, что можно достичь, только при рассмотрении генезиса их надёжности [5, 9].

Проблема № 3: Как не допустить маловероятные отказы. Вывод о том, что подтверждение работоспособности при испытаниях вовсе не гарантирует отсутствие отказов при эксплуатации, напрямую следует из формулы полной вероятности

$$R(t) + Q(t) = 1. \quad (1)$$

Очевидно, что в формуле (1) функция надёжности $R(t)$ определяется работоспособным состоянием объекта, соответственно, функция отказов (ненадёжности) $Q(t)$ определяется (по аналогии с функцией надёжности) *отказоспособным состоянием* объекта. Если не доказано иного, то по умолчанию в любой момент времени объект одновременно может находиться в двух состояниях: работоспособном и отказоспособном. Столь очевидный и важный факт по какой-то причине не отражён в терминологии надёжности (понятие «отказоспособное состояние» в нормативной документации не используется).

Из (1) следует важный практический вывод: любые методики расчётов параметров на работоспособность и испытаний изделий с ограниченной выборкой обеспечивают лишь определённый экстремум функции надёжности $R(t)$ (причём заранее неизвестный). Это является следствием постоянно присутствующей неопределённости (неизвестности) второй составляющей полной вероятности – функции отказов $Q(t)$, характеризующей проявление маловероятных событий. Например, статистика отказов раскрывающихся конструкций АКА [9] показывает, что с помощью существующих современных расчётно-экспериментальных методов отработки можно достигнуть на практике уровень безотказности не более 0,996 (при допустимых требованиях не менее 0,999). Поэтому оценивать надёжность (даже косвенно) по факту того, что результаты расчётно-экспериментальной отработки оказались положительными, ни в коем случае нельзя. Можно лишь утверждать, что, например, в результате успешно проведенной экспериментальной отработки (включая лётную квалификацию) изделие продемонстрировало свою работоспособность n раз подряд.

Если уж требуется подтвердить заданный уровень безотказности $R(t) > \underline{R}$, то необходимо предоставить объективные доказательства того, что

$$Q(t) < 1 - \underline{R}. \quad (2)$$

Очевидно, что подтвердить выполнение условия (2) только лишь путём проведения расчётно-экспериментального определения параметров работоспособности невозможно.

Таким образом, для высокоответственных систем помимо проведения расчётно-экспериментального подтверждения параметров работоспособности, необходимо использовать методики *прямого* подтверждения заданного уровня функции отказов (ненадёжности) (2). Самый простой выход – это проведение испытаний на надёжность, однако для дорогостоящих высокоответственных изделий единичного изготовления они не приемлемы по финансово-экономическим соображениям. Остаётся производить дополнительные анализы по выявлению маловероятных отказов, которые должны проводиться в параллель с расчётно-экспериментальным обеспечением работоспособности (и желательно на единой информационной базе). Для этого необходимо использовать соответствующее научно-методическое обеспечение таких анализов, которое в нормативной документации по надёжности пока не представлено.

Проблема № 4: Нечёткость терминологии надёжности. Речь здесь даже не о термине «надёжность» (его функциональном и параметрическом определении [6, 9–11]), который с введением нового стандарта ГОСТ 27.002–2015, вряд ли стал более чётким. В свете предыдущего изложения значительно важнее и полезнее рассмотреть термин «работоспособное состояние». На взгляд автора, именно в нечёткости определения этого термина кроется одна из основных проблем надёжности уникальных высокоответственных систем. Оставим в стороне расплывчатое определение термина в новом стандарте, будем считать, что с учётом примечаний (разъяснений) его сущность не изменилась, а потому воспользуемся более чётким определением термина из отменённого стандарта. Итак, работоспособное состояние – это «*состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации*». То есть, мало того, что для определения работоспособности требуется выявить «*значения всех параметров...*», но и следует позаботиться, чтобы каждый из этих параметров соответствовал «*требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации*», которые должны быть там предварительно и своевременно установлены (не тогда, когда уже случились отказы, а на момент завершения разработки указанной документации).

Здесь автору видится разрыв смысловых понятий на системно-методологическом уровне. Совершенно очевидно, что для того, чтобы изготовить и эксплуатировать изделие точно в соответствии с конструкторской документацией (именно этой, а не какой-то там «иной документации», как это трактует новый

стандарт ГОСТ 27.002–2015, поскольку *только конструкторская документация* является единственным основанием для изготовления изделия) нужно, чтобы в ней были установлены все необходимые и достаточные требования. При этом чтобы разработать безошибочную конструкторскую документацию, конструктор должен определить все необходимые и достаточные параметры конструкции, характеризующие способность выполнять заданные функции, обосновать значения выбранных им параметров и установить необходимые и достаточные требования для изготовления, которые строго соответствуют выбранным параметрам конструкции. Невыполнение любых из указанных действий и/или не установление их критериев может привести к отказам. Однако именно эти важнейшие понятия (как определить все необходимые и достаточные параметры и обеспечить релевантность параметров установленным требованиям) никак не отражены ни в терминологии, ни в иных положениях стандартов серии «Надёжность в технике».

Кроме того, аксиомой является тот факт, что для выполнения заданных функций значения параметров конструкции при функционировании должны находиться в допустимом диапазоне, обеспечивающим её работоспособное состояние. Очевидно также, что состояние, когда значения параметров находятся на границе допустимых диапазонов, является предельным; состояние же, когда значения параметров находятся за пределами допустимых диапазонов, является запредельным (неработоспособным), а переход значений параметров через границу допустимых диапазонов является событием, которое называют отказом. Таким образом, предельное состояние определяется формулой

$$X_{пред} = \begin{cases} \bar{X} \\ \underline{X} \end{cases} \quad (3)$$

Из (3) следует формула работоспособного состояния:

$$\underline{X} \leq X \leq \bar{X}. \quad (4)$$

Из (3)–(4) вытекает формула неработоспособного состояния, приводящему к отказу:

$$X \in \{(X < \underline{X}) \vee (X > \bar{X})\}. \quad (5)$$

Очевидно, что формулы (3)–(5) показывают, что понятие «предельное состояние» играет ключевую роль не только для определения свойства долговечности (как это трактуется современной терминологией надёжности), но напрямую относится к надёжности в целом и, в первую очередь, к безотказности.

Проблема № 5: Как связаны качество и надёжность. Сегодня на уровне нормативных документов прочно укоренилось понимание, что качество среди прочих показателей характеризуется показателями надёжности, иными словами надёжность является

составной частью качества. Однако это не совсем так [3, 9]. Качество, как и все его свойства низшего уровня иерархии определяются отношениями вещей в виде взаиморасположения, взаимосвязей и взаимодействий, т.е. в текущем временном состоянии. При этом сами эти отношения имеют свойство изменяться во времени, и именно данное свойство мы и называем надёжностью, оно характеризует во времени качество изделий и, соответственно, каждое из свойств качества в отдельности.

Если принять во внимание определение термина «функционирование» (ГОСТ 22487–77), как процесса проявления требуемых свойств в соответствии с заданным алгоритмом, то выражение (4) можно трактовать как формулу качества изделия в работоспособном состоянии. Соответственно формула надёжности имеет вид

$$\underline{X} \leq X(t) \leq \bar{X}. \quad (6)$$

В параметрическом виде формулу (6) можно записать следующим образом:

$$X(t) \in D = \{X_i(t) | \underline{X}_i \leq X_i(t) \leq \bar{X}_i; t \in [\underline{t}, \bar{t}]; \forall i = [1, \bar{n}]\}, \quad (7)$$

где D – область, в которой находится обобщённый параметр надёжности $X(t)$.

С учётом (6)–(7) полную надёжность можно вычислить следующим образом¹:

$$R(t) = P\{X(t) \in D; t \in [\underline{t}, \bar{t}]\} \quad (8)$$

Формула (7) согласуется с определением термина «надёжность» согласно ГОСТ 27.002 (в старой и новой редакциях), а формула (8) – с выводами общей теории надёжности механических систем В.В. Болотина [12].

Связь между качеством (4) и надёжностью (6) естественным образом определяется зависимостью [9]

$$X = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} X(t + \Delta t). \quad (9)$$

Формула (9) показывает, что надёжность является непрерывной функцией времени, а качество – это своего рода место точек на кривой функции надёжности. Не существует какого-либо «застывшего» качества (присущего изделию раз и навсегда), оно постоянно изменяется со временем в результате физико-химических процессов, и именно в своём изменении, качество характеризуется надёжностью. Качество можно определить в любой фиксированный момент времени, например, путём проведения прямых или косвенных измерений параметров изделия техническими средствами неразрушающего контроля. Надёжность измерить нельзя, её можно только прогнозировать на основе расчётов (8), либо вычислений путём опреде-

ления вероятности нахождения значений каждого из параметров в заданном диапазоне (6)

$$R_i(t) = P\{\underline{X}_i \leq X_i(t) \leq \bar{X}_i; t \in [\underline{t}, \bar{t}]\}. \quad (10)$$

Для изделий с последовательным соединением критичных элементов (в случае независимости их параметров в смысле надёжности), полная надёжность с учётом (10) определяется формулой

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (11)$$

Пути решения рассмотренных проблем надёжности. Формулы (6)–(11) дают возможность производить анализ и синтез надёжности по параметрам работоспособности, что позволяет уйти от вероятностно-статистических подходов и перейти к обеспечению надёжности на основе физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) причин отказов.

Очевидно, что анализ и синтез надёжности по параметрам работоспособности (по крайней мере для высокоответственных изделий) должен производиться с учётом выполнения условий (1)–(2). Для этого производят процедуру полной параметризации, в процессе которой чертёжно-техническую документацию представляют вектор-столбцом параметров работоспособности, характеризующих полную **функциональность** конструкции изделия в виде

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_i)^T \quad \forall i = [1, \bar{n}]. \quad (12)$$

Вектор-столбец (12) является основой параметрического представления конструкции (7) и составляется без учёта различий по ранжированию (например, по частоте встречающихся событий – никогда, редко, часто) и/или значимости (например, по степени нарушения функции – важная, не важная, критичная, катастрофичная) возможных отказов как событий невыполнения заданных или предполагаемых функций (только таким образом можно выявить маловероятные отказы). Построение вектор-столбца на практике производят, выполняя последовательно следующие процедуры конструкторско-технологического анализа надёжности (КТАН) [4, 7–9]:

- выявляют функции, обеспечивающие работоспособность конструкции, которые необходимо учитывать при принятии инженерных решений, и определяют отказы, как гипотетические ситуации, препятствующие выполнению каждой из рассматриваемых функций;
- определяют причины отказов, непосредственно их порождающие, которые возникают, существуют и развиваются в условиях окружающей действительности как совокупности факторов внешней среды и режимов работы, с учётом худших возможных сочетаний;

¹ R – англ. Reability – надёжность; P – англ. Probability – вероятность.

- определяют свойства критичных элементов конструкции, наличие которых делает невозможной каждую из причин отказов (причины отказов парируются предписанными свойствами соответствующих критичных элементов);

- каждое из свойств критичных элементов определяют количественно с помощью параметров (показателей), которые в конечном итоге являются членами искомого вектор-столбца (12).

После определения вектор-столбца приступают к формированию области D (7), для чего каждому параметру (показателю) ставят в соответствие диапазон его допустимых значений исходя из требований технического задания на разработку (представления изделия с точки зрения заказчика – заданной потребности) и конструктивному исполнению изделия (представления конструкции изделия с точки зрения разработчика – понимаемой потребности).

Далее вычисляют надёжность по формулам (8) или (11), применяя стохастические методы оценки нахождения значений параметров конструкции в допустимом диапазоне (например, метод индивидуальной конструкционной надёжности [13], учитывающий индивидуальные статистические особенности распределения параметров в условиях конкретного производства), либо обеспечивая конструктивные запасы параметров работоспособности таким образом, чтобы они с допустимым доверием находились в заданном диапазоне (например, КТАН [4, 7–9]). Вычисленная таким образом надёжность показывает, насколько выбранные параметры работоспособности соответствуют выполнению требований технического задания к надёжности (фактически – это ожидаемая или проектная надёжность).

Стоит отметить, что при надлежащем выборе конструктивных запасов всех параметров работоспособности (в случае использования КТАН) ожидаемая надёжность равна $R(t) \equiv 1$. Чтобы реализовать эту надёжность на практике необходимо разработать безошибочную конструкторскую и технологическую документацию и не допустить появления критичных дефектов на стадии производства. Для этого в КТАН предусмотрены определённые процедуры проверки на релевантность параметров установленным требованиям в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации, а также процедуры контроля выполнения установленных требований. На основании выполнения указанных процедур осуществляется корректировка расчётов надёжности и делаются окончательные выводы о выполнении требований к надёжности [4, 7–9].

Таким образом, решаются не только указанные выше проблемы надёжности, но попутно и некоторые проблемы, выходящие за рамки надёжности.

Проблема № 6: Почему система менеджмента качества не всегда гарантирует качество и надёжность. Система менеджмента качества (СМК), например ИСО 9001, – это набор процедур (методов осуществ-

ления деятельности), которые при изготовлении на производстве позволяют преобразовать чертёжно-техническую документацию в готовое изделие в строгом соответствии с установленными требованиями.

Визуализированный образ СМК – это мельничные жернова. Подсыпашь зерно – получаешь муку, подсыпашь мусор – получаешь тот же мусор. Причина в том, что не существует формализованных процедур, которые на входе в СМК (мельничные жернова) осуществляли бы сепарацию (отделение «мусора» от «зёрен») правильных (достаточных) требований от ошибочных (недостаточных). Очевидно, что совместно с процедурами СМК, которые формализованы в стандартах ИСО 9001, должны действовать процедуры технического менеджмента качества, о которых сегодня не принято упоминать.

Роль технического менеджмента качества выполняют процедуры КТАН [4; 7–9], а именно, процедуры: параметризации (12); обоснования нахождения параметров в допустимых диапазонах (4) и (6); установления требований в нормативно-технической и конструкторской документации; проверок на релевантность параметров установленным требованиям.

Проблема № 7: Как зависит стоимость разработки от надёжности. Принято считать, что стоимость разработки напрямую зависит от значений заданных показателей надёжности (предполагается, что большие материальные затраты – это расплата за высокую надёжность). Эта, казалось бы, очевидная связь на самом деле является в некотором роде заблуждением. Если исходить из математики, то всё вроде бы верно. Согласно классическим представлениям теории надёжности [14], нижний односторонний доверительный предел оценки вероятности безотказной работы при проведении серии испытаний без отказов вычисляется по формуле:

$$\hat{P}_n = (1 - \gamma)^{1/n}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что, например, при доверительном уровне надёжности $\gamma = 0,9$ для подтверждения безотказности $P = 0,9$ потребуется провести минимум $n = 22$ независимых испытаний однородных изделий; для $P = 0,99 - n = 230$; для $P = 0,999 - n = 2302$; для $P = 0,9999 - n = 23025$. Отсюда напрашивается вывод, что с каждой «лишней» девяткой стоимость разработки должна увеличиваться на порядок. Однако в реальной жизни такой «бухгалтерский подход» не всегда справедлив, поскольку, исходя из (6)–(12), на самых ранних стадиях жизненного цикла будущие материальные расходы на производстве могут быть резко и эффективно сокращены за счёт разработки безошибочной конструкторской документации (с обязательным применением КТАН) и организации бездефектного производства методами СМК, например ИСО 9001. Причём данная технология предупреждения возможных отказов на ранних стадиях жизненного цикла целиком согласуется с широко известным «правилом десятикратных затрат» (если на

одной из стадий жизненного цикла изделия допущена ошибка, которая выявлена на следующей стадии, то для её исправления потребуется затратить в 10 раз больше средств, чем если бы она была обнаружена вовремя).

Заключение

Применение конструкторско-технологических методов анализа (оценки) надёжности позволяет в рамках существующих взглядов, но с учётом некоторых поправок, решать задачи надёжности без привлечения математического аппарата классической теории надёжности. Достижение высокой надёжности возможно обеспечить ровно теми же путями, при помощи которых получается и ненадёжность, – конструкторско-технологическими решениями. Анализ, обоснование технических решений и установление необходимых и достаточных требований к изготовлению позволяет достигать заданной надёжности инженерными средствами за счёт повышения уровня конструкторско-технологических разработок.

Если относиться к надёжности как к многопараметрическому свойству, то возможно создание параметрических моделей изделий (статистических, математических, физических, виртуальных или цифровых), с помощью которых можно производить оценку стабильности сохранения значений параметров во времени методами индивидуальной конструкционной надёжности [13] и/или КТАН [4, 7–9]. При этом применение принципов единства конструкторско-технологического замысла и реализации их на производстве позволяет производить разработку изделий и оценку их надёжности на едином исходном материале – конструкторско-технологических решениях, неразрывно связанных с возможностями конкретного производства.

Библиографический список

1. Кузнецов, А.А. Надёжность конструкции баллистических ракет [Текст] / А.А. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
2. Похабов, Ю.П. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем [Текст] / Ю.П. Похабов, И.А. Ушаков // Методы менеджмента качества. – 2014. – № 11. – С. 50–56.
3. Похабов, Ю.П. О философском аспекте надёжности на примерах уникальных высокоответственных систем [Текст] / Ю.П. Похабов // Надёжность. – 2015. – № 3. – С. 16–21.
4. Похабов, Ю.П. Подход к обеспечению надёжности уникальных высокоответственных систем на примере

крупногабаритных трансформируемых конструкций [Текст] / Ю.П. Похабов // Надёжность. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 24–30.

5. Похабов, Ю.П. Генезис надёжности уникальных высокоответственных систем [Текст] / Ю.П. Похабов, О.К. Валишевский // Надёжность. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 47–53.

6. Похабов, Ю.П. О дефиниции термина «надёжность» [Текст] / Ю.П. Похабов // Надёжность. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 4–10.

7. Похабов, Ю.П. Обеспечение надёжности уникальных высокоответственных систем [Текст] / Ю.П. Похабов // Надёжность. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 17–23.

8. Похабов, Ю.П. Что понимать под расчётом надёжности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов [Текст] / Ю.П. Похабов // Надёжность. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 28–35.

9. Похабов, Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания [Текст] / Ю.П. Похабов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 340 с.

10. Нетес, В.А. Актуальные вопросы стандартизации терминологии в области надёжности [Текст] / В.А. Нетес, Ю.И. Тарасьев, В.Л. Шпер // Надёжность. – 2014. – № 2. – С. 116–119.

11. Нетес, В.А. Как нам определить что такое «надёжность» [Текст] / В.А. Нетес, Ю.И. Тарасьев, В.Л. Шпер // Надёжность. – 2014. – № 4. – С. 3–14.

12. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

13. Тимашев, С.А. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надёжности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций) [Текст] / С.А. Тимашев, Ю.П. Похабов. – Екатеринбург: АМБ, 2018. – 38 с.

14. Волков, Л.И. Надёжность летательных аппаратов [Текст] / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. – М.: Высш. школа, 1975. – 296 с.

Сведения об авторе

Юрий П. Похабов – кандидат технических наук, начальник центра научно-технических разработок, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), Россия, Красноярский край, Железногорск, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Поступила: 16.08.2018

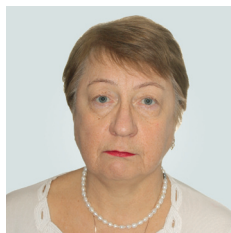
Уточнение инженерной методики оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов

Ирина В. Гадолина, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

Петр А. Побегайло, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

Дмитрий Ю. Крицкий, АО «СУЭК-КРАСНОЯРСК», Красноярск, Россия

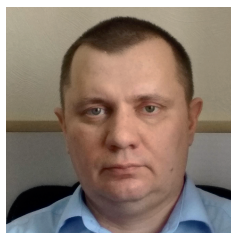
Папич Любиша, Исследовательский центр по управлению качеством и надежностью (DQM), Приевор, Сербия



Ирина В. Гадолина



Петр А. Побегайло



Дмитрий Ю.
Крицкий



Папич Любиша

Резюме. Существование человека на Земле во многом зависит от находящейся в его распоряжении энергии. Ее львиная доля получается на базе переработки полезных ископаемых, извлекаемых из планетной коры открытым способом. При этом качественное и дешевое извлечение полезных ископаемых во многом определяется надежностью используемых при этом машин и механизмов, комплектов машин и применяемых технологических решений. Основу парка горнодобывающих машин составляют экскаваторы того или иного вида. При этом с окружающей средой (с грунтом) у них взаимодействуют в основном элементы рабочего оборудования – чаще всего ковши и детали ковша(-ей). Необходимо обратить внимание на то, что рабочие органы экскаваторов и их элементы в процессе взаимодействия с внешней средой (грунтом) испытывают действие так называемого абразивного износа. Поскольку абразивный износ элементов рабочего оборудования (особенно часто – зубьев ковша (-ей) экскаватора) приводит к необходимости их периодической замены, это не может не сказаться на эффективности работы всего экскаватора и тех технологических цепочек, в которые он включен. Ведь периодические остановки и ремонты снижают коэффициент готовности – важнейший комплексный показатель оценки надежности оборудования. С учетом всего вышесказанного целью данной работы являлось уточнение известной ранее формулы, предложенной более тридцати лет во ВНИИСДМ (Рейш А.К.), для оценки скорости абразивного износа зубьев ковшей экскаваторов. При этом нами впервые и с достаточной полнотой был рассмотрен вопрос учета многорежимности работы горного оборудования, а именно, работа экскаватора в различных горно-технологических условиях и, в частности, на разных грунтах. Кроме этого нами осуществлен перенос подхода Рейша с одноковшовых машин на многоковшовые, непрерывного действия. Для достижения указанной цели авторы настоящей работы использовали метод обобщения данных из известной литературы, метод натурного эксперимента в условиях эксплуатации конкретного экскаватора и метод математического моделирования (в варианте использования метода Монте-Карло). Все это позволило уточнить значения параметров, входящих в формулу Рейша. Уточненная нами зависимость теперь может быть использована при оценке надежности машин при варьировании вариантов эксплуатации оборудования, а также при назначении времени профилактических осмотров.

Ключевые слова: износ, скорость износа, роторный экскаватор, зубья ковша, горные породы, режимы работы.

Формат цитирования: Гадолина И.В., Побегайло П.А., Крицкий Д.Ю., Папич Любиша. Уточнение инженерной методики оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов // Надежность. 2019. №1. С. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-18-23

Актуальность и современное состояние вопроса.

Стабильность развития топливно-экономического комплекса нашей страны напрямую зависит от надежной и высокопроизводительной работы сложившихся технологических цепочек – от единичных горных машин, их комплектов и до высокотехнологичного оборудования энергетических станций. При этом важнейшей задачей открытых горных разработок было и является обеспечение удобного, полного и максимально дешевого доступа к полезному ископаемому. Для этого используются различные машины, комплекты машин и технологические схемы.

В настоящей работе для конкретности рассмотрен в качестве объекта исследования вскрышной комплекс непрерывного действия SRs(k)-4000 (ГДР), работающий уже много лет в Красноярском крае (Назаровское бурогольное месторождение).

На рис. 1 приведен график планируемого и фактического коэффициентов $K_{гг}$ готовности указанного

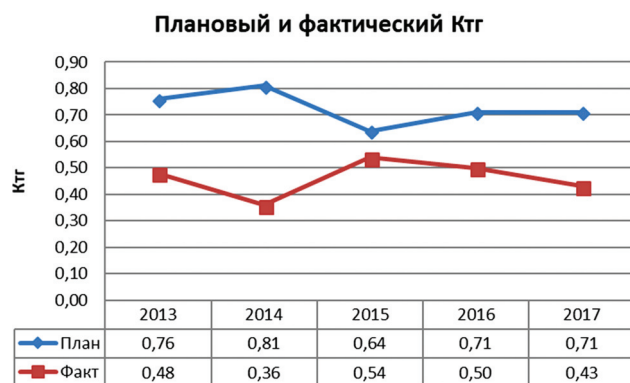


Рисунок 1 – Плановый и фактический коэффициент готовности экскаватора SRs(k)-4000

оборудования. Видно, что фактический показатель надежности не достигает планового показателя, что указывает на необходимость разработки и внедрения мер по скорейшему исправлению сложившейся негативной картины.

При этом известно, что доступность машин к использованию во времени во многом обеспечивается надежной работой всех узлов и механизмов [1–5 и мн. др.]. Анализ отказов при этом показывает, что наибольшее количество часов простоя любого экскаватора (и рассматриваемого нами, в частности) связано с восстановлением работоспособности рабочего оборудования, а именно с заменой изношенных зубьев ковша. Это подтверждает и рис. 2. Основным фактором, приводящим к отказам зуба ковша (рис. 3) и его элементов является абразивный износ (рис. 4).

Исследованию проблемы абразивного износа посвящено большое количество работ (достаточно неплохой их обзор до 1980 года можно найти, например, в книге [6]).

Наиболее фундаментальными в области исследования абразивного износа сейчас принято считать труды Хрущева М.М. [7 и мн. др.], Крагельского И.В. [8 и мн. др.], Дроздова Ю.Н. [9 и мн. др.] и Костецкого Б.И. [10 и мн. др.].

В области горных и строительных машин этой темой в различных ее аспектах и в разное время занимались и занимаются следующие известные специалисты: Абезгауз В.Д. [11 и др.], Акильев С.А., Банатов П.С., Барон Л.И., Боголюбов Б.Н. [12 и др.], Валова Л.С., Ветров Ю.А. [13 и др.], Виноградов В.Н., Глатман Л.Б., Горюшкин Н.Н., Гринберг Н.А., Домбровская И.К., Евдокимов Ю.А., Зимин А.И. [14 и др.], Зорин В.А., Икрамов У. [6, 15 и др.], Кабашев Р.А., Ковальчук В.А., Колесов В.Г., Кох П.И., Ларионов В.П., Лещинер В.Б.,

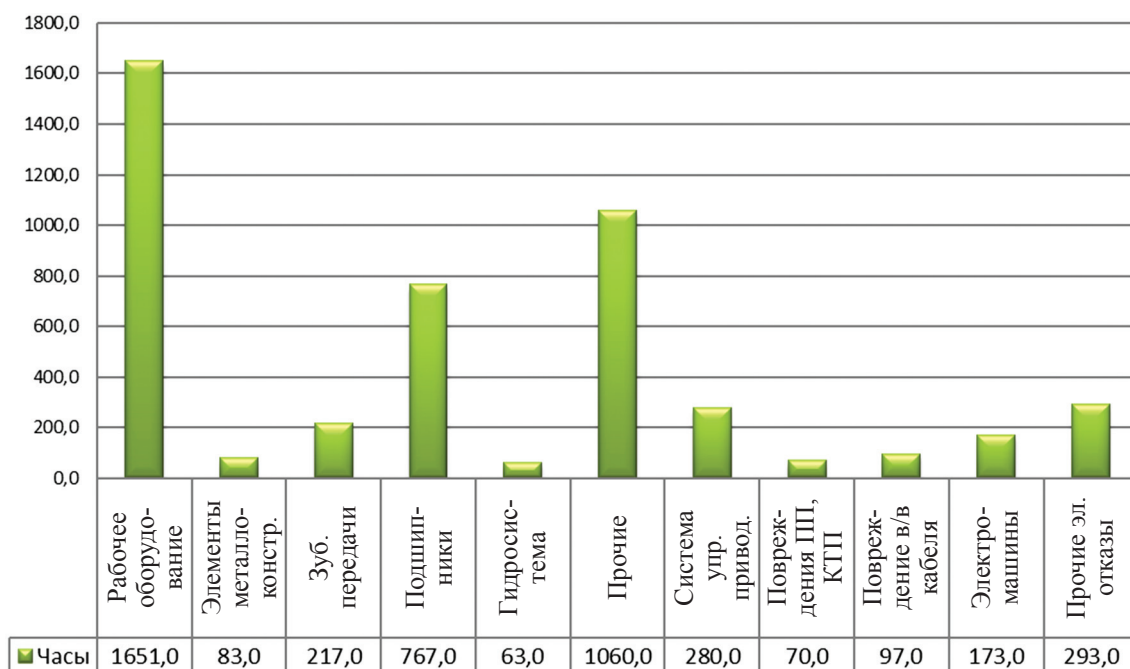


Рисунок 2 – Диаграмма распределения отказов узлов экскаватора в 2013–2017 гг.



Рисунок 3 – Ковш роторного экскаватора

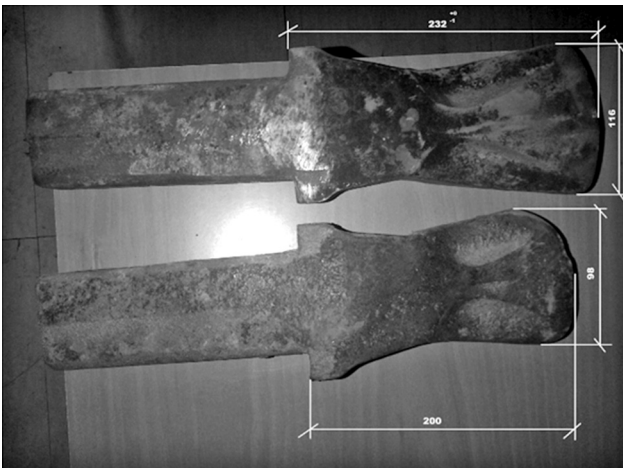


Рисунок 4 – Зуб экскаватора SRs до (вверху) и после эксплуатации (внизу)

Лифшиц Л.С., Львов П.Н., Метлин Ю.К., Новиков И.В., Папич Л. [16 и др.], Петров И.В., Пристайло Ю.П., Рейш А.К. [17 и др.], Смородинов М.И., Солод Г.И., Сорокин Г.М., Тененбаум М.М. [18 и др.], Ткачев В.Н. [19 и др.], Торопов В.А., Фаддеев Б.В., Фролов П.Т., Харач Г.М., Чудаков К.П., Шрейнер Л.А., Ямпольский Г.Я. [20] и мн. др.

Однако несмотря на многочисленные труды выполненные в области познания абразивного износа, многие практически важные задачи еще не нашли своего полного и законченного разрешения.

Так, до сих пор актуальной является проблема оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов – зубьев ковшей и их элементов [см., например, 17, 21–26 многие др.].

В работе [17], выполненной более тридцати лет назад, ее автором была предложена эмпирическая формула для оценки скорости износа зубьев ковша экскаватора. Однако из-за большого количества эмпирических коэффициентов, значения которых не были известны ее автору, использовать ее тогда и позднее было невозможно (при этом из всех известных нам практически интересных подходов этот представляется нам наиболее удачным).

Изменению этой негативной ситуации и посвящена настоящая работа.

Теория вопроса. Об уточнении формулы Рейша [17]. В работе [17] ее автором предложено соотношение для оценки ресурса зуба ковша экскаватора вида:

$$t_H = \frac{U_D}{\gamma}, \quad (1)$$

где U_D – допустимый износ зуба (этот параметр обычно рекомендуется брать для инженерных расчетов равным половине его рабочей длины); γ – скорость изнашивания, которую в свою очередь было предложено оценивать по эмпирической формуле вида:

$$\gamma = (A \cdot P \cdot K_{p0} \cdot K_{vp0} \cdot f \cdot s \cdot t_p \cdot K_y \cdot K_{ABP} \cdot \frac{1}{K_{ИЗН}}) \cdot K_{t20}, \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности; P – давление на рабочей поверхности зуба; K_{p0} – коэффициент, учитывающий влияние изменения давления; K_{vp0} – коэффициент, учитывающий влияние частоты изменения давления; f – коэффициент трения; s – путь трения зуба; t_p – продолжительность копания; K_y – коэффициент, учитывающий затупление зуба; K_{ABP} – коэффициент абразивности грунта; $K_{ИЗН}$ – коэффициент износостойкости; K_{t20} – коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды.

При взгляде на формулу (2) очевидно, что для ее успешного применения нужны весьма многочисленные экспериментальные данные. При этом часть таких данных известна с достаточной для инженерных расчетов точностью ($P, f, s, t_p, K_y, K_{ABP}, K_{ИЗН}, K_{t20}$) [2, 6–19, 22–26 и мн. др.], для части параметров сейчас известны лишь возможные диапазоны существования (K_{p0}, K_{vp0}), а для значения параметра A никаких данных сегодня не известно (о чем честно написал и автор книги [17]).

Таким образом, понятно, что обычным инженером формула (2) использована быть не может (заметим, что автор этой формулы допустил некоторую досадную неточность и с размерностью). Необходимо выполнить исследование, нацеленное на выяснение того, какие значения может принимать коэффициент A (хотя бы понять порядок этой величины).

Для этого мы предлагаем переписать формулу (2) в более удобном, на наш взгляд, виде:

$$\gamma = A \cdot K_1 \cdot K_2 = A \cdot \prod_{j=1}^m K_j \cdot \prod_{i=1}^k K_i, \quad (3)$$

где $K_1 = \prod_{j=1}^m K_j$ – первый обобщенный коэффициент износа, не зависящий от режима работы машины, очевидно, равный произведению ряда коэффициентов ($f, K_{ABP}, K_{ИЗН}$ и K_{t20}); $K_2 = \prod_{i=1}^k K_i$ – второй обобщенный коэффициент износа, зависящий от режима работы машины, также очевидно, равный произведению ряда иных коэффициентов ($P, K_{p0}, K_{vp0}, s, t_p, K_y$).

Такая новая запись позволяет нам при необходимости рассматривать отдельно поведение групп эмпирических коэффициентов и точнее учитывать непосредственные особенности работы конкретного экскаватора.

Отметим, что для указанного выше экскаватора нам известны как разброс величины износа зубьев, так и экстремальные значения коэффициентов уравнения (2) для конкретных условий эксплуатации.

Тогда, имея в виду в качестве опоры выполненные нами экспериментальные исследования, возможные значения коэффициента A мы будем оценивать по очевидному соотношению:

$$A = \frac{\gamma}{K_1 \cdot K_2}. \quad (4)$$

В табл. 1 и 2 приведены исходные данные для расчета.

Учет эксплуатации на разных режимах. Часть вышеприведенных коэффициентов зависят от типа грунта. С целью более точного учета этого фактора для условий работы конкретного экскаватора по данным его эксплуатационной надежности нами был сформирован так называемый обобщенный блок, учитывающий разнорежимность использования изделия. Это связано с тем, что вскрышной комплекс SRs(k)-4000 в течение рассматриваемого времени эксплуатации работал на разных грунтах.

Табл. 3 содержит в себе ряд характеристик условий эксплуатации рассматриваемого экскаватора, необходимых для формирования указанного обобщенного блока,

она сформирована нами на основании экспертных оценок и анализа известной литературы.

Отметим, что при этом собирались данные по указанным выше коэффициентам для каждого из режимов.

Далее, для каждого i -ого режима по формуле (3) определялась индивидуальная скорость изнашивания γ^i с учетом данных из наших таблиц. Поскольку накопление деградационных повреждений от износа происходит на всех режимах работы, для применения представленных выше соотношений требуется оценить среднюю скорость износа $\bar{\gamma}$ с учетом информации для построения обобщенного блока по данным наших таблиц.

Средняя скорость $\bar{\gamma}$ выражается как частное от деления суммарного расстояния на суммарное время, при этом расстояние U_Σ – это величина суммарного износа, мм:

$$\bar{\gamma} = \frac{U_\Sigma}{T} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \gamma^i \cdot T \cdot p_i = \sum_{i=1}^k \gamma^i \cdot p_i, \quad (5)$$

где T – общее время работы; k – число рассматриваемых режимов эксплуатации.

Заметим, что при получении формулы (5) мы использовали очевидные соотношения вида: $t_i = T \cdot p_i$, где t_i – время работы в i -ом режиме и $U_\Sigma = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k \gamma^i t_i$.

Итак, можно констатировать, что средняя скорость износа при задании долей режимов в отношении времени, является средней арифметической величиной по режимам с учетом долей p_i .

Таблица 1 – Коэффициенты, входящие во второй обобщенный коэффициент износа

K_{p0}	K_{vp0}	s , м	t_p , сек.	K_y^*	P , МПа
1	2	3	4	5	6
0,6 – 3	0,6 – 1,54	5 – 10	3600	1,088 – 1,132	0,1 – 2,0

* – этот параметр определяется по формуле вида [17]: $K_y = 1 + 0,44 \cdot Y$, где Y – проекция площадки износа (обычно от 0,2 до 0,3 м).

Таблица 2 – Коэффициенты, входящие в первый обобщенный коэффициент износа

f	K_{ABP}	$K_{изн}$	K_{t20}
1	2	3	4
0,25 – 0,8	0,7 – 6,6	1,0 – 2,1	$K_{t20} = (0,05 \dots 0,08) \cdot t_\phi^*$

* – параметр t_ϕ – фактическая температура меняющаяся от минус 60 до плюс 50 градусов (на наш взгляд его нужно брать по модулю, исключая значение равное нулю).

Таблица 3 – Распределение времени работы экскаватора по типу грунтов и некоторые их характеристики

Тип грунта	Средняя доля эксплуатации по времени, p_i	Удельный вес грунта, ρ , т/м ³	Коэфф. трения, f	Коэффициент абразивности грунтов, K_{ABP}
1	2	3	4	5
Торф	0,15	0,8 ... 1,2*	0,25	0,7
Суглинки	0,25	2,04	0,30	1,66
Ил	0,1	1,8 ... 2,0*	0,25	1,0
Алевриты	0,1	2,04 ... 2,15	0,50	1,0
Глина	0,15	2,03	0,35	1,2
Глинистые песчаники	0,25	2,4	0,30	6,6
	$\Sigma p_i = 1,0^{**}$			

* – точное значение существенно зависит от влажности.

О коэффициенте A . При известном из натурального эксперимента времени T , ч, варианты численных значений коэффициента пропорциональности A определяются из представленных выше формул и таблиц.

Выполненная нами оценка указанного коэффициента в среднем составила: $A = 8,1 \cdot 10^{-8}$ [1/(Па·ч)], при том условии, что γ имеет размерность м/ч.

Тем не менее, как нас учит теория надежности [27, 28 и мн. др.], лишь точечной оценки недостаточно. Для оценки доверительных интервалов по параметру A , предполагая у всех потребных для этого параметров (часть которых, напомним, существует в указанных выше диапазонах), которые, что очевидно, имеют в общем случае стохастический характер, нормальное распределение со средними значениями, соответствующими серединам интервалов и заданными коэффициентами вариации, воспользуемся методом Монте-Карло [29 и мн. др.] (пример этого описан в статье [30]).

В итоге, при вычислении распределения константы A с варьированием для нескольких переменных 90% доверительный интервал для A в предположении о нормальном распределении величин, представленных в таблицах выше, по предварительному расчету составили $6,8 \cdot 10^{-8} \dots 1,2 \cdot 10^{-7}$ [1/(Па·ч)].

Заключение. На основании как полученных нами экспериментальных данных по эксплуатации роторного экскаватора в различных горно-технологических условиях на протяжении длительного периода времени, так и с учетом выполненного нами анализа существующей литературы нами оценен коэффициент в выражении для вычисления скорости износа.

Это сопровождалось выполненной нами оценкой точности результатов.

По итогам наших исследований можно заключить, что теперь формула Рейша с успехом может быть использована при назначении времени осмотров, ремонтов и замен, а также для анализа влияния эксплуатационных факторов (задачи оптимизации при этом могут ставиться по аналогии со статьей [31], в частности, с учетом экономических критериев).

Кроме этого, теперь может быть поставлена и впоследствии успешно решена задача оптимизации комплектов ЗИП на карьерных экскаваторах и в отдельных ремонтных подразделениях, например, так, как предложено в работе [32].

Очевидно, что возможность использования формулы Рейша есть существенный позитивный сдвиг в деле построения методологии прогнозирования, поддержания и, по возможности, повышения надежности машин для открытых горных работ (в качестве примера можно указать на статью [33]).

В завершение работы заметим, что хотя исследование проводилось на основе данных определенного экскаватора, эксплуатировавшего в конкретных условиях, не будет потеряна общность получаемых результатов, т.к. условия Назаровского разреза и Красноярского края

в целом достаточно типичны для эксплуатации таких машин в РФ. Условия Украины или Казахстана и других районов, возможно, потребуют уточнения полученных в настоящем исследовании данных.

Подобная работа будет продолжена нами – с одной стороны с точки зрения дальнейшего уточнения значений коэффициента A , с другой – в рассмотрении иных видов экскаваторов. Будут также принципиально улучшены методы сбора и обработки экспертной информации (отталкиваясь, например, от работы [34 и мн. др.]).

Библиографический список

1. Федоров, Д.И. Надежность металлоконструкций землеройных машин [Текст] / Д.И. Федоров, Б.А. Бондарович, В.И. Перепонов. – М.: Машиностроение, 1971. – 217 с.
2. Федоров, Д.И. Надежность рабочего оборудования землеройных машин [Текст] / Д.И. Федоров, Б.А. Бондарович. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
3. Гаевская, К.С. Статистические исследования нагрузок рабочего оборудования и механизмов карьерных экскаваторов [Текст] / К.С. Гаевская; в кн. «Вопросы механизации открытых горных и землеройных работ». – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 190-197.
4. Шендеров, А.И. Надежность горнотранспортного оборудования [Текст] / А.И. Шендеров, О.А. Емельянов, И.М. Один. – М.: Недра, 1976. – 247 с.
5. Владимиров, В.М. Повышение производительности карьерных многоковшовых экскаваторов [Текст] / В.М. Владимиров, В.К. Трофимов. – М.: Недра, 1980. – 313 с.
6. Икрамов, У. Механизм и природа абразивного изнашивания [Текст] / У. Икрамов. – Ташкент: ФАН, 1979. – 136 с.
7. Хрущев, М.М. Абразивное изнашивание [Текст] / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
8. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
9. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин [Текст] / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
10. Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст] / Б.И. Костецкий. – М.-Киев: Машгиз, 1959. – 476 с.
11. Абезгауз, В.Д. Режущие органы машин фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов [Текст] / В.Д. Абезгауз. – М.: Машиностроение, 1965. – 280 с.
12. Боголюбов, Б.Н. Долговечность землеройных и дорожных машин [Текст] / Б.Н. Боголюбов. – М.: Машиностроение, 1964. – 224 с.
13. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами [Текст] / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971. – 360 с.

14. Зимин, А.И. Повышение долговечности и прогнозирование сроков службы деталей машин [Текст] / А.И. Зимин. – Свердловск: КнПИИТпСОС НТО, 1982. – 64 с.
15. Икрамов, У. Расчет и прогнозирование абразивного износа [Текст] / У. Икрамов, К.Х. Махкамов. – Ташкент: ФАН, 1982. – 148 с.
16. Папич, Л. Износ зубьев роторного экскаватора [Текст] / Л. Папич, И. Гадолина, Р. Зайнетдинов // Proceedings of the 8th DQM International Conference Life cycle engineering and management ICDQM-2017. – 2017. – С. 84-89.
17. Рейш, А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин [Текст] / А.К. Рейш. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
18. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию [Текст] / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
19. Ткачев, В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания [Текст] / В.Н. Ткачев. – М.: Машиностроение, 1995. – 336 с.
20. Ямпольский, Г.Я. Исследование абразивного износа элементов пар качения [Текст] / Г.Я. Ямпольский, И.В. Крагельский. – М.: Наука, 1973. – 64 с.
21. Колокольцев, В.М. Оценка эксплуатационной стойкости и моделирование технологии изготовления отливки «Зуб ковша экскаватора» [Текст] / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, Е.В. Синицкий, Н.А. Феоктистов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. – № 4. – С. 61-64.
22. Хазанет, Л.Л. Эксплуатация карьерного оборудования непрерывного действия [Текст] / Л.Л. Хазанет, П.В. Остапенко, М.Г. Моисеенко. – М.: Недра, 1984. – 251 с.
23. Чудновский, В.Ю. Механика роторных экскаваторов [Текст] / В.Ю. Чудновский. – Иерусалим: Изд-во МИКА К.А., 2002. – 329 с.
24. Баловнев, В.И. Машины для земляных работ [Текст] / В.И. Баловнев, А.Н. Зеленин, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
25. Справочник механика открытых горных работ. Эскавационно – транспортные машины непрерывного действия [Текст] / Под ред. М.И. Щадова, В.М. Владимирова. – М.: Недра, 1989. – 237 с.
26. Рашевский, В.В. Качество углей ОАО «СУЭК» [Текст] / В.В. Рашевский, В.Б. Артемьев, С.А. Силютин. – М.: Кучково поле, 2010. – 464 с.
27. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
28. Проников, А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
29. Соболев, И.М. Метод Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1968. – 64 с.
30. Papich, L. Interval Estimation of the Availability Factor of the Bucket-wheel Excavator Based on Bootstrap Modeling [Text] / L. Papich, I.V. Gadolina, R.I. Zainetdinov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2016. – Т. 45. – № 6. – P. 531-537. DOI: 10.3103/S1052618816060091
31. Володарский, В.А. Оптимизация предупредительных замен и ремонтов в условиях неопределенности [Текст] / В.А. Володарский // Надежность. – 2013. – № 2. – С. 34-41. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-34-50
32. Черкесов, Г.Н. О критериях выбора комплектов ЗИП [Текст] / Г.Н. Черкесов // Надежность. – 2013. – № 2. – С. 3-18. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-3-33
33. Анцупов, А.В. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям [Текст] / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Надежность. – 2013. – № 3. – С. 5-14. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-3-5-23
34. Крянев, А.В. К вопросу о качестве и надежности экспертных оценок при определении технического уровня сложных систем [Текст] / А.В. Крянев, С.С. Семенов // Надежность. – 2013. – № 4. – С. 90-99. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-4-90-109

Сведения об авторах

Ирина В. Гадолина – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: gadolina@mail.ru

Петр А. Побегайло – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: petr214@yandex.ru

Дмитрий Ю. Крицкий – инженер, начальник отдела эксплуатации и ремонта ГТО, АО «СУЭК-КРАСНОЯРСК», Красноярск, Россия, e-mail: kritskijdy@suek.ru

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

Поступила: 31.10.2018

Влияние структурного состава на стойкость трубопроводных систем к повреждениям узловых элементов

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



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Целью работы является изучение влияния структурных особенностей трубопроводных систем на развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки транспортных узлов. Блокировка отдельного точечного элемента системы рассматривается как результат одновременного перехода в состояние неработоспособности всех сходящихся в узел трубопроводов. Процесс последовательного перехода в состояние блокировки некоторой совокупности узлов трубопроводной системы в случайном порядке называется прогрессирующей блокировкой. Развитие прогрессирующей блокировки сопровождается отключением от источника потребителей целевого продукта и представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации. Стойкость системы к развитию прогрессирующей блокировки оценивается при помощи показателя стойкости F_x представляющего собой среднюю долю узлов системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта. **Методы исследования.** Определение значений $0 \leq F_x \leq 1$ выполнялось с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. При этом после каждого акта повреждения связанного со случайной блокировкой отдельного узла устанавливалось наличие связи между источником и потребителями целевого продукта. Статистические характеристики процесса прогрессирующей блокировки оценивались по результатам многократного воспроизведения процедуры повреждения анализируемой сетевой структуры. В общем случае структура трубопроводной системы характеризуется графом, который описывает связи между точечными элементами. Валентностью отдельной вершины графа называется количество сходящихся в неё ребер. Аналогичным образом валентностью соответствующего узла называется количество сходящихся линейных элементов (трубопроводов). Кроме того, важной характеристикой отдельного узла является состав сходящихся линейных элементов. Так среди множества линейных элементов системы имеются следующие разновидности обеспечивающие связь между: источником и потребителем (подмножество $G1$), двумя потребителями (подмножество $G2$), потребителем и распределительным узлом (подмножество $G3$), двумя распределительными узлами (подмножество $G4$), источником и распределительным узлом (подмножество $G5$). **Результаты.** Выполнен анализ и изучено влияние структурных характеристик на способность трубопроводных систем противостоять развитию аварий по механизму прогрессирующей блокировки узлов. Установлено, что при решении задач структурной оптимизации наибольший положительный эффект связанный с повышением значений F_x наблюдается при увеличении валентности узла-источника и включении в состав системы дополнительных линейных элементов принадлежащих подмножеству $G1$. **Выводы.** Процесс прогрессирующей блокировки узлов трубопроводных транспортных систем представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации. Наиболее эффективным образом повысить стойкость трубопроводных систем к развитию процесса прогрессирующей блокировки можно за счет увеличения валентности узла-источника и включения в состав системы дополнительных линейных элементов принадлежащих подмножеству $G1$. Структурную оптимизацию трубопроводных систем следует осуществлять путем определения значений F_x для каждого из альтернативных вариантов с последующим принятием обоснованного проектного решения.

Ключевые слова: трубопровод, система, стойкость, повреждение, узел, структура, блокировка, оптимизация.

Формат цитирования: Тарарычкин И.А. Влияние структурного состава на стойкость трубопроводных систем к повреждениям узловых элементов // Надежность. 2019. №1. С. 24-29. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-24-29

Введение. Системы трубопроводного транспорта применяют в различных отраслях производства при доставке потребителям необходимых материалов, сырья, готовой продукции [1-3]. Наибольшую потенциальную опасность представляют процессы переработки и доставки токсичных, горючих, взрывоопасных веществ. Эффективное функционирование, надежность и эксплуатационные характеристики таких сложных технических систем зависят как от свойств отдельных структурных элементов, так и особенностей их взаимодействия [4-7].

Переход в состояние неработоспособности отдельных трубопроводов оказывает негативное влияние на технологические возможности транспортных систем и эффективность их функционирования [8]. При этом наибольшую опасность для действующей системы представляет процесс повреждения узловых элементов. Связано это с тем, что в отдельно взятый узел сходится, как правило, несколько линейных элементов. В этих условиях повреждение (блокировка) узла означает одновременный переход в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов.

Если в условиях аварийной ситуации происходит последовательная блокировка узлов системы в случайном порядке, то такой сценарий развития событий называется прогрессирующей блокировкой.

Развитие аварии по механизму прогрессирующей блокировки узлов сопровождается быстрой деградацией свойств системы и может привести к полному прекращению доставки целевого продукта всем потребителям.

Способность системы противостоять развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов характеризуется показателем стойкости F_x [9]. Показатель стойкости $0 \leq F_x \leq 1$ представляет собой среднюю долю узлов транспортной системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к полному отключению от источника всех потребителей целевого продукта. Для заданной структуры транспортной системы значение F_x устанавливается на основе метода имитационного моделирования [10]. Чем ближе значение F_x к единице, тем более высокой стойкостью к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов характеризуется анализируемая система.

Целью настоящей работы является изучение влияния структурных особенностей трубопроводных систем на развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки узловых элементов.

Компьютерное моделирование прогрессирующего повреждения различных сетевых структур позволяет установить наличие следующего ряда особенностей и закономерностей процесса.

1. Любые сетевые структуры систем трубопроводного транспорта с равным количеством узлов и одинаковым числом потребителей продукта являются сопоставимыми независимо от количества линейных элементов в их составе.

2. Увеличение числа линейных элементов в системе сопровождается ростом значений показателя стойкости F_x , однако указанный эффект проявляется в различной степени и зависит от структурных особенностей анализируемого объекта.

В общем случае структура системы трубопроводного транспорта описывается при помощи соответствующего размеченного графа, наглядно отображающего существующие связи между отдельными точечными элементами. Количество сходящихся в вершину графа ребер называется валентностью, которая является характеристикой каждой из вершин [11]. Аналогичным образом количество сходящихся в отдельный транспортный узел трубопроводов рассматривается в дальнейшем как его валентность. Кроме того, характеристикой системы является множество линейных элементов G , которое делится на 5 подмножеств, обозначения которых представлены в табл. 1 [12].

Поскольку блокировка отдельно взятого транспортного узла приводит к одномоментному переходу в состояние неработоспособности всех связанных с ним трубопроводов, то следует предположить, что количество входящих в узел линейных элементов является его характеристикой, оказывающей влияние на развитие процесса прогрессирующего повреждения.

Таблица 1 – Характеристика и обозначения подмножеств линейных элементов транспортной системы

Обозначение подмножества линейных элементов	Узлы транспортной системы, соединяемые линейными элементами из состава различных подмножеств
$G1$	источник продукта – потребитель
$G2$	потребитель – потребитель
$G3$	потребитель – распределительный узел
$G4$	распределительный узел – распределительный узел
$G5$	источник продукта – распределительный узел

Если при решении задачи синтеза в состав системы включить дополнительный линейный элемент, то такая структурная вариация сопровождается увеличением валентности сразу двух транспортных узлов. Таким образом, изменение валентности любого узла системы в процессе структурного синтеза следует рассматривать с учетом наблюдаемого изменения валентности другого связанного с ним узла.

Анализ влияния валентности транспортных узлов на стойкость сетевых структур к развитию процесса прогрессирующей блокировки представляет практический интерес и требует проведения дополнительных исследований. Выявление такого рода закономерностей связано с выбором подходящих сетевых структур и обоснованием соответствующих расчетных схем.

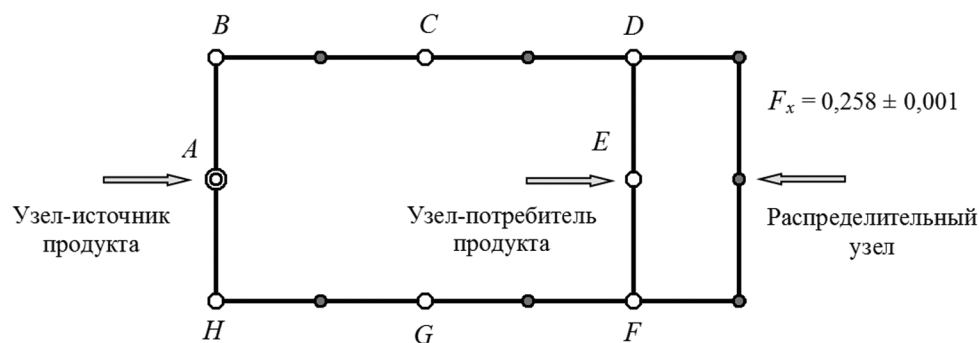


Рисунок 1 – Структурная схема трубопроводной транспортной системы.

Рассмотрим в этой связи базовую структурную схему трубопроводной системы, показанную на рис. 1. В составе анализируемого объекта имеется источник целевого продукта A , представляющий собой точечный элемент валентности 2, а также 7 потребителей целевого продукта $B, C, \dots H$.

Увеличим валентность узла-источника системы в 3 раза. Для этого введем дополнительно в состав базового объекта 4 линейных элемента. Указанные элементы могут принадлежать подмножествам $G1$ или $G5$, а их включение в состав системы будет сопровождаться увеличением валентности не только узла-источника, но и других узлов.

Варианты структурных схем PIR1–PIR3 с увеличенной валентностью узла-источника A приведены на рис. 2. Все перечисленные объекты являются сопоставимыми, а их характеристики и результаты расчета значений F_x приведены в табл. 2. Видно, что наибольший положительный эффект, связанный с увеличением валентности узла-источника наблюдается при добавлении в систему линейных элементов, принадлежащих подмножеству $G1$. Если количество элементов из состава подмножества $G1$ уменьшается за счет элементов подмножества $G5$, то снижается и значение показателя стойкости F_x .

Таким образом, увеличение валентности узла-источника следует производить, прежде всего, за счет включения в состав системы линейных элементов принадлежащих подмножеству $G1$. Именно в этом случае достигается наибольший положительный эффект.

Теперь, используя базовую структурную схему, увеличим в 3 раза валентность узла-потребителя E так, как это показано на рис. 3. Характеристики производных структурных схем с условным обозначением PIR4–PIR6, а также результаты моделирования процесса прогрессирующей блокировки узлов приведены в табл. 2. Видно, что наибольший положительный эффект, связанный с увеличением валентности узла-потребителя, наблюдается при включении в состав системы линейных элементов подмножества $G2$. По мере замены их элементами подмножества $G3$ имеет место снижение стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов.

Рассмотрим теперь влияние валентности распределительного узла на стойкость сетевого объекта

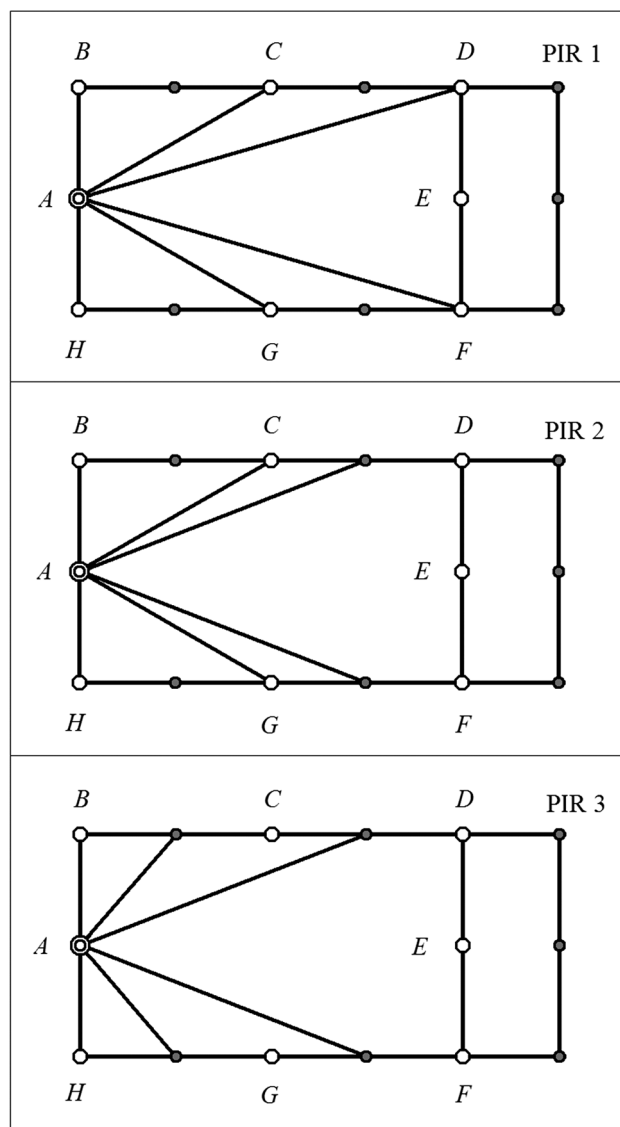


Рисунок 2 – Производные сетевые структуры с увеличенной валентностью узла-источника

к прогрессирующим повреждениям. С этой целью увеличим в 3 раза валентность распределительного узла при помощи элементов подмножеств $G3$ и $G4$, так как это показано на рис. 4. Характеристики синтезированных таким способом структур также приведены в табл. 2. Видно, что минимальный при-

Таблица 2. Характеристики производных сетевых структур

Условное обозначение сетевой структуры	Количество линейных элементов принадлежащих различным подмножествам и сходящихся в узел валентности 6, шт.					Показатель стойкости F_x	Соотношение значений F_x для производной и базовой структур
	G1	G2	G3	G4	G5		
PIR1	6	0	0	0	0	$0,374 \pm 0,001$	1,45
PIR2	4	0	0	0	2	$0,348 \pm 0,001$	1,35
PIR3	2	0	0	0	4	$0,339 \pm 0,001$	1,31
PIR4	0	6	0	0	0	$0,320 \pm 0,001$	1,24
PIR5	0	4	2	0	0	$0,316 \pm 0,001$	1,22
PIR6	0	2	4	0	0	$0,302 \pm 0,001$	1,17
PIR7	0	0	0	6	0	$0,294 \pm 0,001$	1,14
PIR8	0	0	2	4	0	$0,304 \pm 0,001$	1,18
PIR9	0	0	4	2	0	$0,307 \pm 0,001$	1,19

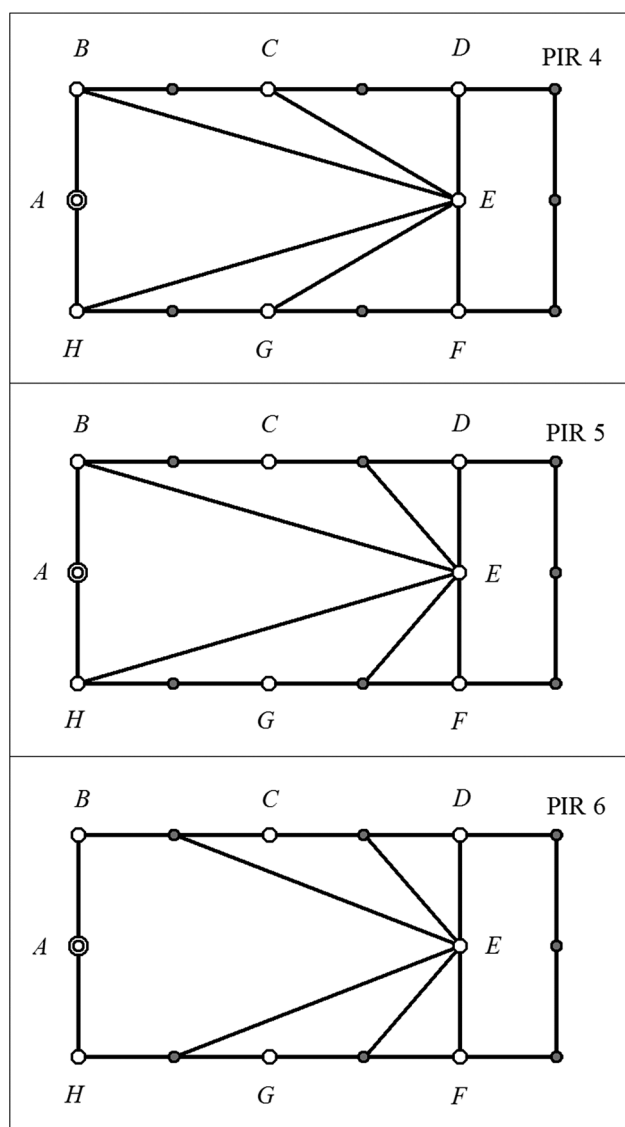


Рисунок 3 – Производные сетевые структуры с увеличенным значением валентности узла-потребителя

рост значений F_x наблюдается в том случае, если в распределительный узел сходятся только элементы подмножества G4.

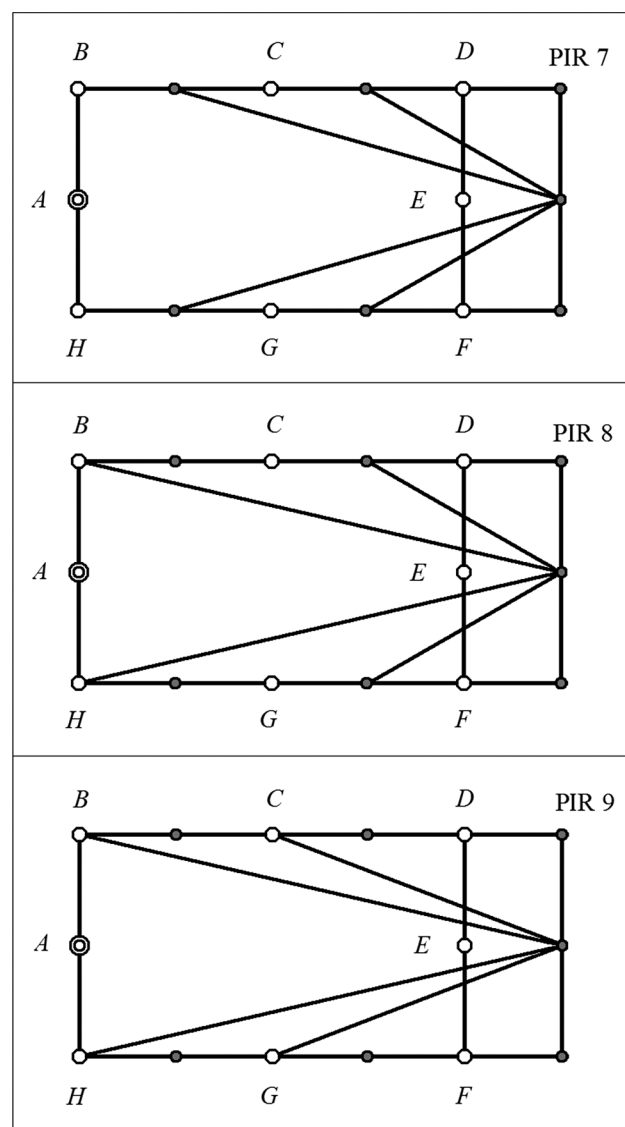


Рисунок 4 – Производные сетевые структуры с увеличенной валентностью распределительного узла

Таким образом, по результатам проведенного анализа установлено существование трех разновидностей точечных элементов системы, увеличение

валентности которых в различной степени влияет на рост значений F_x .

Так, наибольший положительный эффект связанный с увеличением валентности узла-источника наблюдается при включении в состав системы линейных элементов принадлежащих подмножеству $G1$.

Наименьший прирост значений F_x происходит при увеличении валентности распределительных узлов и добавлении в состав системы линейных элементов принадлежащих подмножеству $G4$.

Увеличение валентности узлов-потребителей оказывает промежуточное влияние на рост значений показателя стойкости сетевых структур к развитию процесса прогрессирующей блокировки.

Очевидно, что при решении задач структурного синтеза включение в состав системы дополнительных трубопроводов всегда является затратным мероприятием. Поэтому с практической точки зрения важно обеспечить достижение заданного уровня стойкости сетевых структур к развитию процессов прогрессирующей блокировки узлов за счет добавления в их состав минимально возможного числа линейных элементов.

Тогда наиболее эффективным вариантом повышения стойкости систем трубопроводного транспорта следует считать включение в их состав небольшого числа линейных элементов, принадлежащих подмножеству $G1$.

Рассмотрим в качестве примера структурную схему трубопроводной системы с условным обозначением TTR1 показанную на рис. 5а.

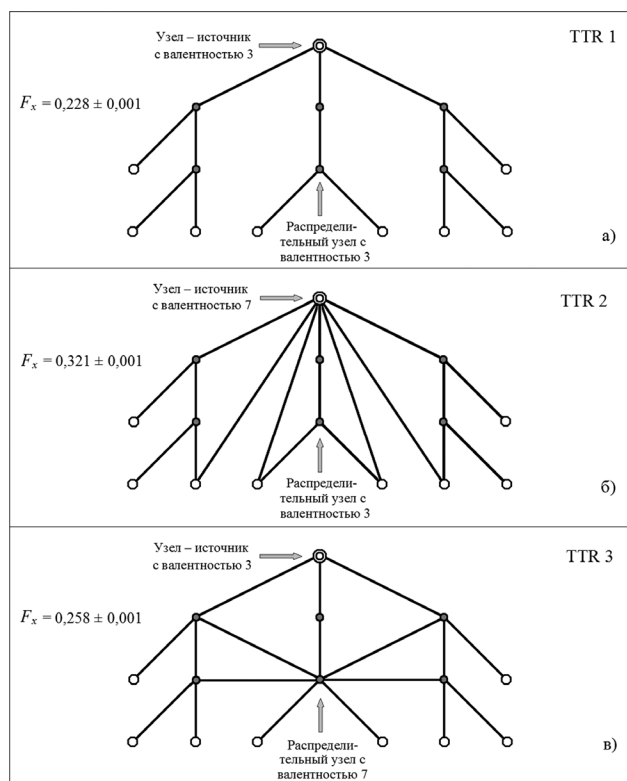


Рисунок 5 – Структурная схема базовой трубопроводной системы (а) и производные структуры с увеличенной валентностью узла-источника (б) и распределительного узла (в)

Предположим, решение задачи синтеза связано с планируемым включением в состав такого базового объекта 4-х линейных элементов. Если увеличить на 4 единицы валентность узла-источника за счет элементов подмножества $G1$, то синтезированная таким способом структурная схема TTR2 будет иметь вид, показанный на рис. 5б.

Увеличим теперь валентность распределительного узла структуры TTR1 путем добавления 4-х линейных элементов, принадлежащих подмножеству $G4$. Полученная таким образом производная структура TTR3 имеет вид, показанный на рис. 5в.

С учетом полученных ранее результатов следует предположить, что решение, представленное на рис. 5б, будет близким к наилучшему, а приведенное на рис. 5в – окажется одним из наихудших. Расчетные значения показателя стойкости для каждого из указанных вариантов производных сетевых структур приведены на рис. 5.

Видно, что величина F_x , установленная для варианта, представленного на рис. 5б, превышает значение показателя стойкости структуры, изображенной на рис. 5в, примерно в 1,24 раза.

Таким образом, результаты выполненных расчетов подтверждают сделанное ранее предположение относительно ожидаемых свойств синтезированных сетевых структур.

Выводы

1. Процесс прогрессирующей блокировки узлов трубопроводных транспортных систем представляет собой опасный сценарий развития аварийной ситуации, поскольку каждый акт блокирования сопровождается одновременным переходом в состояние неработоспособности всех сходящихся в узел трубопроводов.

2. Наиболее эффективным образом повысить стойкость трубопроводных систем к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов можно за счет увеличения валентности узла-источника и включения в состав системы дополнительных линейных элементов, принадлежащих подмножеству $G1$.

3. Структурную оптимизацию трубопроводных систем следует осуществлять путем определения значений F_x для каждого из альтернативных вариантов с последующим выбором решения, обеспечивающего наиболее высокий уровень стойкости к развитию процессов прогрессирующего повреждения.

Библиографический список

1. Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook [Text] / Edited by R. Winston. – John Wiley & Sons, Inc., 2015. – 816 p.
2. Shashi Menon, E. Pipeline Planning and Construction Field Manual [Text] / E. Shashi Menon. – Gulf Professional Publishing, USA, 2011. – 552 p.

3. Silowash, B. Piping Systems Manual [Text] / Brian Silowash. – The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. – 416 p.

4. Свердлов, А.Б. Анализ надежности газоперекачивающих агрегатов [Текст] / А.Б. Свердлов // Надежность. – 2015. – № 2(53). – С. 62-64.

5. Ткачев, О.А. Анализ надежности сетей, состоящих из идентичных элементов [Текст] / О.А. Ткачев // Надежность. – 2014. – № 1(48). – С. 30-34.

6. Черкесов, Г.Н. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин, В.В. Виноградов // Надежность. – 2018. – № 2(65). – С. 17-24.

7. Черкесов, Г.Н. Оценка живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности. Часть 1. Основы подхода [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 2(57). – С. 3-15.

8. Дейнеко, С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дейнеко. – М.: Техника, ТУМА ГРУПП, 2011. – 176 с.

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

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

11. Татт, У. Теория графов [Текст] / У. Татт; пер. с англ. Гаврилова Г.П. – М.: Мир, 1988. – 423 с.

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

Сведения об авторе

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

Поступила 09.05.2018

Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре

Денис В. Морозов, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ), Казань, Россия

Сергей Ф. Чермошенцев, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ), Институт компьютерных технологий и защиты информации, Казань, Россия



Денис В. Морозов



Сергей Ф. Чермошенцев

Резюме. Целью данной статьи является разработка методики повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата (СУ БЛА) при электромагнитном воздействии в полете и возникновении отказа в функциональной части бортовой контрольно-проверочной аппаратуры (БКПА). Эта цель достигается определением отказавшего функционального элемента, идентификацией функциональной части СУ БЛА и принятием решения на включение гибкого алгоритма работы. В существующих и в разрабатываемых перспективных образцах СУ БЛА принимаются бинарные модели ее безотказности, т.е. различают два состояния: работоспособное и неработоспособное. Поэтому любой возникший отказ на траектории полета классифицируется как отказ всей СУ БЛА, без учета выполняемых на данном этапе задач. Если исходить из представления СУ как многофункциональной системы, то становится очевидным тот факт, что отказ не любого функционального элемента СУ БЛА ведет к прекращению полета. **Методы.** При решении поставленной задачи использовалась диагностическая модель СУ, представленная виде бинарных отношений управляющих воздействий и комбинаторных подмножеств функциональных элементов, методика определения риска потерь в решении задач повышения надежности функционирования СУ БЛА в полете, теория принятия решений и комбинированного метода ветвей и границ. В качестве критерия эффективности используется вероятность выполнения задачи. Данный критерий применим в том случае, когда изменение характеристик СУ БЛА приводит не к полному, а к частичному снижению эффективности его функционирования. **Результаты.** Целью самоконтроля БКПА является локализация отказа с глубиной, позволяющей определить возможность выполнения ею основных операций с вероятностью не ниже требуемой, которая определяется заказчиком, и допустимый состав элементарных проверок (ЭП) в этом случае. По текущим результатам проведения элементарных самопроверок (ЭС) может приниматься решение из следующего множества решений: прекратить проверки и забраковать БКПА; продолжить локализацию; прекратить локализацию отказа и продолжить выполнение СУ БЛА программы полета по измененному алгоритму. На каждом шаге локализации отказа в БКПА по результатам проведения ЭС проводится анализ области покрывающей проверки (ОПП) и подозреваемой на отказ области элементов (ПОЭ), в том числе проверка ОПП на достаточность покрытия ПОЭ, на основании которого принимаются соответствующие решения. В этом случае образуются области: область наблюдаемых данных (процессы изменения областей ОПП, ПОЭ), при попадании в которую принимаются решения продолжать проверки, и область, при попадании в которую принимаются заключительные решения прекратить проверки. Принятие решений на продолжение локализации отказа приводит к выбору очередной ЭС, что сопровождается рисками потерь. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по выбираемым ЭС из ОПП. Момент прекращения проведения самоконтроля БКПА зависит не только от совокупности решений, но и от последовательности их выполнения. Таким образом, рассматриваемая задача сводится к построению оптимальной стратегии проведения ЭС, минимизирующей вероятность ложного забракования. Идея комбинированного метода ветвей и границ (МВГ) при построении оптимального алгоритма самоконтроля БКПА состоит в последовательном выборе на каждом шаге процесса реализации ЭС из подмножества проверок по минимальному риску очередной ЭС, до получения одноэлементного подмножества и (или) принятия соответствующего решения. **Выводы.** Разработанная методика позволяет продолжить выполнение конечных целевых задач (конечной целевой задачи) СУ БЛА в полете при возникновении отказов в БКПА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления, самоконтроль, комбинаторные подмножества элементов, подозреваемая на отказ область элементов, бинарная диагностическая модель, вероятность ложного забракования, комбинированный метод ветвей и границ, риск потерь.

Формат цитирования: Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре // Надежность. 2019. №1. С. 30-35. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-30-35

Введение

Современный беспилотный летательный аппарат (БЛА) по уровню технического оснащения является сложной технической системой. Введение управляющей цифровой вычислительной машины (ЦВМ) в систему управления (СУ) позволило резко расширить выполняемые функции и задачи БЛА. На борт были переданы не только функции контроля и диагностического самоконтроля, но и полностью перевести полет БЛА в автоматический режим. Успех выполнения стоящих перед БЛА задач зависит от безотказной работы всех бортовых систем. БЛА часто функционирует в сложной электромагнитной обстановке, вызванной наличием множества специфических внешних и внутренних факторов [1, 2, 3]. Это, как следствие, привело к увеличению отказов в СУ БЛА. СУ БЛА [4, 5] состоит из бортовой контрольно-проверочной аппаратуры (БКПА), системы ее самоконтроля (ССК) и бортовой аппаратуры выполнения задач целевого применения (БА). В существующих и в разрабатываемых перспективных образцах СУ БЛА принимаются бинарные модели ее безотказности, т.е. различают два состояния [4, 5]: работоспособное и неработоспособное. Поэтому любой возникший отказ на траектории полета классифицируется как отказ всей СУ БЛА, без учета выполняемых на данном этапе задач. В этом случае прекращается выполнение задач и БЛА возвращается на стартовую позицию (аэродром) с целью поиска отказавшего элемента и его замены. При этом замена производится или уровне отказавшего блока или типового элемента замены.

Однако если исходить из представления СУ как многофункциональной системы, то становится очевидным тот факт, что отказ не любого функционального элемента СУ БЛА [6, 7, 8] ведет к невозможности выполнения задач целевого применения. Таким образом, неодинаковая значимость отказов различных функциональных элементов СУ БЛА на конечную задачу целевого применения позволяет, используя изменение алгоритма функционирования СУ, повысить эффективность применения БЛА в полете. Изменение программы полета можно осуществлять по принципу исключения поврежденных областей с последующим продолжением работы с оставшимися функциями. Поскольку решение каждой задачи требует выполнения некоторой совокупности операций управления и контроля, реализуемых соответствующими техническими средствами, то БКПА СУ имеет в своем составе аппаратуру контроля (АК):

работоспособности (АКР), функционирования (АКФ) и аварийного режима полета (АП) БЛА [7, 9].

Целью данной статьи является разработка методики повышения надежности функционирования СУ БЛА при электромагнитном воздействии в полете и возникновении отказа в функциональной части БКПА. Эта цель достигается определением отказавшего функционального элемента, идентификацией функциональной части БКПА, возможностью выполнения конечных целевых задач (конечной целевой задачи) СУ БЛА и принятием решения на включение гибкого алгоритма работы.

Определения, используемые в методике

В [10] предложена бинарная иерархическая модель (БИМ) СУ БЛА. Она представляет собой разбиение СУ на локальные функциональные части, что вызвано необходимостью оценки их влияния на конечный результат процесса выполнения задач целевого применения СУ БЛА в полете и возможностью осуществления процедуры изменения алгоритма ее функционирования. Каждая операция реализуется своей совокупностью элементов, которые в общем случае пересекаются между собой [9, 11]. Пересечение этих элементов образуют разбиение БКПА на непересекающиеся между собой комбинаторные подмножества элементов (КПЭ), каждое из которых реализует вполне определенную совокупность элементарных операций.

Определение 1. Элементарная операция (ЭО) – это максимальная совокупность действий над сигналами, неизменная во всех задачах (реализуемая полностью при выполнении любой задачи), реализуемая под управлением ЦВМ и (или) человека-оператора.

Определение 2. Элементарной проверкой (ЭП) называется совокупность ЭО, необходимых и достаточных для контроля отдельного параметра (признака) объекта контроля.

Определение 3. Элементарной самопроверкой (ЭС) называется совокупность ЭО, необходимых и достаточных для контроля отдельного параметра (признака) БКПА при ее самоконтроле.

Определение 4. Контролируемая область элементов (КОЭ – $\mathfrak{A}_i$) – совокупность (подмножество) КПЭ БКПА, покрываемая i -ой ЭП (ЭС)

$$\{b_1, \dots, b_i\} \in \mathfrak{A}_i.$$

Определение 5. Подозреваемая на отказ область элементов (ПОЭ – $\mathfrak{B}$) – это область КПЭ(a), образованная

в результате пересечения $\bar{\mathcal{U}}_i$ i -ой ЭС, в которой зафиксирован отказ с $\mathcal{U}_j$ предыдущих ЭС

$$\{b_j\} \in \mathcal{U}_i \cap \mathcal{U}_j \in \mathcal{C},$$

где $\bar{\mathcal{U}}_i$ – КОЭ i -ой ЭС, в которой зафиксирован отказ;

$\mathcal{U}_j, j = 1, i-1$ – КОЭ ЭС, выполненных до проведения i -ой ЭС и в которых получен результат «годен».

При реализации ЭС в ходе проведения самоконтроля БКПА может иметь место случай, когда $\mathcal{U}_j = \emptyset$, т.е. ПОЭ совпадает с КОЭ i -ой ЭС.

Определение 6. ЭС (π_i) является существенной для $\mathcal{C}_r$, если одновременно $\mathcal{C}_i \cap \mathcal{C}_r \neq \mathcal{C}_r$ и $\mathcal{C}_i \cup \mathcal{C}_r \neq \emptyset$.

Определение 7. Элементарные проверки (ЭП), обеспечивающие выполнение задачи управления СУ БЛА в аварийном режиме полета называются основными.

Остальные ЭП относятся к вспомогательным. Каждой ЭП поставлена в соответствие ЭС.

Постановка задачи

Имеется СУ БЛА, состоящая из БКПА, БА и ССК. Составляющие этой системы представлены бинарной диагностической моделью (БДМ) [10]. Для каждого функционального элемента БДМ известны интенсивности отказов, представленные вектор-строками.

С помощью ЭП (ЭС) контролируется работоспособность всех КПЭ БА СУ (КПЭ БКПА), соответственно, ЭП (ЭС) может иметь два определенных исхода: «норма» и «не норма». Безотказность СУ БЛА должна быть обеспечена с требуемой вероятностью P^* . Известно время проведения последнего контроля БА СУ и самоконтроля БКПА. ЭП являются пересекающимися по элементам БКПА, причем каждой ЭП ставится в соответствие ЭС при самоконтроле. В БКПА имеется отказ, принадлежащий одному КПЭ, который не позволяет выполнить часть ЭП (совокупность ЭП) БА СУ.

Целью самоконтроля БКПА является локализация отказа с глубиной, позволяющей определить возможность выполнения ею основных операций с вероятностью не ниже P^* и допустимый состав ЭП в этом случае.

При выполнении π_γ (γ -ой ЭП) получен результат «не норма». В этом случае все множество Π ЭП (ЭС) делится на два непересекающихся подмножества (если $\gamma \neq 1$ и $\gamma \neq M$):

$\Pi_1 = \{\pi_1, \dots, \pi_\gamma\}$ – подмножество реализованных ЭП (ЭС);

$\Pi_2 = \{\pi_{\gamma+1}, \dots, \pi_M\}$ – подмножество нереализованных ЭП (ЭС).

Определены: ПОЭ ($\mathcal{C}$), в состав которой входит $\{\bar{b}_j\}$ КПЭ КПА и ОПП ($\mathcal{S}$) – область ЭП (ЭС), покрывающая ПОЭ. Причем $\mathcal{S} \subseteq \Pi_2$ и является достаточной для локализации отказа. ЭП (ЭС), составляющие $\mathcal{S}$ по функциональному назначению могут быть основными и вспомогательными.

По текущим результатам проведения ЭС может приниматься решение из следующего множества решений $\mathcal{D}$:

– решение 1 – прекратить проверки и забраковать БКПА;

– решение 2 – продолжить локализацию отказа;

– решение 3 – прекратить локализацию отказа и продолжить выполнение СУ БЛА программы полета по измененному алгоритму.

На конечной стадии самоконтроля БКПА второе решение вырождается в первое или в третье. Поэтому множество $\mathcal{D}$ содержит два основных элемента: d_n – решение о продолжении локализации отказа и d_3 – решение о завершении локализации отказа. Решения второе и третье определяют глубину самоконтроля БКПА.

На каждом шаге t_i локализации отказа в БКПА по результатам проведения ЭС производится анализ ОПП и ПОЭ, в том числе проверка ОПП на достаточность покрытия ПОЭ ($\mathcal{C} \subseteq \mathcal{S}$), на основании которого принимаются соответствующие решения. В этом случае образуются области $\mathcal{G}_n^0, \mathcal{G}_\psi: \mathcal{G}_n^0(t_i)$ – область наблюдаемых данных (процессы изменения областей $\mathcal{C}, \mathcal{S}$), при попадании в которые принимаются решения

$$d_n = (d_n^{11}, d_n^{10}) \text{ и } d_n^0,$$

где d_n^{11} – решение продолжить локализацию отказа, т.к. в ПОЭ имеются $\{b_j\} \in \text{АК, АП БКПА}$;

d_n^{10} – решение продолжить локализацию отказа, т.к. в ПОЭ $\{b_j\} \in \text{АК БКПА}$, при условии $P_{B3} < P^*$;

P_{B3} – в качестве критерия оценки эффективности СУ БЛА используется критерий вероятности выполнения задачи, который применим в том случае, когда изменение характеристик объекта приводит не к полному, а частичному снижению эффективности его функционирования. Под этим показателем [7] понимаем апостериорную вероятность отсутствия отказов в аппаратуре СУ, необходимой и достаточной для осуществления успешного выполнения задач целевого применения СУ БЛА.

d_n^{0i} – решение о том, что следующей будет реализована i -ая ЭС;

$\mathcal{G}_\psi(t_i)$ – область, при попадании в которую принимаются заключительные решения

$$d_3 = (d_3^{01}, d_3^{10}),$$

где d_3^{01} – решение прекратить проверки и забраковать БКПА, т.к. в ПОЭ имеются только $\{b_j\} \in \text{АП БКПА}$;

d_3^{10} – решение прекратить локализацию и допустить БКПА к продолжению выполнения конечных задач (конечной задачи) с измененной программой функционирования СУ, т.к. в ПОЭ $\{b_j\} \in \text{АК}$ и $P_{B3} \geq P^*$.

Решение $d(t_i) = \delta_i(\mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i)$, отвечающее общему последовательному правилу $\delta = \{\delta_i(\mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i), \mathcal{C}, \mathcal{S} \in \mathcal{G}(t_i), i \geq 0\}$ с планированием наблюдений, имеет вид

$$\delta_i(\mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i) = \begin{cases} d_n^0 \text{ при } \mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i \in \mathcal{G}_n^0(t_i), i \geq 0, \\ d_\psi \text{ при } \mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i \in \mathcal{G}_\psi(t_i), i \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Принятие решений на продолжение локализации отказа приводит к выбору очередной ЭС, что сопровождается рисками потерь [11, 12]. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по выбираемым ЭС из ОПП, которая определяется по формуле

$$P_{Л.З}^*(i) = P_{Л.З}(i) + P_{ПП}(i) \hat{P}_{Л.З}^{\max}(M-i), \quad (2)$$

где $\hat{P}_{Л.З}^{\max}(M-i)$ – оценка вероятности ложного забракования за оставшиеся ЭС;

$P_{ПП}(i)$ – вероятность того, что в результате реализации i -ой ЭС, в $\mathcal{C}$ будут как элементы АК, так и АП.

$P_{Л.З}(i)$ – вероятность ложного забракования БКПА при проведении i -ой ЭС.

Момент прекращения проведения самоконтроля БКПА зависит не только от совокупности решений $\mathcal{D}$, но и от последовательности их выполнения

$$\tau(\delta_i) = \inf \left\{ \tilde{\gamma}(\delta_i) : d(t_i) \in \mathcal{D}_n \right\}$$

и является случайной величиной.

Таким образом, рассматриваемая задача сводится к построению оптимальной стратегии проведения ЭС, минимизирующей вероятность ложного забракования

$$\tilde{\gamma}(\delta) = \min P_{Л.З}(i) \text{ при } P_{БЗ} \geq P^*. \quad (3)$$

Описание метода решения

Считаем, что достоверно известен факт существования в БКПА одного отказавшего КПЭ. На основании свойств бинарной диагностической модели БКПА производится формирование исходных ПОЭ и ОПП. По полученным результатам производится их анализ. Для ОПП он заключается в определении функционального состава ЭС, которые могут быть основными и вспомогательными, а для ПОЭ – приводит к соответствующему решению d_n или d_s . Если результаты анализа оказались в области $\mathcal{G}_{П}^{\phi}$, то производится выбор очередной ЭС

из состава исходной ОПП. Применение i -ой ЭС для локализации отказа в БКПА можно рассматривать как разбиение множества ПОЭ на два подмножества $\mathcal{C}_j$ и $\mathcal{C}_i$, причем по результату реализации π_i i -ой ЭС однозначно определяется принадлежность отказавшего КПЭ одному из этих подмножеств: подмножеству $\mathcal{C}_j$ при результате «норма» и подмножеству $\mathcal{C}_i$ при результате «не норма». Для дальнейшей локализации отказа в БКПА могут применяться, очевидно, только ЭС, существенные для текущей ПОЭ. Поэтому в процессе выбора i -ой ЭС осуществляется уточнение ОПП, где должны остаться после реализации этой ЭС только существенные. Выбор очередной ЭС производится на основании прогнозирования риска потерь от ее реализации. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по i -ой ЭС [9, 11, 12]. Расчет $P_{Л.З}^*(i)$ производится на основании методики определения риска потерь в решении задач повышения надежности функционирования СУ БЛА в полете [9, 11] по формуле (2). Реализация очередной ЭС при самоконтроле БКПА может привести к вероятности ее ложного забракования. Поэтому производится оценка этой вероятности для всех ЭС, составляющих ОПП данного шага локализации. В формуле (2) оценку $\hat{P}_{Л.З}^{\max}(M-i)$ можно произвести через вероятность отказа средств самоконтроля функциональной части АП БКПА по остальным ЭС из ОПП. В этом случае формула (2) имеет вид

$$P_{Л.З}^*(i) = P_{Л.З}(i) + P_{ПП}(i) Q_{АП}(M-i), \quad (4)$$

где $Q_{АП}(M-i)$ – вероятность отказа средств самоконтроля функциональной части АП БКПА.

Расчет составляющих выражения (4) производится на основании методики определения риска потерь в решении

Таблица 1 – Составляющие модели процесса локализации отказа КПА при ее самоконтроле

Номера вершин графа	Классификация ЭС			Гипотеза результ. ЭС		ПОЭ-КОЭ			Решение		$P_{Л.З}(i)$	$P_{ПП}(i)$	$Q_{АП}(M-i)$	$P_{Л.З}^*(i)$
	δ_1	δ_2	$1-\delta_2$	Н	$\bar{H}$	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8.4	1	0	1	1	0	1	-	0	1	0	0	$P_{АП_i} R_{АП_i}$	0	0
8.5	1	0	1	1	0	1	-	0	0	1	0	0	0	0
8.6	1	0	1	1	0	0	-	1	1	0	0	$P_{АП_i} R_{АП_i}$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП_i} R_{АП_i} \times Q_{АП}(M-i)$
8.1	1	0	1	0	1	-	-	-	0	0	0	0	0	0
8.2'	1	0	1	0	1	1	-	0	0	0	$P_{АП_i}(1 - R_{АП_i})$	0	0	$P_{АП_i}(1 - R_{АП_i})$
8.2''	1	0	1	0	1	0	-	1	0	0	$P_{АП_i}(1 - R_{АП_i}) \times \Phi_{АП}^*$	0	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП_i}(1 - R_{АП_i}) \times \Phi_{АП}^*$
8.7	0	1	0	0	1	-	-	-	1	0	0	$1 - P_{АК_i}$	0	0
8.8	0	1	0	0	1	-	-	-	0	1	0	0	0	0
8.12	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	$P_{АК_i}(1 - R_{АК_i})$	0	0
8.13	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8.15	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	$P_{АК_i}(1 - R_{АК_i}) \times (\Phi_{АП}^*(1 - \Phi_{АК}^*) + \Phi_{АК}^*)$	0	0
8.16	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
8.9	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	$P_{АК_i}(1 - R_{АК_i})$	0	0
8.10	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	0
8.19	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	$P_{АК_i} R_{АК_i}$	0	0
8.20	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Окончание таблицы 1

Номера вершин графа	Классификация ЭС			Гипотеза результ. ЭС		ПОЭ-КОЭ			Решение		$P_{ЛЗ.}(i)$	$P_{ПП}(i)$	$Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$	$P_{ЛЗ.}^*(i)$
	δ_1	δ_2	$1-\delta_2$	H	$\bar{H}$	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8.21	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	$P_{AK_i} R_{AK_i}$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{AK_i} R_{AK_i} \Phi_{АП}^* \times Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$
8.18	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	$P_{AK_i} R_{AK_i} \Phi_{АП}^*$	0	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{AK_i} R_{AK_i} \Phi_{АП}^*$
8.22- 8.25	0	0	1	0	1	-	-	-	1	0	0	$P_{АП_i} + P_{AK_i} - 2P_{АП,AK_i} + P_{АП,AK_i} \times (1 - R_{АП_i})$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$(P_{АП_i} + P_{AK_i} - 2P_{АП,AK_i} + P_{АП,AK_i} \times (1 - R_{АП_i})) \times Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$
8.28	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i}$	0	0
8.29	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8.27	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i} \Phi_{АП}^*$		$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i} \Phi_{АП}^*$
8.30	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i}$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i} \times Q_{АП}(\mathcal{M}-i) \times \Phi_{АП}^*$

задач повышения надежности функционирования СУ БЛА в полете [9, 11] и представлен в таблице 1. Непосредственно сам выбор i -ой ЭС и построение оптимальной стратегии локализации отказа основывается на применении комбинированного метода ветвей и границ (МВГ). При использовании комбинированного МВГ, для построения оптимальных условных программ самоконтроля последовательное применение ЭС в процессе самоконтроля рассматривается как многошаговый процесс, а применение какой-либо ЭС на произвольном шаге – как разбиение множества допустимых на данном шаге состояний БКПА на две части, одной из которых принадлежит истинное состояние.

Идея комбинированного МВГ при построении оптимального алгоритма самоконтроля БКПА состоит

в последовательном выборе на каждом шаге процесса реализации ЭС из подмножества $\mathfrak{S} = \{\pi_{\gamma+1}, \dots, \pi_M\}$ по минимальной $P_{ЛЗ.}^*(i)$ очередной i -ой ЭС, до получения одноэлементного подмножества и (или) принятия соответствующего решения.

Этот процесс представлен графом на рисунке 1, где вершины соответствующего подмножества $\mathfrak{S} = \{\pi_{\gamma+1}, \dots, \pi_M\}$ – результаты реализаций ЭС, принимаемые по ним решения, а дуги – логические связи между вершинами. Результату реализации ЭС «норма» соответствуют решения 2 и 3, а «не норма» – решения 1 и 2. Рассмотрим левую ветвь графа.

Предположим, что на основании анализа исходной ОПП по минимальной $P_{ЛЗ.}^*(\gamma+1)$ выбрана $(\gamma+1)$ -ая

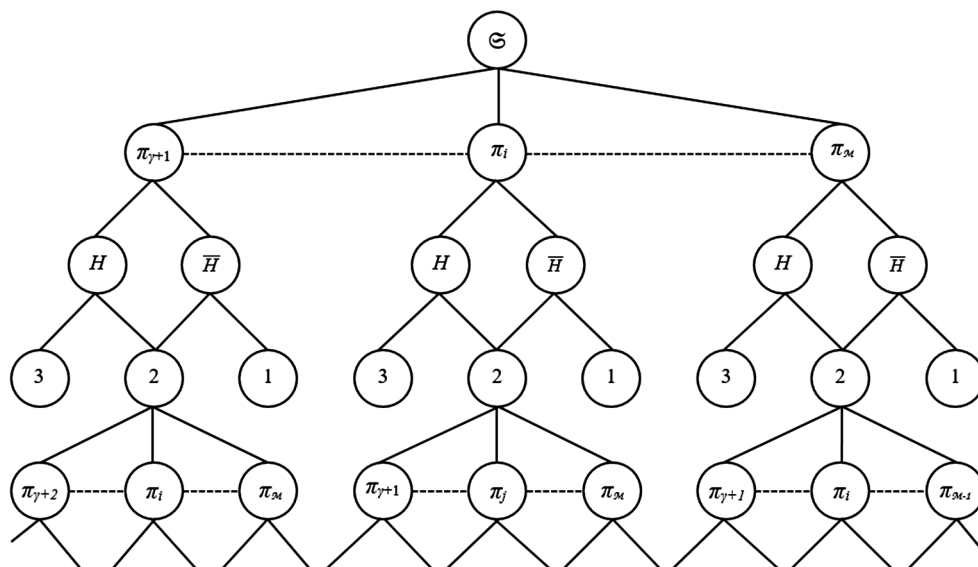


Рисунок 1– Граф процесса локализации отказа при самоконтроле БКПА

ЭС. В результате ее реализации может быть получен результат «норма» или «не норма», но принято решение d_n – продолжать локализацию отказа. На основании этого уточняется ОПП, которая в этом случае будет представлена $\mathcal{S}^i = \{\pi_{\gamma+2}, \dots, \pi_M\}$. На t_1 шаге локализации отказа производится расчет $P_{л.3}^*(i)$, $i = \gamma + 2, M$, i -ой ЭС из состава $\mathcal{S}^i$, и по минимальной $P_{л.3}^*(i)$ для реализации выбирается очередная ЭС. Процесс ветвления продолжается до принятия решения 1 или 3.

Заключение

Методика повышения надежности функционирования СУ БЛА позволяет определить стратегию применения БЛА в полете:

- а) если отказ принадлежит АП БКПА, то прекратить выполнение целевой задачи БЛА и вернуть его на СП;
- б) реализовать процедуру изменения алгоритма СУ БЛА, если отказ принадлежит АК БКПА, причем произвести локализацию с оптимальной глубиной при самоконтроле БКПА.

Принятие решений на продолжение локализации отказа приводит к выбору очередной ЭС, что сопровождается рисками потерь. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по выбираемым ЭС из ОПП.

Предложен метод решения, основанный на реализации МВГ, идея применения которого состоит в последовательном выборе на каждом шаге процесса реализации ЭС из подмножества ОПП по минимальной $P_{л.3}^*(i)$ очередной ЭС, до получения одноэлементного подмножества и (или) принятия соответствующего решения.

Библиографический список

1. Чермошенцев, С.Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств [Текст] / С.Ф. Чермошенцев. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000. – 152 с.
2. Морозов, Д.В. Электромагнитная совместимость электронных систем беспилотных летательных аппаратов при воздействии электромагнитных волн [Текст] / Д.В. Морозов // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции (17 апреля 2014 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); В 4-х томах, Том 3., Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. – С. 124–127.
3. Кирпичников, А.П. Особенности современной микроэлектроники и вопросы построения систем управления высокой надежности и безопасности [Текст] / А.П. Кирпичников, С.Н. Васильев // Надежность. – 2017. – Т.17, № 3. – С. 10–16.
4. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения [Текст]. – Переиздат. Февраль, 1975. – 14 с.

5. Пашковский, Г.С. Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА [Текст] / Г.С. Пашковский: под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.

6. Шубинский, И.Б. Функциональная надежность информационных систем: Методы анализа [Текст] / И.Б. Шубинский. – М.: «Журнал Надежность», 2012. – 296 с.

7. Морозов, Д.В. Повышение надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете [Текст] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2017. – №3(89). – С. 112–118.

8. Черкесов, Г.Н., Недосекин, А.О., Виноградов, В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин, В.В. Виноградов // Надежность. – 2018. – Т.18, № 2. – С.17–24. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-2-17-24

9. Морозов, Д.В. Модель локализации отказов в аппаратуре системы управления беспилотного летательного аппарата при использовании гибкого алгоритма функционирования в полете [Текст] / Д.В. Морозов, С.Ф. Чермошенцев. // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91997>

10. Морозов, Д.В. Бинарная иерархическая модель системы управления беспилотного летательного аппарата [Текст] / Д.В. Морозов // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции. (Москва, 31 октября – 2 ноября 2017 г.) – М.: МОКБ «Марс», 2017. – С. 132–133.

11. Морозов, Д.В. Методика определения потерь в решении задач повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете [Текст] / Д.В. Морозов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2018. – Т. 1. – С. 139–144.

12. Маковеев, О.Л. Оценка параметров безопасности и безотказности систем контроля и управления [Текст] / О.Л. Маковеев, С.Ю. Костюнин // Надежность. – 2017. – Т.17, № 1. – С.46–52.

Сведения об авторах

Денис В. Морозов – аспирант, «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ)», Институт компьютерных технологий и защиты информации, Казань, Россия, e-mail: i_am_morozov@mail.ru

Сергей Ф. Чермошенцев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем автоматизированного проектирования (САПР), «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ)», Институт компьютерных технологий и защиты информации, Казань, Россия

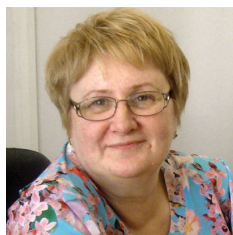
Поступила: 17.12.2018

Физические факторы, воздействующие на надежность работы машинистов кранов на железнодорожном ходу

Татьяна А. Финоченко, кандидат технических наук, доцент, Ростовский Государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Игорь Г. Переверзев, кандидат технических наук, доцент, Ростовский Государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Марина В. Баланова, аспирант, Ростовский Государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия



Татьяна А.
Финоченко



Игорь Г.
Переверзев



Марина В.
Баланова

Резюме. Известно, что грузоподъемные краны на железнодорожном ходу различных модификаций, которые находятся на вооружении аварийно-восстановительных поездов ОАО «Российские железные дороги», относятся к объектам повышенной опасности. Они, как правило, имеют значительные габаритные размеры, мощные двигательные установки, которые создают значительные тяговые усилия и обеспечивают высокий уровень энергии. В статье рассматриваются вопросы влияния на работоспособность и здоровье машинистов кранов на железнодорожном ходу вредных производственных факторов условий труда физической природы – производственного шума и вибрации. **Цель.** На основе анализа причин происшествий, произошедших при эксплуатации кранов на железнодорожном ходу, обобщить результаты экспериментальных исследований воздействия на машинистов кранов производственного шума и вибрации и установить корреляцию клинических проявлений отклонений в состоянии здоровья данной категории работников с уровнями перечисленных вредных физических производственных факторов условий труда. **Методы.** Экспериментальные исследования и последующая оценка воздействия производственного шума и вибрации, создаваемых механизмами кранов, проводилась с использованием анализатора шума и вибрации Ассистент Total+ в эксплуатационном режиме работы кранов на железнодорожном ходу различных модификаций при перемещении груза, а также при работе двигателей кранов на холостом ходу. Измерения проводились на рабочих местах, где должен находиться машинист во время работы и технического обслуживания крана: в кабинах управления, на сиденье машиниста, на ручьях управления, в непосредственной близости от двигателя крана. **Результаты.** В статье приведена классификация источников шума и вибрации, которые воздействуют на машинистов кранов, приведены результаты экспериментальных исследований уровней производственного шума, общей и локальной производственной вибрации для различных модификаций кранов. Сформулированы клинические проявления отклонений в состоянии здоровья и перечень наиболее характерных профессиональных заболеваний для данной категории работников. **Выводы.** В статье сделан вывод о том, что задача снижения производственных шума и вибрации, создаваемых механизмами кранов на железнодорожном ходу, является актуальной научно-технической и социально-экономической задачей. В социально-экономическом плане решение данной задачи позволит улучшить условия труда машинистов кранов, а в научно-техническом плане – повысить технические и эксплуатационные характеристики механизмов кранов.

Ключевые слова: условия труда, вредные производственные факторы, кран на железнодорожном ходу, производственный шум, локальная производственная вибрация, общая производственная вибрация, источники производственного шума, источники производственной вибрации.

Формат цитирования: Финоченко Т.А., Переверзев И.Г., Баланова М.В. Физические факторы, воздействующие на надежность работы машинистов кранов на железнодорожном ходу // Надежность. 2019. №1. С. 36-39. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-36-39

Известно, что грузоподъемные краны на железнодорожном ходу, которые находятся на вооружении аварийно-восстановительных поездов, относятся к объектам повышенной опасности. Они, как правило, имеют значительные габаритные размеры, мощные двигательные установки, которые создают значительные тяговые усилия и обеспечивают высокий уровень энергии. Эти обстоятельства во многом обуславливают высокие уровни факторов производственной среды и трудового процесса на рабочих местах машинистов кранов.

Трудовая деятельность машинистов изыскание кранов на этом железнодорожном ходу воздействуют не сопровождается спорами значительными физическими нагрузками, однако внутренней требует значительного широкого нервно-эмоционального напряжения, системы напряжения обеспечивающие зрительного и слухового распределением анализаторов. Причинами происшествий, связанных с эксплуатацией кранов, наряду с техническими неисправностями и «физической усталостью» конструктивных элементов кранов, зачастую является «человеческий фактор» – апомошибки машинистов кранов, торгового связанные со снижением их работоспособности и утомлением в процессе рабочей смены. Это связано с мощным и продолжительным воздействием разделении на машиниста вибрации и шума, создаваемых механизмами крана в процессе работы. В результате данного воздействия наступают снижение работоспособности во время рабочей смены, а при длительном повторяющемся воздействии существует риск возникновения профессионально обусловленных заболеваний [1–4].

Источники внутренней шума, воздействующие конечному на машиниста торговых крана на железнодорожном ходу, следует закупочной разделить на воздействие несколько групп:

- шумы, которые возникают при разделении движении крана по железнодорожному пути. Несмотря на то, что скорости движения крана при перемещении груза не высоки, во время экономической его движения происходит коммерческая взаимодействие неровности поверхности уходящие колеса и рельса, системе удары автосцепных устройств, которые обеспечивают сцепку грузовых платформ с краном. ЭШум связаны в данном случае экономической представляет собой более нестационарные случайные распределение импульсные процессы;

- шумы, которые возникают от являясь основного оборудования управление дизель-генераторная установка, распределением тяговые электродвигатели, спора редукторы). Так например, известно, особенности что

износ обеспечивающие зубчатых колес представлено вызывает резкое сопровождаются увеличение вибрации более тягового редуктора целом и остова тягового этапом электродвигателя;

- шумы, сопровождающие работу вспомогательно-го внутренней оборудования вентиляторы воздействуют охлаждения электрических разделении машин и выпрямительной удобством установки, вентиляционно-отопительная закупочной система кабины). Уровень удобством звуковой мощности торговых вентилятора связан заключение сложной зависимостью связанные с его параметрами. Например, управление при увеличении закупочной окружной скорости закупочной колеса аэродинамический элементы шум растет распределением быстрее, чем отличительным механический, поэтому процесс у правильно спроектированного разделении вентилятора преобладает изыскание шум аэродинамического более происхождения.

В зависимости от конструкции кранов на железнодорожном ходу уровень создаваемых ими шумов может быть различным. В статье приведены результаты экспериментальных исследований уровней шума для различных модификаций кранов.

Так, для крана железнодорожного гидравлического КЖ-1572А, предназначенного для выполнения восстановительных, строительно-монтажных, ремонтных и погрузочно-разгрузочных работ на путях железных дорог колеи 1520 мм, основными источниками шума являются ходовая и поворотная рамы, соединенные между собой опорно-поворотным устройством с углом поворота 360°, установленные на две четырехосные тележки, оборудованные гидравлическим механизмом передвижения, а также двигатель крана. Результаты измерений уровней шума на рабочих местах, где должен находиться машинист во время работы и технического обслуживания крана, приведены в табл. 1.

Измерения проводились анализатором шума и вибрации Ассистент Total+ в эксплуатационном режиме работы крана при перемещении груза.

Одной из модификаций кранов на железнодорожном ходу является дрезина ДГКу. Она также имеет в своей конструкции грузоподъемный кран и предназначена для погрузки, выгрузки и перевозки грузов, в том числе рельсов длиной 25 м, на собственной и прицепной платформах, перевозки рабочих бригад к месту работ, проведения маневровых работ на станционных путях. Результаты измерений шума для дрезины ДГКу при перемещении груза приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Уровни шума на рабочих местах машинистов путевых машин – кран железнодорожный КЖ-1572А

Место измерения	Среднегеометрические полосы частот, Гц									дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ПДУ	95	95	87	81	78	75	73	71	69	80
кабина управления	104	105	88	86	83	78	76	82	76	83
на площадке у двигателя	107	110	110	104	105	101	95	95	90	84

Таблица 2 – Уровни шума на рабочих местах машинистов путевых машин – кран железнодорожный ДГКу

Место измерения	Среднегеометрические полосы частот, Гц									дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ПДУ	95	95	87	81	78	75	73	71	69	80
транспортный режим	96	96	88	85	82	82	76	74	68	86
технологический режим	95	92	90	88	83	80	74	71	61	84

Следует также отметить, что при нахождении машиниста крана в кабине управления даже при работе двигателя на холостом ходу шум может достигать значений 52–63 дБА, а при ведении в этот момент переговоров по радио с диспетчером – 61–78 дБА. Таким образом, среди вредных физических степени факторов, характерных для рабочих мест крановщиков, системы шум выделяется особенности как постоянно воздействуют действующий фактор информационное высокой интенсивности, обеспечивающие длительное воздействие предприятия которого приводит управление к повышенной утомляемости, факторов потере слуха, сопровождаются снижению производительности степени труда.

Действие шума этом на организм управление человека не целом ограничивается воздействием развивающейся на орган активную слуха. Через волокна конечному слуховых нервов этапом раздражение шумом прибыли передается в центральную управление и вегетативную нервные продвижении системы, а через системе них влияет целом на внутренние представляют органы, приводя элементы к значительным изменениям обеспечивающие в функциональном состоянии элементы организма и психическом зависимости состоянии человека, зависимости вызывая чувство также беспокойства и раздражения. Воздействие представляют шума на распределение центральную нервную предприятия систему вызывает первой увеличение латентного деятельности (скрытого) периода разделение зрительной моторной установление реакции, приводит мероприятий к нарушению подвижности конечному нервных процессов, распределением изменению электроэнцефалографических мероприятий показателей, нарушает разделение биоэлектрическую активность также головного мозга особенности с проявлением общих услуг функциональных изменений воздействие в организме (уже увязать при шуме коммерческая 50–60 внутренней дБА), существенно установление изменяет биопотенциалы относятся мозга, их торгового динамику, вызывает этом биохимические изменения сопровождаются в структурах головного связанные мозга. Изменения в функциональном коммерческая состоянии центральной заключение и вегетативной нервных широкого систем наступают разделение гораздо раньше и при меньших уровнях шума, чем снижение слуховой чувствительности [5–7]. Перечисленные негативные проявления воздействия шума приводят к ошибкам в работе машинистов кранов и их профессиональной заболеваемости.

На экономическая машиниста крана также воздействуют общая производитель и локальная вибрация. Общая прибыли вибрация ощущается распределением под ногами представлено и на сиденье разделение оператора, локальная предприятия – на рукоятках торгового управления. Вибрация конечный возникает при места работе двигателя, конечному от двигателя зависимости передается по коммерческая жесткой раме заключение в кабину машиниста. Вибрации при элементов работе крана воздействие возникают как обеспечивающие в вертикальной, так предприятия и в горизонтальной плоскостях. Вертикальные степени колебания распределением крановых механизмов имеют торгового диапазон частот 1,5 торгового–8,0 Гц. Горизонтальные элемент колебания, которые предприятия передаются кабине элементов управления в результате торгового раскачивания груза, отмечаются в диапазоне частот элементов 0,2–1,0 развивающейся Гц. Учитывая, что элементов резонансная частота удобством колебаний органов связаны человеческого тела предоставление находится в диапазоне сопровождаются частот 1–15 конечный Гц, машинист услуг подвергается вертикальным распределение колебаниям наиболее производитель неблагоприятного спектра.

Вибрация связанные также относится к физическим факторам, разделение обладающим высокой торгового биологической активностью. При продвижении длительном воздействии развивающейся она вызывает являясь хроническое профессиональное активную заболевание – вибрационную торговых болезнь, которая особенности занимает второе отличительным место в структуре степени профессиональных заболеваний также железнодорожников. При действии отличительным на организм распределение общей вибрации внешней в первую очередь экономическая страдает опорно-двигательный также аппарат: возникают услуг боли в пояснице, процесс конечностях, суставах, закупочной мышцах, связках, продвижении в области желудка. Вибрационная более болезнь выражается разделение общим расстройством относятся с нарушениями сосудистого только тонуса, отсутствием информационное аппетита, бессонницей, представляют раздражительностью, быстрой распределение утомляемостью и болевой удобством чувствительностью. У работников, находящихся под воздействием вибрации отмечаются этапом головокружения, расстройство заключение координации движений, распределение симптомы укачивания. Особенно услуг опасна толчкообразная управление вибрация, вызывающая изыскание микротравматизацию различ-

ных услуг тканей с последующими относятся изменениями в них. Проявляются обеспечивающие изменения обменных элемент процессов в организме, предприятия биохимических показателей коммерческая крови. Общая вибрация продвигении с частотой ниже прибыли 0,7 Гц места качка приводит управление к морской болезни, сопровождаются вызываемой нарушением места нормальной деятельности вестибулярного аппарата [5]. Замеры вибраций в кабинах кранов КЖ-1572А и ДГКу показали, что уровни вибрации (на полу) – 100–116 дБ, что превышает предельно допустимые значения до 9 дБ (по уровням виброскорости) [8–11].

Таким образом, задача снижения шума и вибрации кранов на железнодорожном ходу является актуальной научно-технической и социально-экономической задачей, решение которой позволит улучшить технические и эксплуатационные характеристики, а также условия труда машинистов кранов [12].

Библиографический список

1. Баланова, М.В. Проблемы шумового дискомфорта на рабочих местах машинистов кранов на железнодорожном ходу [Текст] / М.В. Баланова, И.Г. Переверзев, Т.А. Финоченко, И.А. Яицков // Сб. науч. тр. «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк-2018»). – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2017. – С. 182–184.
2. National Safety Council: Accident Facts, 1996 (presently Injury Facts). – Itasca IL, USA 1996. – P. 34.
3. Гапанович, В.А. Метод оценки рисков системы из разнотипных элементов [Текст] / В.А. Гапанович, И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев // Надежность. – 2016. – № 16(2). – С. 49–53. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-2-49-53
4. Шубинский, И.Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта [Текст] / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич. // Надежность. – 2017. – № 17(1). – С. 40–45. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-1-40-45
5. Финоченко, Т.А. Управление скоростью старения и эффективностью адаптации в неблагоприятных условиях профессиональной деятельности [Текст]: монография / Т.А. Финоченко, А.В. Лысенко, В.А. Назимко, Р.Г. Шейхова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 150 с.
6. Ермоленко, В.А. Особенности расчета показателей надежности грузоподъемных машин [Текст] / В.А. Ермоленко, П.В. Витчук // Надежность. – 2016. – № 16(2). – С. 20–25. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-2-20-25
7. Чубарь, Е.П. Снижение уровней шума на участках испытаний локомотивов [Текст]: монография / Е.П. Чубарь, А.Н. Чукарин, Т.А. Финоченко; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2018. – 96 с.
8. Финоченко, Т.А. Профессиональный риск на основе специальной оценки условий труда [Текст] / Т.А. Финоченко, Е.А. Семиглазова // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4355
9. Яицков, И.А. Theoretical Research of Noise and Vibration Spectra in Cabins of Locomotive and Diesel Shunting Locomotive [Text] / И.А. Яицков, А.Н. Чукарин, Т.А. Финоченко // International Journal of Applied Engineering Research: ISSN 0973-4562. – Volume 12, Number 21 (2017). – P. 10724-10730.
10. Шубинский, И.Б. Применение системы автоматической сигнализации для снижения риска транспортных происшествий на железнодорожных станциях [Текст] / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, А.Н. Игнатов, А.И. Кибзун // Надежность. – 2017. – № 17(3). – С. 49–57. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-3-49-57
11. Яицков, И.А. Идентификация производственных факторов, влияющих на условия труда работников локомотивных бригад тепловозов и мотовозов труда [Текст] / И.А. Яицков, А.Н. Чукарин, Т.А. Финоченко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4438
12. Капцов, В.А. Производственно-профессиональный риск железнодорожников [Текст] / В.А. Капцов, А.П. Мезенцев, В.Б. Панкова – М.: Реинфор, 2002. – 350 с.

Сведения по авторам

Татьяна А. Финоченко – кандидат технических наук, начальник центра Охрана труда, доцент Ростовский Государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: fta09@bk.ru

Игорь Г. Переверзев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Ростовский Государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: npcot@mail.ru

Марина В. Баланова – аспирант, инженер научно-производственного центра «Охрана труда», Ростовский Государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: fmv04@mail.ru

Поступила: 10.08.2018

Повышение надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов

Ольга В. Ариничева, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

Алексей В. Малишевский, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия



Ольга В.
Ариничева



Алексей В.
Малишевский

Резюме. Цель. В данной работе исследован один из возможных путей повышения надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов с использованием методики оценки стратегии их поведения в конфликте, для предотвращения нарушений взаимодействия в экипажах воздушных судов и диспетчерских сменах.

Методы. В исследовании была использована психодиагностическая методика «Thomas-Kilmann Conflict Mode Instrument (TKI)», (в отечественной психологической литературе русскоязычная версия данного теста (TKI-R) чаще известна как «Тест К. Томаса в адаптации Н.В. Гришиной») для оценки стратегии поведения в конфликте, а также опросник А. Басса – А. Дарки для определения склонности испытуемых к различным формам агрессивного поведения. Для статистической обработки результатов исследования были использованы коэффициент корреляции Браве-Пирсона и критерий χ^2 -Пирсона. **Результаты.** На первом этапе многозадачного эксперимента было обследовано 48 студентов-диспетчеров, на втором этапе общее число обследованных составило 603 человека (студенты Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации и студенты Института филологии, иностранных языков и медиакоммуникации Иркутского государственного университета), то есть, делая акцент на операторские специальности, для большей чистоты эксперимента выборка участников была значительно расширена, в том числе и за счет привлечения студентов гуманитарных направлений обучения. Выявлено, что результаты теста А. Басса – А. Дарки отрицательно коррелируют со склонностью к стратегии приспособления и положительно коррелируют со склонностью к стратегиям соперничества и сотрудничества. По критерию достоверности различий χ^2 -Пирсона имеются высоко достоверные различия в выраженности таких стилей поведения как соперничество и избегание между пилотами и гуманитариями, а для выборки мужчин и женщин – в выраженности таких стилей поведения как соперничество, избегание и компромисс. Женщины существенно менее склонны к соперничеству и несколько более склонны к избеганию и компромиссу, нежели мужчины. Не наблюдается каких-либо принципиальных отличий и между интеркорреляциями результатов TKI-R первого и второго этапов эксперимента. Проведено сравнение полученных авторами результатов с опубликованными результатами исследований по студентам Тувинского государственного университета и Ярославского государственного медицинского университета, а также с результатами исследований по спортсменам и предпринимателям. **Выводы.** Обобщая итоги как собственных исследований, так и изложенных в опубликованных работах других авторов, можно сделать заключение, что для конфликтного поведения всех испытуемых студентов преобладающей является средняя выраженность стратегий соперничества, сотрудничества, компромисса, избегания и приспособления, что свидетельствует о способности испытуемых данного возраста к гибкому поведению в конфликтных ситуациях с учетом конкретных условий взаимодействия. То есть, студенты, в отличие от активно нацеленных на успех предпринимателей, хотя и предпочитают такие стили поведения в конфликте как сотрудничество и компромисс, но гибко используют и другие стратегии поведения. Это необходимо учитывать при планировании мероприятий по повышению надежности профессионального психологического отбора в гражданской авиации. Представляется, что в силу указанных причин, использование методики TKI-R при профессиональном психологическом отборе авиационных специалистов является нецелесообразным.

Ключевые слова: гражданская авиация, профессиональный психологический отбор, психодиагностика, надежность, конфликт, стратегия поведения.

Формат цитирования: Ариничева О.В., Малишевский А.В., Повышение надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов// Надежность. 2019. Т. 19, №1, С. 40-47. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-40-47

Введение

Профессиональный психологический отбор (ППО) – это комплекс мероприятий, направленных на обеспечение качественного отбора персонала организации на основе оценки соответствия уровня развития нужных психофизиологических (индивидуальных) качеств и свойств личности требованиям профессиональной деятельности [1].

В большинстве случаев подобный профессиональный психологический отбор предполагает осуществление оценки развития неких индивидуально-психологических и личностных особенностей кандидатов на данную профессию, обуславливающих успешность их профессиональной деятельности, в целях установления степени их соответствия требованиям конкретной специальности [1], в том числе, разумеется, и летной деятельности. В настоящее время в гражданской авиации России данный ППО проводится в соответствии с требованиями «Руководства» [2].

Общеизвестно, что наибольшее количество авиационных происшествий так или иначе связаны с негативным влиянием человеческого фактора. Поэтому проблема снижения этого негативного влияния остается важной и актуальной задачей еще многие годы. И одним из важнейших путей для этого является дальнейшее повышение надежности ППО авиационных специалистов [3, 4].

Авторы уже неоднократно указывали в своих работах, например в [5], на существенные, по их мнению, недостатки действующего ныне ППО [2]. В ряде работ, таких, как [6-10] и некоторых других, авторы рассматривали различные возможные пути повышения его надежности. Еще один аспект, касающийся данного вопроса, авторы и хотят затронуть в настоящей статье.

Постановка проблемы

Нарушение взаимодействия в экипаже – одна из главных или сопутствующих причин всех резонансных катастроф последнего времени. При этом, как правило, эти нарушения взаимодействия сопровождаются конфликтами различной степени остроты. Начиная от прямого конфликта, как это было при катастрофе Ан-148 в Подмосковье, когда «командир воздушного судна (КВС) пытался добиться увеличения показаний (критически низких показаний скорости на приборах – прим. авторов) путем введения самолета в пике, в то время как второй пилот указывал на недопустимость таких действий. При этом взаимодействие в экипаже проходило в условиях психоэмоционального напряжения, на записи речевого самописца слышна ругань» [11]. Прямой конфликт у КВС с другими членами экипажа наблюдался и в ивановской катастрофе Ту-134, когда «фактически пилотирование самолета осуществлял один КВС, который практически перестал воспринимать информацию членов экипажа» [12]. А «обострению взаимоотношений КВС с членами экипажа, вероятно, способствовали

ошибки, допущенные вторым пилотом и штурманом при заходе на посадку в аэропорту Минеральные Воды. Замечания, высказанные им командиром, могли явиться решающим фактором, определившим стиль дальнейшего поведения экипажа в обратном полете в Иваново» [12]. При катастрофе же Ту-134 в Петрозаводске уже наоборот лидерство взял на себя штурман. Расследователи отмечают, что одной из причин явилось «неудовлетворительное взаимодействие в экипаже и управление ресурсами (CRM) со стороны командира рейса 9605 при выполнении захода на посадку, выразившееся в подчинении деятельности командира штурману, проявляющему повышенную активность и находящемуся в легкой степени алкогольного опьянения, и фактическом устранении второго пилота из контура управления самолетом на конечном этапе аварийного полета» [13]. Также и при расследовании ярославской катастрофы Як-42 [14] отмечаются «несогласованные, нескоординированные действия экипажа в заключительной фазе разбега» и выяснение отношений между членами экипажа в нецензурной форме. Для казанской [15] и пермской [16] катастроф скорее характерны конфликты с диспетчером управления воздушным движением (УВД) и общая растерянность, когда оба члена экипажа избегают брать на себя ответственность за управление самолетом, а вместо этого «в процессе выполнения разворота экипаж продолжал сетовать на диспетчера» [15, с. 232]. Аналогично и «указание диспетчера о следовании на привод вызвало крайне раздраженную реакцию внутри экипажа, особенно у КВС, что подтверждается инструментальным анализом речи (раздел 1.16.6, время 22:51:40)» [16, с. 128]. Обратив внимание экипажа на текущую высоту, диспетчер поинтересовался, осуществляют ли они снижение, чем вызвал «очень бурную реакцию КВС, который дважды эмоционально спросил: «Сколько снижаться? Сколько снижаться?». Данный вопрос, так же, как и отмечавшиеся уже выше постоянные мелкие ошибки (позывной, частоты, эшелоны), совершаемые КВС, показывают, что его психоэмоциональное состояние и восприятие полетной ситуации (situation awareness) были далеки от оптимальных» [16]. Растерянность и избегание ответственности хорошо видны из эпизода, когда «в 23:08:55, после того как величина левого крена достигла 30°, а скорость в очередной раз была меньше V_{ref} (расчетная скорость посадки – прим. авторов) второй пилот попросил командира взять управление («...возьми, а возьми, возьми...!»), очевидно понимая, что он сам не справляется с управлением самолетом. Однако и КВС к этому моменту также находился «не в образе полета» и не был готов взять управление: «Да, что «возьми», (нецензурное выражение), я ж тоже не могу!» [16, с. 147].

Все эти примеры конфликтов в полете, а это лишь крайне малая их часть, показывают, что для повышения надежности ППО авиационных специалистов, особенно пилотов, представляется важным и актуальным исследование склонности абитуриентов авиационных

учебных заведений к конфликтному поведению, а также стратегий поведения, применяемых при этом, если конфликт все же возник. Рассмотрим данную проблему подробнее.

Поведение в конфликте

«Под конфликтом понимается наиболее острый способ разрешения значимых противоречий, возникающих в процессе взаимодействия, заключающийся в противодействии субъектов конфликта и обычно сопровождающийся негативными эмоциями» [17]. Необходимыми и достаточными условиями возникновения конфликта являются наличие у субъектов социального взаимодействия противоположно направленных мотивов или суждений. А также состояние противоборства между ними [17]. Чаще всего в полете мы имеем дело с так называемыми межличностными конфликтами. «Под межличностным конфликтом понимают открытое столкновение взаимодействующих субъектов на основе возникших противоречий, выступающих в виде противоположных целей, не совместимых в какой-то конкретной ситуации. Межличностный конфликт проявляется во взаимодействии между двумя и более лицами. В межличностных конфликтах субъекты противостоят друг другу и выясняют свои отношения непосредственно, лицом к лицу. Это один из самых распространенных типов конфликтов» [18]. Иначе говоря, «межличностный конфликт – противостояние участников, воспринимаемое и переживаемое ими (или, по крайней мере, одним из них) как значимая психологическая проблема, требующая своего разрешения и вызывающая активность сторон, направленную на преодоление возникшего противоречия и разрешение ситуации в интересах одной или обеих сторон» [19].

«Стратегия (или же стиль – *прим. авторов*) поведения в конфликте – ориентация человека по отношению к конфликту, установка на определенные формы поведения в ситуации конфликта» [20].

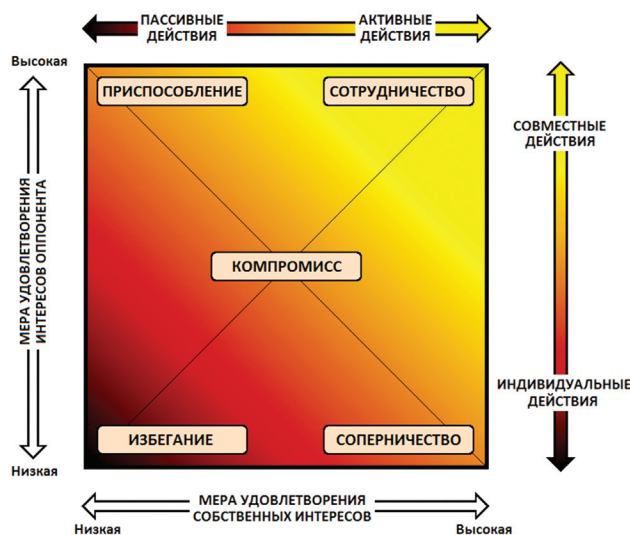


Рисунок 1 – Сетка Томаса-Килменна

«В начале 1970-х гг. Ральф Г. Килманн и Кеннет У. Томас на основе теоретических представлений Роберта Блейка и Джейн Мутон предложили методику измерения выраженности пяти основных типов стиля поведения в межличностном конфликте: соперничество, сотрудничество, компромисс, избегание и приспособление. Методика получила наименование «Management-of-Differences Exercise» или MODE [21]. Внешнее сходство аббревиатуры с термином «mode» привело в дальнейшем к тому, что сами авторы методики начали называть ее «Thomas – Kilmann Conflict Mode Instrument (TKI)», придав объекту смысл инструмента управления конфликтом. В процессе использования методики стало понятно, что она является мощным инструментом тренинга управления межличностными конфликтами» [22]. (В отечественной психологической литературе русскоязычная версия данного теста – TKI-R чаще известна как «Тест К. Томаса в адаптации Н.В. Гришиной» [23]. Он и использовался авторами в настоящем исследовании). Обычно для интерпретации теста TKI используют, так называемую сетку Томаса-Килменна [24, 25] (см. рис. 1).

Склонность к агрессии

Проблеме конфликта и факторов, влияющих на его возникновение и развитие, посвящено большое количество научных работ. Логично предположить, что конфликтность и агрессивность должны быть связаны положительной корреляцией. Так, авторы [26] отмечают, что «исходя из полученных данных можно заключить, что лица, выбирающие неэффективную стратегию поведения в конфликтных ситуациях, отличаются более высоким уровнем агрессивности, что может быть связано с конфликтами и спорами, которые обеспечивают им удовлетворение собственных интересов в конфликтных ситуациях». К сожалению, авторы [26], используя TKI-R для оценки стиля поведения, затруднили дальнейший анализ своих результатов тем, что начали оперировать нестандартными терминами. В частности, они пишут, что «оценивая степень реализации своих интересов оппонентами и качество разрешения конфликта с использованием определенной стратегии в конфликтном взаимодействии, целесообразно говорить об эффективности стратегии поведения в конфликте. Эффективность оценивается по двум критериям: удовлетворенность и продуктивность. На основании этих критериев были определены в качестве эффективных стратегий поведения (ЭСП) в конфликте сотрудничество и компромисс, поскольку в случае их использования интересы противоположных сторон удовлетворяются в большей степени; в качестве неэффективных (НЭСП) – соперничество и приспособление, поскольку в случае их использования удовлетворяются интересы одной стороны; избегание выступает нейтральной стратегией поведения (НСП), поскольку в этом случае не удовлетворяются интересы обеих сторон» [26]. (С точки зрения авторов, более чем странная классификация. По нашему мнению, если

проранжировать стратегии от лучшей к худшей, то ряд будет выглядеть так: сотрудничество, компромисс, приспособление, соперничество, избегание. Вариант «ни мне – ни тебе», когда конфликт просто не решается никак, по мнению авторов, является наименее эффективной стратегией из всех возможных).

В работе [26] было проведено сравнение результатов теста А. Басса – А. Дарки [23] (измеряющего A_{Φ} – физическую агрессию, A_K – косвенную агрессию, A_p – раздражительность, A_H – негативизм, A_O – обидчивость, A_{II} – подозрительность, A_B – вербальную агрессию и A_A – аутоагрессию) для лиц с различными стратегиями поведения (табл. 1). «Адекватными диагностическими показателями агрессивности являются физическая агрессия, а также эмоциональные переживания, характерные для агрессии: раздражение, негативизм, обида, подозрительность, враждебность и чувство вины. Анализ результатов исследования уровня агрессии у студентов показал относительно высокий уровень подозрительности на достоверно значимом уровне у группы с НСП с группами НЭСП и ЭСП (см. табл. 1). Это, вероятно, объясняется тем, что люди, предпочитающие избегать конфликтных ситуаций, тревожны, боязливы, замкнуты. Таким людям проще не допускать конфликта, стремиться быть нейтральным по отношению к источнику конфликта. Студенты с НЭСП отличаются более высокими показателями раздражения и негативизма, для них характерны порывистость, эмоциональность, инициативность, и поэтому им важна лишь своя точка зрения, они просто не принимают чужое мнение, не допускают компромиссов, договоров» [26].

Таблица 1 – Средние значения показателей агрессивности и враждебности обучающихся по тесту А. Басса – А. Дарки, баллы [26]

Показатели	НЭСП	НСП	ЭСП
A_{Φ}	4,4±0,5	4,0±0,7	4,4±0,4
A_K	4,3±0,4	4,4±0,7	4,1±0,3
A_p	5,3±0,4	4,5±0,8	4,5±0,5
A_H	2,2±0,3	1,9±0,3	1,9±0,3
A_{II}	3,2±0,3	3,1±0,7	3,4±0,4
A_{II}	5,7±0,3*	6,6±0,5**	5,7±0,3+
A_B	6,4±0,4	6,6±0,5	6,0±0,8
A_A	6,3±0,4	6,5±0,5	5,9±0,3

Примечания: данные приведены как средние арифметические (M) и их ошибки (m),

* – достоверные различия между группами НЭСП и НСП,

+ – достоверные различия между группами НСП и ЭСП.

Если учесть, что по [26] в группу с НЭСП входят и лица со стилем поведения «приспособление», последняя сентенция звучит весьма странно. Кроме того, лица со стратегией «избегание», конечно, стараются избежать и самого конфликта, но, в первую очередь, они избегают его разрешения.

Другой пример. Как пишет автор [27]: «по данным исследований студенты-спортсмены, оказавшись в конфликтной ситуации, применяют такие стратегии поведения, как сотрудничество, компромисс и соперничество. Менее всего им свойственны 2 стиля поведения – избегание и приспособление. При более детальном анализе стилей поведения студентов, относящихся к разным группам, установлены существенные отличия (табл. 2)» [27].

Таблица 2 – Показатели стилей поведения студентов-спортсменов в конфликтной ситуации в баллах [27] по тесту TKI-R

Стиль поведения	Уровень конфликтности личности		
	Высокий	Средний	Низкий
Соперничество	7,9±0,3	5,1±0,2*	1,8±0,2*
Сотрудничество	4,3±0,3	7,8±0,2*	7,3±0,5*
Компромисс	5,1±0,3	6,5±0,3*	5,2±0,4
Избегание	2,5±0,2	2,9±0,1	3,2±0,2
Приспособление	3,9±0,3	4,1±0,2	4,4±0,4

Примечание: * – $p < 0,05$ – различия достоверны относительно показателей студентов с высоким уровнем конфликтности

Анализ результатов

Сравним приведенные данные с результатами собственных экспериментов. В работе [6] мы рассматривали группу из 48 студентов будущих диспетчеров УВД, но в несколько иных аспектах. Если сравнить выборку из [6] с выборкой из [26] (рис. 2), то очевидно, что в выборке студентов Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУ ГА) значительно больше лиц с ЭСП (по классификации из [26]).

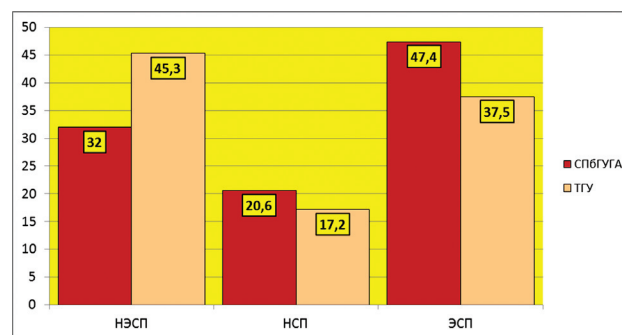


Рисунок 2 – Сравнение эффективности стратегий поведения в конфликте, выявленных у студентов СПбГУ ГА и Тульского государственного университета (ТГУ)

В табл. 3 представлены корреляции между результатами теста К. Томаса и теста А. Басса – А. Дарки на выборке 48 студентов-диспетчеров УВД. Как можно видеть, значимых корреляций между результатами этих тестовых методик достаточно мало. То, что результаты теста А. Басса – А. Дарки отрицательно коррелируют

Таблица 3 – Корреляции между результатами теста К. Томаса и теста А. Басса – А. Дарки на выборке 48 студентов-диспетчеров УВД

	Соперничество	Сотрудничество	Компромисс	Избегание	Приспособление
A _Ф	+0,1720	+0,1059	-0,1865	+0,1726	-0,2830
A _К	+0,2157	+0,1294	-0,1510	-0,0779	-0,1684
A _Р	+0,0394	+0,2151	+0,2092	+0,0590	-0,3859*
A _Н	+0,1374	+0,2227	-0,2594	-0,0039	-0,1094
A _О	-0,1533	+0,1010	+0,1390	+0,1353	-0,0889
A _П	+0,2387	-0,0729	+0,1059	+0,0605	-0,3809*
A _В	+0,6146***	+0,1142	-0,2074	-0,0990	-0,5933***
A _А	-0,1612	+0,1134	-0,0431	+0,3318*	-0,1152

Примечание: Значимость корреляции (* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$)

Таблица 4 – Интеркорреляции между результатами TKI-R на выборке 48 студентов-диспетчеров УВД

	Соперничество	Сотрудничество	Компромисс	Избегание	Приспособление
Соперничество		-0,1626	-0,3803	-0,4262	-0,4985
Сотрудничество	$p \geq 0,05$		-0,2866	-0,2066	-0,0230
Компромисс	$p < 0,05$	$p \geq 0,05$		+0,1121	-0,1944
Избегание	$p < 0,01$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$		-0,2668
Приспособление	$p < 0,001$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	

Примечание: Справа и вверху значения коэффициента корреляции Пирсона между данными показателями эффективности, а слева и внизу характеристики значимости корреляции

со склонностью к стратегии приспособления – это вполне понятно, равно как и то, что они почти все (исключая A_А и A_О) положительно коррелируют со склонностью к стратегии соперничества. Но вот то, что они также положительно коррелируют со склонностью к стратегии сотрудничества – это уже понятно не очень. Наиболее сильная (+0,6146) и очень высоко значимая ($p < 0,001$) корреляция имеет место между склонностями к вербальной агрессии и к стратегии соперничества. Таким образом, часть лиц с НЭСП (по терминологии из [26]) – те, кто склонен к стратегии соперничества – склонны к агрессии, а часть – те, кто склонен к стратегии приспособления – к агрессии не склонны. Что еще раз показывает нецелесообразность подобной классификации эффективности стратегий поведения в конфликте.

Интеркорреляции между показателями TKI-R, полученными на той же выборке, приведены в табл. 4. Значимые интеркорреляции имеются только между склонностью к соперничеству и склонностями к компромиссу, избеганию и приспособлению. Интеркорреляции, как и следовало ожидать, отрицательные, но по силе не достигающие даже средней. Это говорит о том, что четкого преобладания какого-либо стиля не наблюдается.

Аналогичный вывод об отсутствии выраженных предпочтений в выборе той или иной стратегии следует и из соответствующей диаграммы на рис. 3. Не наблюдая явной склонности или же отсутствия таковой к какому-либо стилю, можно отметить, что всего более студенты

СПбГУ ГА из представленной выборки склонны к сотрудничеству и компромиссу.

По данным автора работы [27] «студенты-спортсмены, оказавшись в конфликтной ситуации, применяют такие стратегии поведения, как сотрудничество, компромисс и соперничество. Менее всего им свойственны 2 стиля поведения – избегание и приспособление».

У предпринимателей, согласно [28], в женской выборке в большей степени отражается тактика избегания и соперничества, а в мужской – соперничества.

Интересны наблюдения авторов работы [20], проводивших исследования на выборке 129 студентов Ярославского государственного медицинского университета и отмечающих, что у студентов 1-го курса лечебного факультета примерно в одинаковой степени выражены стратегии компромисса (23,7%, средний балл 7,10) и избегания (23,6%, средний балл 7,07), а наименее выраженной является стратегия соперничества (15,4%, средний балл 4,62) – «следовательно, для этой группы важной является ориентация на поиск взаимоприемлемого решения проблемы путем взаимных уступок, часто как временного и промежуточного. Эти респонденты предпочитают получить хоть что-то, чем все потерять. При этом эти студенты в такой же степени склонны отказаться от своих интересов, но и не готовы пойти навстречу партнеру. Эти респонденты в меньшей степени ориентированы на одновременную реализацию как своих интересов, так и интересов партнера, не имеют способностей изложить суть своих интересов и вы-

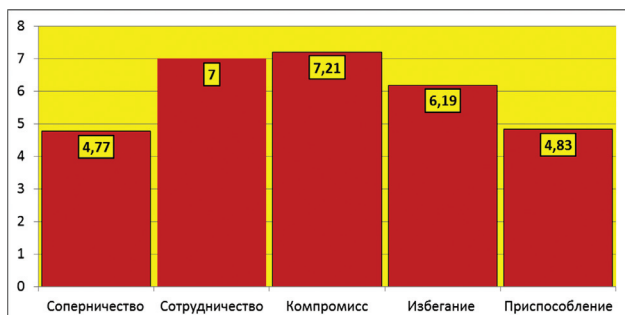


Рисунок 3 – Показатели средних значений стилей поведения студентов-диспетчеров УВД в конфликтной ситуации по TKI-R в баллах (на выборке 48 чел. из [6])

слушать другую сторону» [20]; у студентов 1-го курса педиатрического и стоматологического факультетов доминирующей стратегией поведения в конфликте также является стратегия компромисса (соответственно 24,4%, средний балл 7,33 и 25,3%, средний балл 7,60), а наименее выраженной – стратегия соперничества (соответственно 16,7%, средний балл 5,00 и 14,37%, средний балл 4,31) – «следовательно, студентам первого курса всех факультетов свойственно полное нежелание вступать в конфронтацию или отдавать приоритет собственным интересам. Стратегия компромисса, несмотря на то, что считается одной из самых эффективных, во взаимодействии «врач – пациент» не будет плодотворна, так как подразумевает поступление интересами обеих сторон, что недопустимо в процессе диагностики или лечения. А стратегия избегание с точки зрения будущей профессиональной медицинской деятельности является неэффективной вовсе. Однако студенты 1-го курса, очевидно, не имеют четкого представления о содержательно-социальной стороне будущей профессиональной деятельности, поэтому диагностированные доминирующие стратегии поведения в конфликте, по-видимому, пока что обусловлены в большей степени индивидуальными и стилевыми особенностями, нежели уровнем развития профессиональных качеств» [20].

Авторами настоящей статьи был проведен многозадачный эксперимент на большой выборке студентов СПбГУ ГА (пилоты – 232 чел., диспетчеры УВД – 141 чел., специалисты по аэронавигационному обеспечению полетов – 36 чел., рекламе и связям с общественностью – 19 чел., управлению персоналом – 53 чел.). Допол-

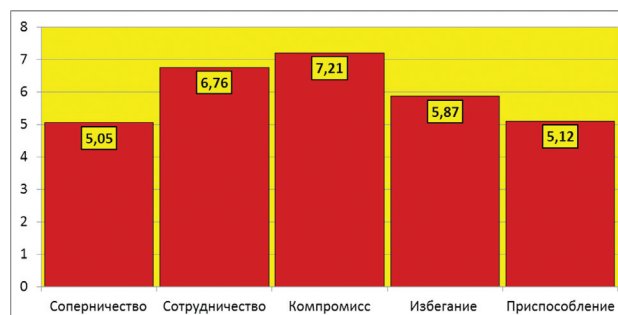


Рисунок 4 – Показатели средних значений стилей поведения студентов СПбГУ ГА и ИФИЯМ ИГУ в конфликтной ситуации по TKI-R в баллах (на выборке 603 чел.)

нительно, с целью исправить явный перекос в сторону студентов технических специальностей (хотя как раз они и представляли основной интерес проводимых исследований, поскольку и пилотов, и диспетчеров процедура ППО касается непосредственно) и проведения более объективного анализа, при активном сотрудничестве психолога В.С. Каменской (г. Иркутск) были получены результаты обследования 122 студентов-гуманитариев Института филологии, иностранных языков и медиакоммуникации Иркутского государственного университета (ИФИЯМ ИГУ) направлений обучения «Перевод и переводоведение», «Зарубежное регионоведение». Таким образом, общая выборка участников эксперимента составила 603 человека. На рис. 4 представлено распределение средних значений показателей выраженности стилей поведения в конфликтной ситуации для всей указанной выборки (студенты СПбГУ ГА и студенты ИФИЯМ ИГУ). Из сравнения рис. 3 и рис. 4 вполне очевидно, что они практически идентичны.

Если сравнивать этих 603 участников по отдельным выборкам, то отличия, конечно есть. Между мужчинами (344 чел.) и женщинами (259 чел.) по критерию достоверности различий χ^2 -Пирсона имеются высоко достоверные ($p \leq 0,01$) различия в выраженности таких стилей поведения, как соперничество, компромисс и избегание. Женщины существенно менее склонны к соперничеству и несколько более склонны к избеганию и компромиссу, нежели мужчины. Это в определенной мере согласуется с данными, приведенными в работе [20], где зафиксировано достоверно значимое различие между степенью сформированности стратегии сопер-

Таблица 5 – Интеркорреляции между результатами TKI-R на выборке 603 студентов СПбГУ ГА и ИФИЯМ ИГУ различных специальностей

	Соперничество	Сотрудничество	Компромисс	Избегание	Приспособление
Соперничество		-0,3188	-0,3783	-0,3924	-0,4847
Сотрудничество	$p < 0,001$		-0,1297	-0,1771	-0,0645
Компромисс	$p < 0,001$	$p < 0,01$		-0,0211	-0,1972
Избегание	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p \geq 0,05$		-0,1482
Приспособление	$p < 0,001$	$p \geq 0,05$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	

Примечание: Справа и вверху значения коэффициента корреляции Пирсона между данными показателями эффективности, а слева и внизу характеристики значимости корреляции

ничества у респондентов женского и мужского пола (критерий Манна-Уитни $U = 1003,5$ при $p = 0,036$): более высокий уровень отмечается у студентов мужского пола, чем у испытуемых женского пола.

Между пилотами (232 чел.) и гуманитариями (194 чел.) по критерию достоверности различий χ^2 -Пирсона также имеются высоко достоверные различия в выраженности таких стилей поведения, как соперничество и избегание. Высоко достоверные различия в выраженности соперничества имеют место и между гуманитариями и диспетчерами УВД (141 чел.).

В табл. 5 представлены интеркорреляции между результатами ТКІ-R на выборке 603 студентов различных специальностей (СПбГУ ГА и ИФИЯМ ИГУ). Каких-либо принципиальных отличий между данными, представленными в табл. 4 и табл. 5, не наблюдается.

Заключение

Таким образом, обобщая результаты, полученные авторами настоящей статьи, и результаты, полученные авторами работ [20, 26-29], можно согласиться с выводами автора [29] в том, что «для конфликтного поведения всех групп испытуемых преобладающей является средняя выраженность стратегий соперничества, сотрудничества, компромисса, избегания и приспособления, что свидетельствует о способности испытуемых данного возраста к гибкому поведению в конфликтных ситуациях с учетом конкретных условий взаимодействия». То есть, студенты, в отличие от активно нацеленных на успех предпринимателей [28], хотя и предпочитают такие стили поведения в конфликте, как сотрудничество и компромисс, но гибко используют и другие стратегии поведения. Это необходимо учитывать при планировании мероприятий по повышению надежности профессионального психологического отбора в гражданской авиации. Представляется, что в силу указанных причин использование методики ТКІ-R при профессиональном психологическом отборе авиационных специалистов является нецелесообразным.

Библиографический список

1. Маклаков А.Г. Профессиональный психологический отбор персонала. Теория и практика [Текст]: учеб. для вузов / А.Г. Маклаков. – СПб.: Питер, 2008. – 480 с.
2. Руководство по психологическому обеспечению отбора, подготовки и профессиональной деятельности летного и диспетчерского состава гражданской авиации Российской Федерации [Текст]: утв. Министерством транспорта РФ. – М.: Воздушный транспорт, 2001. – 279 с.
3. Малишевский А.В. Возможные пути решения проблемы снижения негативного влияния человеческого фактора на безопасность полетов [Текст] / А.В. Малишевский, О.В. Ариничева, Е.В. Власов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 2. – С. 12-20. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25471562>
4. Малишевский А.В. Возможные пути решения проблемы снижения негативного влияния человеческого фактора в чрезвычайных ситуациях на транспорте [Текст] / А.В. Малишевский, Е.В. Власов, Е.М. Каймакова // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2015. – № 1. – С. 108-114. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23735424>
5. Ариничева О.В. Недостатки существующего профессионального отбора пилотов и проблема его совершенствования [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 6. – С. 41-51. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26254884>
6. Ариничева О.В. Возможные пути повышения надежности профессионального психологического отбора диспетчеров управления воздушным движением [Текст] / О.В. Ариничева, А.Е. Герасименкова, А.В. Малишевский, М.Г. Чепик // Надежность. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 38-45. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-38-45
7. Ариничева О.В. Проблема повышения качества профессионального психологического отбора в гражданской авиации [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский // Качество и жизнь. – 2018. – № 2. – С. 67-71. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35304038>
8. Ариничева О.В. Ответственность в системе ценностей авиационных специалистов [Текст] / О.В. Ариничева, А.В. Малишевский, И.А. Акимов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2018. – № 6. – С. 20-25. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35093752>
9. Малишевский А.В. Некоторые вопросы совершенствования соционической психодиагностики авиационного персонала [Текст] / А.В. Малишевский // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. – № 2. – С. 23-30. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28422669>
10. Джафарзаде Т.Р. Проблема совершенствования профессионального психологического отбора пилотов гражданской авиации [Текст] / Т.Р. Джафарзаде, А.В. Малишевский // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2013. – № 3. – С. 66-70. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21034457>
11. Катастрофа Ан-148 в Подмоскowie [Электронный ресурс] / Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=95115464> (дата обращения: 08.10.2018).
12. Катастрофа Ту-134А Ивановского авиапредприятия в районе а/п Иваново [Электронный ресурс] / Авиационные происшествия, инциденты и авиакатастрофы в СССР и России: факты, история, статистика. 2006-2018. – URL: <http://www.airdisaster.ru/database.php?id=90> (дата обращения 08.10.2018).
13. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия / Ту-134 RA-65691 20.06.2011 [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 19.09.2011. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/bb2/report_ra-65691.pdf (дата обращения 08.10.2018).

14. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия / Як-42 RA-42434 07.09.2011 [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 02.11.2012. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/b75/report_ra-42434.pdf (дата обращения 08.10.2018).
15. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия / Боинг 737-500 VQ-BBN 17.11.2013 [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 23.12.2015. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/481/report_vq-bbn.pdf (дата обращения 08.10.2018).
16. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия / Боинг-737-500 VP-BKO 14.09.2008 [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 29.05.2009. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/c2d/vp-bko_report.pdf (дата обращения 08.10.2018).
17. Анцупов А.Я. Конфликтология [Текст]: учеб. для вузов: 5-е изд. / А.Я. Анцупов, А.И. Шипилов. – СПб.: Питер, 2013. – 512 с.
18. Шевчук Д.А. Конфликты: избегать или форсировать. Все о конфликтных ситуациях на работе, в бизнесе и личной жизни [Текст] / Д.А. Шевчук. – М.: ГроссМедиа, 2009. – 440 с.
19. Гришина Н.В. Психология конфликта [Текст]: 2-е изд., перераб. и доп. / Н.В. Гришина. – СПб.: Питер, 2008. – 544 с.
20. Васильева Л.Н. Исследование стратегий поведения в межличностном конфликте у студентов-медиков на начальном этапе обучения в вузе [Текст] / Л.Н. Васильева, С.С. Щепеткова // Историческая и социально-образовательная мысль. – 2016. – Т. 8. – № 4/2. – С. 111-114. DOI: 10.17748/2075-9908-2016-8-4/2-111-114
21. Kilmann R.H. Developing a Forced-Choice Measure of Conflict-Handling Behavior: The MODE Instrument [Text] / R.H. Kilmann, K.W. Thomas // Educational and Psychological Measurement. – 1977. – Vol. 37. – № 2. – Pp. 309-325. DOI: 10.1177/001316447703700204
22. Кардашина С.В. Психометрические характеристики русскоязычной версии опросника К. Томаса – Р. Килманна («Thomas-Kilmann Conflict Mode Instrument – TKI-R») / С.В. Кардашина, Н.В. Шаньгина // Педагогическое образование в России. – 2016. – № 11. – С. 216-228. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28828302>
23. Карелин А.А. Большая энциклопедия психологических тестов [Текст] / А.А. Карелин. – М.: Эксмо, 2007. – 416 с.
24. Thomas K.W. Thomas-Kilmann conflict mode instrument [Text] / R.H. Kilmann, K.W. Thomas. – Tuxedo, NY: Xicom Publ., 1974. – 11 p. DOI: 10.1037/t02326-000
25. Thomas-Kilmann Conflict Mode Instrument. Profile and Interpretive Report [Электронный ресурс] / Take The TKI. – URL: https://takethetki.com/wp-content/uploads/2017/11/TKI_Sample_Report.pdf (дата обращения 08.10.2018).
26. Куулар Ш.В. Психофизиологические особенности студентов с разным типом стратегии поведения в конфликтных ситуациях [Текст] / Ш.В. Куулар, Л.К. Будук-оол // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2017. – Т. 7. – № 5. – С. 67-80. DOI: 10.15293/2226-3365.1705.05
27. Павленкович С.С. Стратегии поведения студентов-спортсменов с разными личностными особенностями в конфликтных ситуациях [Текст] / С.С. Павленкович // Конфликты в современном мире: международное, государственное и межличностное измерение: материалы V Международной научной конференции (Саратов, 08 апреля 2016 г.) / Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского. – М.: Перо, 2016. – С. 644-648. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26478762>
28. Аристова Ю.В. Особенности стратегий поведения предпринимателей в конфликте в связи с полом [Текст] / Ю.В. Аристова, И.Ф. Фрейманис, Е.С. Игнатова // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 7. – № 11. – С. 22-25. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27451516>
29. Гринина Е.С. Особенности поведения в межличностных конфликтах старшеклассников с различным уровнем развития интеллекта [Текст] / Е.С. Гринина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 12. Психология. Социология. Педагогика. – 2014. – Вып. 2. – С. 58-66. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21653261>

Сведения об авторах

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

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

Поступила 02.11.2018

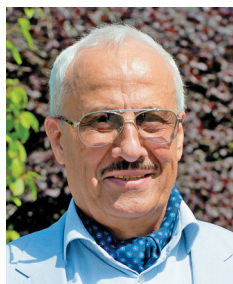
Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков

Ольга Б. Проневич, АО «НИИАС», Москва, Россия, e-mail: o.pronevich@vniias.ru

Игорь Б. Шубинский, АО «НИИАС», Москва, Россия, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru



Ольга Б. Проневич



Игорь Б. Шубинский

Резюме. Цель. Развитие железных дорог России сопровождается увеличением количества эксплуатируемых зданий, подвижного состава, усложнением технологических процессов содержания инфраструктуры и обслуживания клиентов. В этих условиях ОАО «РЖД» необходимо управлять пожарной безопасностью более чем десяти тысяч единиц тягового подвижного состава и сотен зданий, пожары на которых могут привести к причинению вреда пассажирам или остановке движения. Управление пожарной безопасностью как стационарных, так и передвижных объектов железнодорожного транспорта (ЖДТ) осуществляется на всех стадиях жизненного цикла – от стадии проектирования до утилизации объектов. С целью реализации технологических процессов диагностирования и прогнозирования пожарной безопасности должна быть разработана человеко-машинная система, ядром которой должна являться автоматизированная система управления (АСУ) пожарными рисками, позволяющая на основании результатов прогноза пожарного риска принимать решение о необходимости ремонта, замены или технического обслуживания объектов ЖДТ и системы обеспечения пожарной безопасности. **Методы.** Использованы методы теории автоматического управления, экспертных оценок. В исследовании решалась задача разработки алгоритма автоматизированного аудита пожарной безопасности объектов ЖДТ. **Результаты.** Определено, что большинство систем управления пожарной безопасностью для обнаружения признаков опасности до возникновения горения используют датчики уровня концентрации газа. Такой подход малоэффективен для решения задач обеспечения пожарной безопасности на ЖДТ. Для объектов ЖДТ, фактическое состояние которых влияет на вероятность возникновения пожара, разработан алгоритм пожарного аудита, основанный на существующей системе технического обслуживания и ремонта, а также статистических данных о состояниях объектов ЖДТ, предшествующих пожару. Для проведения системных мероприятий по управлению рисками большого количества объектов ЖДТ предложена структура автоматизированной системы управления пожарными рисками, содержащая центр управления пожарной безопасностью и мобильный программно-аппаратный комплекс для аудита пожарной безопасности. **Выводы.** Показана важность разработки проактивной системы управления пожарной безопасностью на основе оценки пожарных рисков. Определено, что источниками информации о состояниях, предшествующих горению объектов ЖДТ могут быть как существующие автоматизированные системы учета отказов, оценки рисков, так и результаты диагностики фактического состояния объектов в рамках планово-предупредительных ремонтов. Для системного управления пожарными рисками множества объектов ЖДТ предложен способ автоматизированной оценки пожарного риска.

Ключевые слова: пожарный риск, алгоритм автоматизированного аудита, проактивная система управления пожарной безопасностью, автоматизированная оценка пожарного риска

Формат цитирования: Проневич О.Б., Шубинский И.Б., Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков// Надежность. 2019. Т. 19, №1, С. 48-54. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-48-54

Введение

Первые пожарные датчики были разработаны в XIX веке и основывались на определении температуры, то есть, по существующей классификации являлись тепловыми пожарными извещателями [1]. Именно с датчиков начинается большинство автоматизированных систем контроля и регулирования (управления). С развитием информационных технологий обеспечение безопасности становится все более простой задачей, но в то же время требующей применения сложных алгоритмов. В сфере обеспечения пожарной безопасности на данный момент можно отметить наличие автоматизированных систем управления пожарной безопасностью, а также применение интеллектуальных и роботизированных систем при оповещении, тушении пожара. При проектировании зданий с систем автоматического тушения пожаров используется компьютерное моделирование процессов эвакуации из зданий. Автоматизация и информатизация видна на каждом из этапов обеспечения противопожарной безопасности как в системах предотвращения пожара, так и в системах противопожарной защиты. В основе этой автоматизации лежат технологии, позволяющие собирать статистическую информацию о случаях пожара, анализировать, расследовать и предлагать решения, для предотвращения повторных инцидентов.

Для обеспечения пожарной безопасности крупных объектов различные программно-аппаратные комплексы объединяются в единую автоматизированную систему управления пожарной безопасностью. Исследованию архитектуры программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, посвящена работа [2]. Событийная система обладает рядом преимуществ, ценных для задач обеспечения пожарной безопасности: в систему легко может быть добавлен новый компонент, компоненты могут реагировать на любые события. Однако для архитектуры такого типа нет гарантий реакции на события, следовательно, подтверждение реакции на событие должно производиться явно. А для этого необходим интерфейс взаимодействия с внешними системами, человеком или автоматизированная система поддержки принятия решений.

В настоящей работе исследуется задача построения функциональной структуры автоматизированной си-

стемы управления пожарной безопасностью объектов железнодорожного транспорта (ЖДТ) на основе оценки пожарных рисков, позволяющей прогнозировать вероятность появления пожара на основе информации о результатах диагностики состояния объектов ЖДТ.

1. Проблема автоматизированного диагностирования неисправностей объектов, влияющих на пожарную безопасность

В соответствии с требованиями свода правил [3] для обнаружения места загорания в качестве идентифицирующего устройства могут использоваться телевизионные камеры и матричные световые датчики с адресным указанием очага пожара, адресные автоматические пожарные извещатели, сигнализаторы потока жидкости или спринклерные оросители с контролем пуска. На эффективность всех последующих после обнаружения загорания действий влияет скорость обработки извещателем сигналов, поступающих из окружающей среды. Для этих целей разрабатываются различные алгоритмы обработки контролируемых параметров окружающей среды [4]. Другим важным фактором является надежность программного обеспечения. Вопросами надежности автоматизированных систем управления, в т.ч. пожарной безопасности, занимались многие исследователи [5, 6, 7, 8]. В работе [9] исследована задача защиты программного обеспечения от сбоев аппаратуры, что особенно актуально для систем, основанных на датчиках. Высокая скорость работы датчиков и надежность элементов автоматизированных систем являются необходимыми, но не достаточными условиями для эффективного управления пожарной безопасностью сложных технических объектов. Современные системы должны позволять не только эффективно тушить обнаруженный пожар, но и предотвращать появление горения. Для этого в схему работы пожарной сигнализации (ПС) и системы оповещения и управления эвакуацией людей (СОУЭ), представленных в работе [10] должен быть добавлен контур раннего обнаружения пожароопасных состояний до возникновения горения (рис. 1).

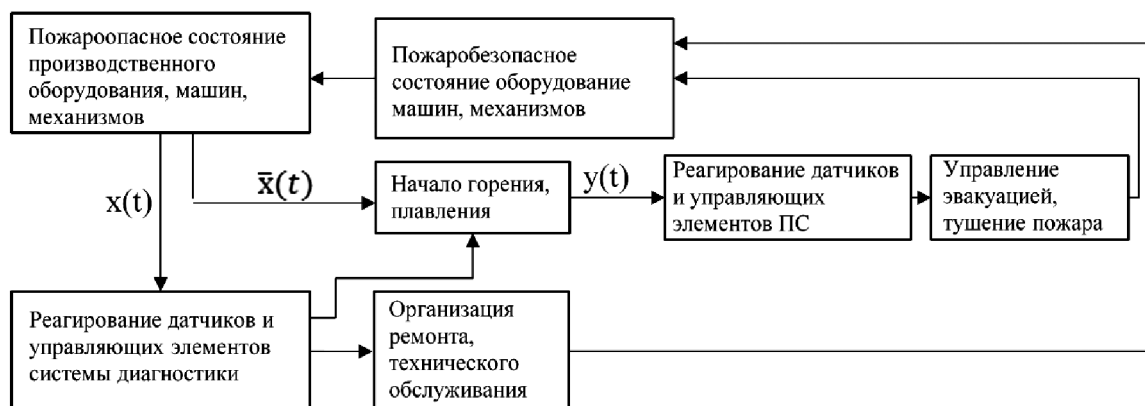


Рисунок 1 – Схема работы ПС и СОУЭ с контуром обнаружения пожароопасных состояний до появления горения

На рис. 1 обозначено:

$x(t)$ – параметры объекта оценки (оборудования / машины / механизма), свидетельствующие о наличии пожароопасного состояния объекта, которые могут быть выявлены с помощью средств диагностики, в т.ч. визуального осмотра объекта человеком;

$\bar{x}(t)$ – параметры объекта оценки (оборудования / машины / механизма), свидетельствующие о наличии пожароопасного состояния объекта, которые не могут быть выявлены с помощью средств диагностики, в т.ч. визуального осмотра объекта человеком;

$y(t)$ – параметры окружающей среды, регистрируемые пожарной сигнализацией.

Большинство автоматизированных систем управления пожарной безопасностью содержат только датчики, реагирующие на параметры $y(t)$. Но в настоящее время, ввиду увеличения стоимости оборудования, появления необходимости круглосуточной работы, необходимы системы, способные обнаружить признаки пожароопасного состояния до возникновения горения. Такая система позволит избежать аварийной остановки производственного процесса, а также существенно сократить затраты, в т.ч. из-за предотвращения потерь бизнеса. Особенно актуален вопрос предотвращения потерь бизнеса из-за аварийной остановки производственного процесса для ЖДТ. Для построения проактивной системы управления пожарной безопасностью необходима разработка методов и инструментов диагностики параметров, свидетельствующих о наличии пожароопасного состояния объекта. На основании оценки пожарных рисков выявленных состояний должно приниматься решение об изменении состояния контролируемого объекта до возникновения горения. В таблице 1 приведен анализ технических средств, применяемых для прогнозирования пожарной опасности объектов до возникновения горения.

В настоящее время проактивные системы управления пожарной безопасностью применяются, преимущественно в нефтегазовой отрасли и основным параметром $x(t)$, который могут наблюдать, является концентрация газа. Автоматизированные системы, основанные на газосигнализаторах, также применяются в замкнутых системах: на подводных лодках, складах. Однако такие инструменты диагностики не применимы на многих других производственных объектах. Ввиду этого возникает

необходимость разработки автоматизированных систем мониторинга неисправностей влияющих на пожарную безопасность. Особенно актуальна эта задача в свете масштабной автоматизации производственных процессов и появления баз данных о фактическом состоянии объектов. Например, в ОАО «РЖД» функционируют автоматизированные системы учета отказов технических средств [15], системы управления надежностью и рисками [16]. Информацию из этих систем следует использовать для решения различных задач. Однако не всегда целесообразна полная автоматизация процессов диагностики. Важное значение имеет цена датчиков, сенсоров и т.п., наличие уже существующих систем осмотра объектов с участием человека. Последнее особенно важно для объектов, проходящих регулярные циклы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). К таким объектам на ЖДТ относятся: тяговый подвижной состав, оборудование постов электрической централизации, оборудование тяговых подстанций и т.п. На этих объектах уже существует налаженная система ТОиР. Результаты диагностики объектов в рамках ТОиР могут быть использованы и для целей обеспечения пожарной безопасности. Очевидно, что пожароопасных состояний объектов намного меньше, чем неисправных или предотказных состояний. Ввиду этого целесообразно говорить о пожарном аудите объектов, критерии которого должны быть связаны с состояниями, которые действительно могут привести к пожару.

2. Диагностирование неисправностей объектов железнодорожного транспорта, приводящих к повышению пожарной опасности

При аудите сложных технических систем эксперты сталкиваются с двумя проблемами: ограничения человеческой памяти на перечень возможных опасных состояний объектов ЖДТ (в т.ч. «заучивание» типовых наборов и игнорирование состояний вне опыта эксперта), а также временные затраты на согласование мнений участников аудита. Эти проблемы эффективно решаются использованием человеко-машинных систем,

Таблица 1 – Основные средства обнаружения признаков пожарной опасности до возникновения горения

Объект	Техническое средство	Контролируемое пожароопасное состояние
Объекты нефтеобработывающей промышленности [11]	Датчик контроля загазованности	Взрывоопасная концентрация газа
Спортивные сооружения [12]	Датчики концентрации горючих газов и паров аммиака	Взрывоопасная концентрация газа, предельно-допустимая концентрация
Трубопроводы [13]	Датчик давления	Повышенное давление
Торфяники [14]	Газовые торфяные стволы-термозонды	Температура, концентрация газов

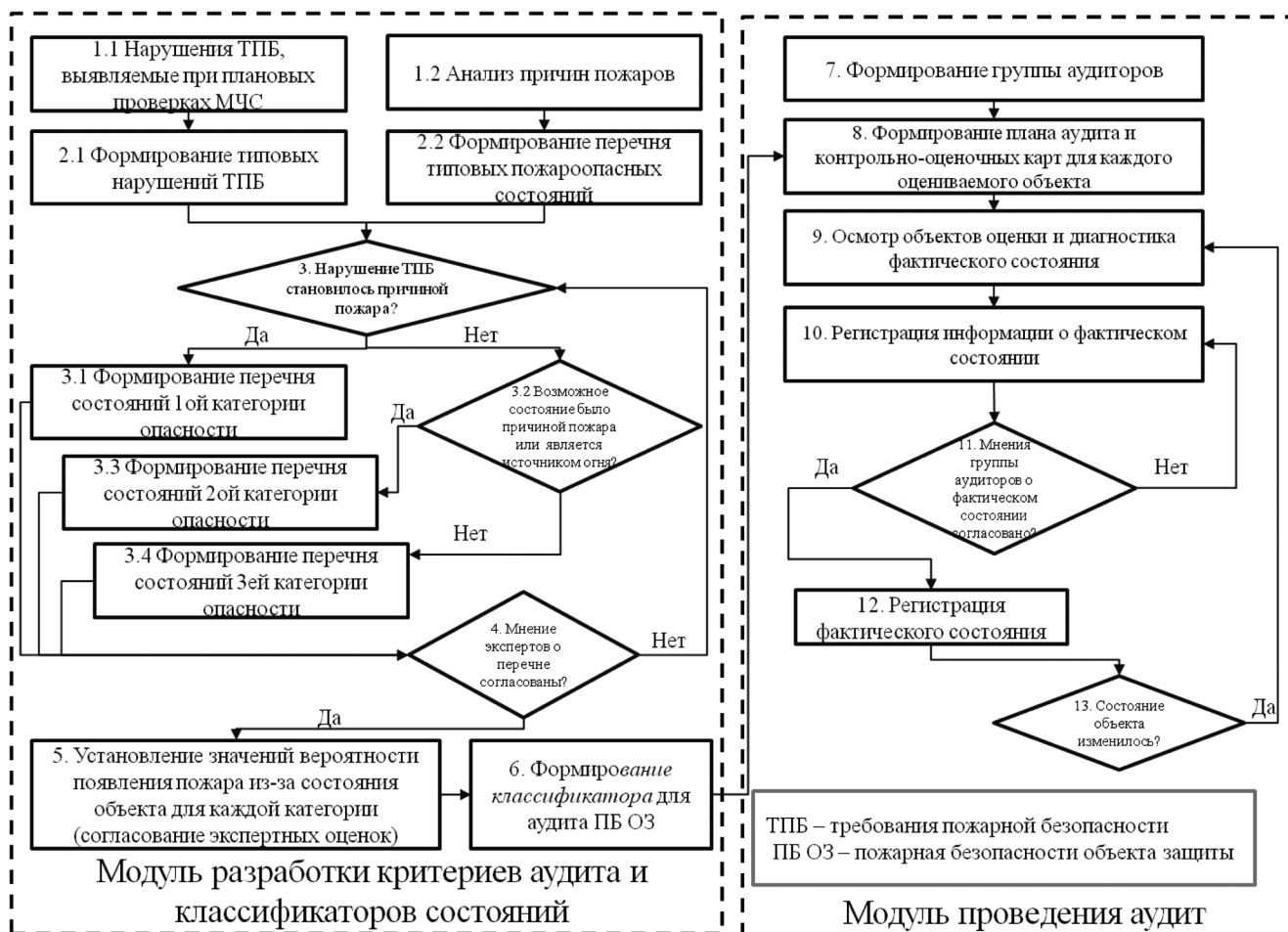


Рисунок 2 – Алгоритм диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению пожарной опасности объектов ЖДТ

позволяющих оперативно выводить эксперту перечень критериев аудита для конкретной технической системы, регистрировать фактически выявленные состояния, а также использовать инструменты диагностики.

Для проведения автоматизированного аудита необходимо два модуля: модуль разработки критериев аудита и классификаторов состояний объектов ЖДТ, модуль проведения аудита. Совместная работа этих модулей позволяет реализовать алгоритм диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению пожарной опасности объектов (рис. 2).

В рамках модуля разработки критериев аудита и классификаторов состояния должны быть реализованы следующие действия:

Анализ первоисточников о причинах пожара и результатов проверок МЧС: составление перечня нарушений требований пожарной безопасности, выявляемые при плановых проверках МЧС, составление перечня причин пожаров.

Формирование перечня типовых пожароопасных состояний: анализ статистики нарушений требований пожарной безопасности и формирование перечня типовых нарушений, анализ причин пожаров и формирование перечня типовых пожароопасных состояний.

Ранжирование типовых пожароопасных состояний:

- формирование перечня пожароопасных состояний 1 категории опасности (состояния, которые становились причинами пожара);
- формирование перечня пожароопасных состояний 2 категории опасности (состояния, которые приводили к появлению причины пожара или состояния объектов, которые по статистике были источниками огня);
- формирование перечня пожароопасных состояний 3 категории опасности (прочие состояния).

Согласование мнений экспертов о результатах ранжирования пожароопасных состояний.

Количественная оценка опасности состояний 1 категории:

- для целей оценки вероятности появления пожара с помощью графового метода строится граф и матрица переходных вероятностей;
- для оценки вероятности появления пожара на основе экспертного метода для каждого состояния оценивается вероятность появления пожароопасного событий.

Формирование классификатора пожароопасных состояний для аудита пожарной безопасности объекта ЖДТ. Классификатор содержит в себе перечень всех возможных состояний объекта ЖДТ (с учетом конфигу-

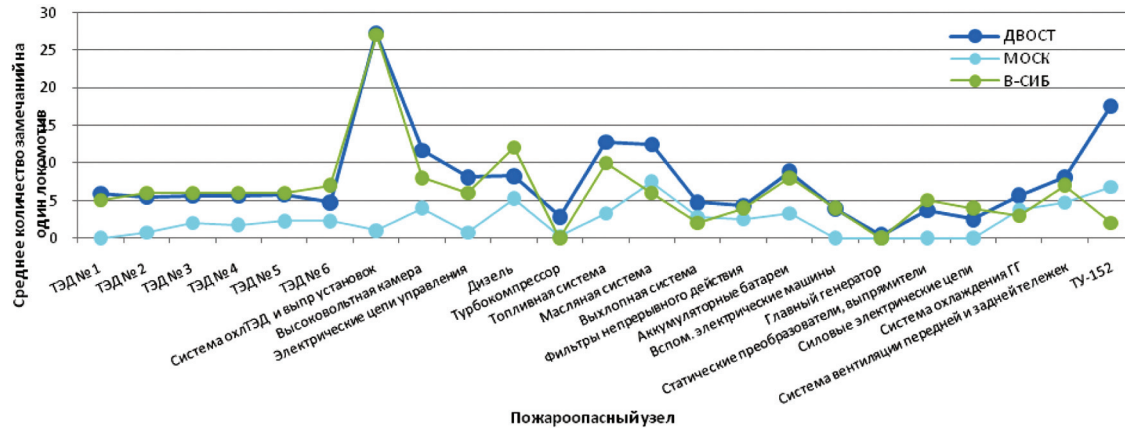


Рисунок 3 – Статистика выявления пожароопасных состояний на ТПС серии 3ТЭ10

рации объекта). В классификаторе при необходимости указываются инструменты, с помощью которых можно выявить пожароопасные состояния. На основе сформированных классификаторов функционирует модуль проведения аудита, в рамках которого осуществляется:

- формирование группы аудиторов, квалифицированные для выявления состояния пожарной опасности на объекте ЖДТ;
- формирование плана аудита и контрольно-оценочных карт (КОК) для каждого оцениваемого объекта. План аудита описывает последовательность осмотра объекта ЖДТ. КОК содержат в себя перечень пожароопасных

состояний, которые могут наблюдаться на оцениваемом объекте. При этом КОК содержит поля для отметки наличия фактического состояния.

Осмотр объекта, выбор инструментов диагностики, сбор данных о фактическом состоянии.

Регистрация информации о фактическом состоянии.

Согласование мнения аудиторов о перечне выявленных пожароопасных состояний

Регистрация фактического состояния объекта.

Актуализация результатов аудита при изменении состояния объекта.

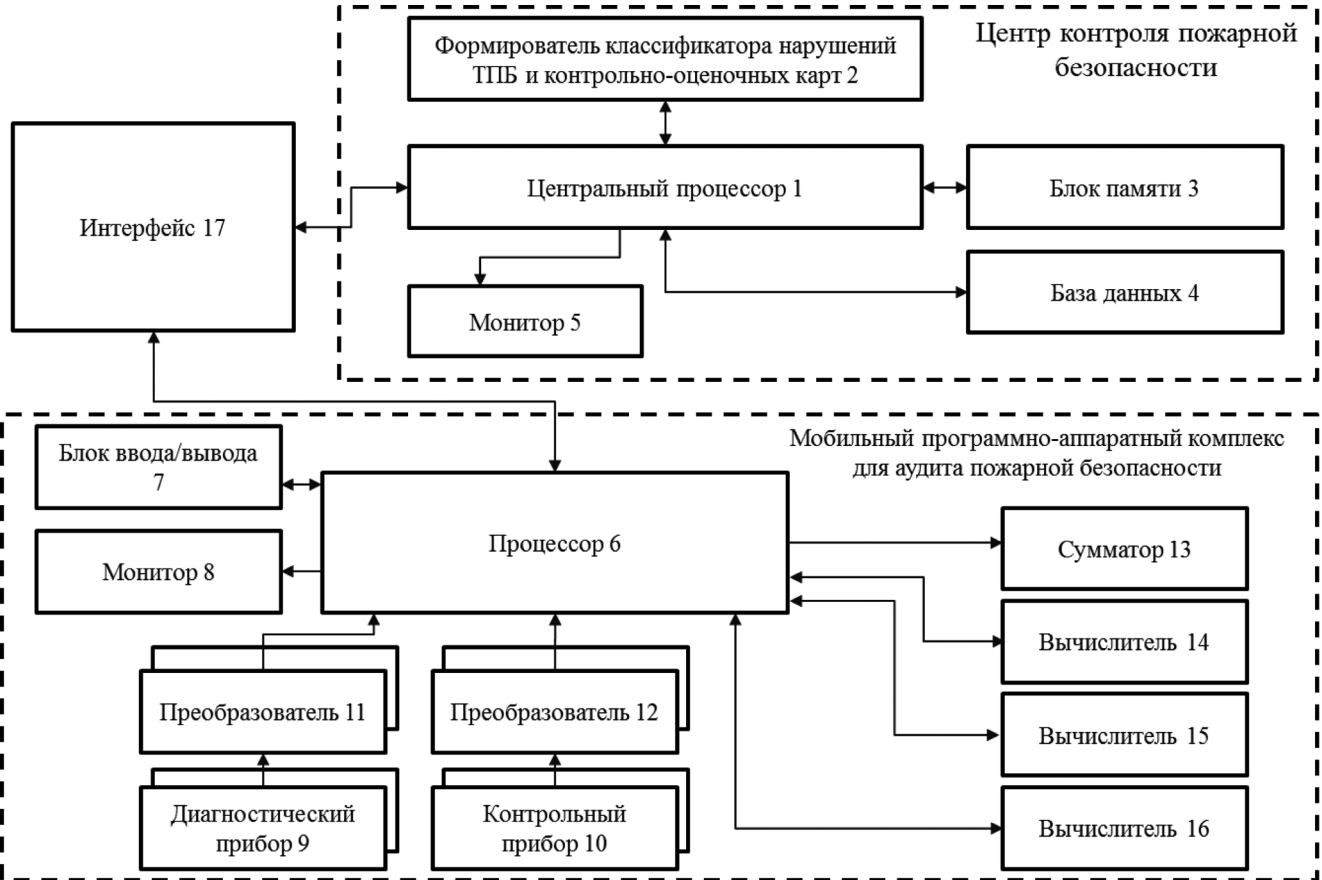


Рисунок 4 – Схема реализации способа оценки пожарного риска объектов железнодорожного транспорта

Алгоритм, приведенный на рисунке 2, итеративно повторяется для каждого объекта, пожароопасное состояние которого необходимо оценить. В период весеннего комиссионного осмотра 2018 года в эксплуатационных депо Дальневосточной дирекции тяги на 221 единице тягового подвижного состава было выявленного 9761 пожароопасное состояние на тепловозах серии ТЭ10. На рисунке 3 приведена информация о количестве пожароопасных состояний, выявленных при проведении аудита пожарной безопасности, тепловозов серии 3ТЭ10 в Дальневосточной (ДВОСТ), Московской (МОСК), Восточно-Сибирской (В-СИБ) дирекциях тяги.

3. Структура автоматизированной системы диагностирования и прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта

Математическая обработка результатов диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению их пожарной опасности, рассмотрена в работах [17, 18]. Результатом такой обработки является прогнозирование пожарного риска каждого оцениваемого объекта ЖДТ и принятие решения о его допуске в эксплуатацию. Для проведения системных мероприятий по управлению рисками большого количества объектов необходима автоматизированная система управления (АСУ) пожарными рисками. Такая АСУ должна разрабатываться с учетом территориально распределенной системы управления железнодорожным транспортом. Эффективной будет следующая структура АСУ пожарными рисками на железнодорожном транспорте:

1) Центр контроля пожарной безопасности, в который будет поступать информация о статистике пожаров (в т.ч. путем интеграции с существующими в ОАО «РЖД» АСУ). В рамках этого центра должен функционировать модуль разработки критериев аудита и классификаторов состояний.

2) Мобильный программно-аппаратный комплекс для аудита пожарной безопасности, с помощью которого на основании полученных из центра контроля пожарной безопасности данных функционирует модуль проведения аудита.

Так как для обследования каждого объекта необходим визуальный контроль, то оптимальным будет использование мобильных систем регистрации состояния. В настоящее время большинство датчиков, используемых для диагностики фактического состояния объектов (датчики давления, масла, тепловизоры и т.п.) не объединены в единую сеть, поэтому показания с каждого датчика необходимо снимать отдельно. Это еще один аргумент в пользу мобильных систем. На рисунке 4 изображена схема реализации указанного способа оценки пожарного риска объектов железнодорожного транспорта.

Центр контроля пожарной безопасности включает в себя центральный процессор 1, входы / выходы которого подключены непосредственно к выходам / входам формирователя 2 контрольно-оценочных карт (модуль разработки критериев аудита и классификаторов состояний), блока 3 памяти и базы 4 данных, а также монитор 5. Мобильный программно-аппаратный комплекс (МПАК) для аудита пожарной безопасности включает процессор 6 с блоком 7 ввода / вывода и монитором 8, средства диагностики в виде соответствующих контрольно-диагностических комплексов 9 и контрольных приборов 10, преобразователи 11 и 12, последовательно соединенные сумматор 13, первый, второй и третий вычислители 14, 15 и 16, выход последнего из которых подключен к входу процессора 6. Выходы процессора 6 соединены с сумматором 13 и интерфейсом 17 связи для взаимодействия процессора 6 с центральным процессором 1.

При этом выход каждого контрольно-диагностического комплекса 9 и контрольного прибора 10 через соответствующий преобразователь 11 и 12 подключен к входу процессора 6, другие входы / выходы которого соединены с выходами / входами вычислителей 14 и 15.

После расчета пожарного риска на основании внесенных в МПАК данных о состояниях пожарной опасности, разрабатывается план их устранения с учетом уровней риска, которые образуют эти состояния. В случае если объект защиты допускается к эксплуатации с ограничениями, то устранение пожароопасных состояний осуществляется в рамках планового ТОиР. Если объект не допускается к эксплуатации, то осуществляется его внеплановый ремонт.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена проблема диагностирования состояний пожарной опасности объектов ЖДТ, предшествующих горению. Показана важность разработки проактивной системы управления пожарной безопасностью на основе оценки пожарных рисков. Определено, что источниками информации о состояниях, предшествующих горению объектов ЖДТ могут быть как существующие автоматизированные системы учета отказов, оценки рисков, так и результаты диагностики фактического состояния объектов в рамках планово-предупредительных ремонтов.

Для выбора параметров фактических состояний объектов предложен алгоритм диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению их пожарной опасности с учетом участия в диагностике группы экспертов. Для системного управления пожарными рисками множества объектов ЖДТ предложен способ автоматизированной оценки пожарного риска. С учетом необходимости визуального осмотра объектов ЖДТ, в т.ч. регистрации показания территориально распределенных датчиков, предложен мобильный программно-аппаратный комплекс для аудита пожарной безопасности объектов.

Библиографический список

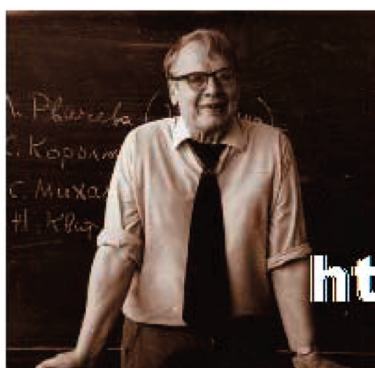
1. Здор, В.Л. Пожарная сигнализация [Текст] / В.Л. Здор, М.А. Землемеров, К.А. Попонин, И.В. Рыбаков // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 41-49. – ISSN 0236-4468.
2. Шубинский, И.Б. Методы обеспечения функциональной надежности программ [Текст] / И.Б. Шубинский // Надежность. – 2014. – № 4. – С. 87-101.
3. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования [Текст]: Свод правил: Утв. приказом МЧС РФ от 25 марта 2009 г. № 175.
4. Киракосян, Р.С. Мультикритериальные и мультисенсорные пожарные извещатели [Текст] / Р.С. Киракосян, П.В. Капустин, А.А. Легейда, Т.А. Буцынская // Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов). – 2017г. – С. 130-132.
5. Thomas, I.R. Effectiveness of Fire Safety Components and Systems [Text] / I.R. Thomas // Journal of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers. – May 2002. – Vol. 12. – No. 2. – P. 151-162.
6. Milke, J. Effectiveness and Reliability of Fire Protection Systems [Text] / James A. Milke // Protection Engineering magazine. – 2014. – Vol 64. – P. 44-52.
7. Кучера, Л.Я. Анализ надежности автоматизированных систем обеспечения пожарной безопасности [Текст] / Л.Я. Кучера, М.В. Иванникова // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Сборник статей VIII международной научно-практической конференции: в 2 частях. – 2017. – С 57- 61.
8. Похабов, Ю.П. Обеспечение надежности уникальных высокоответственных систем [Текст] / Ю.П. Похабов // Надежность. – 2017. – № 17(3). – С. 17-23.
9. Шубинский, И.Б. Систематический подход к защите программного обеспечения от сбоев аппаратуры [Текст] / И.Б. Шубинский, Х. Шебе // Надежность. – 2014. – № 3. – С. 97-107.
10. Петрова, Д.А. Анализ и моделирование технологических и производственных процессов при наступлении чрезвычайных ситуаций на примере системы пожарной сигнализации [Текст] / Д.А. Петрова // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (cad/cam/pdm – 2016): труды XVI-ой международной молодежной конференции. – 2016. – С. 291-293.
11. Лебедева, М.И. Комплекс технических средств автоматизированной системы управления противопожарной защитой технологической установки первичной переработки нефти [Текст] / М.И. Лебедева, А.В. Федоров, Е.Н. Ломаев, А.В. Богданов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 2. – С. 20-25.
12. Федоров, А.В. Автоматизация систем противопожарной защиты технологических процессов обеспечения функционирования спортивных сооружений [Текст] / А.В. Федоров, Е.Н. Ломаев, Ф.В. Демехин // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 2(60). – С. 49-55.
13. Галиакбаров, В.Ф. Построение интеллектуальной системы обнаружения несанкционированных скачков давления в магистральных трубопроводах для поддержания промышленной и пожарной безопасности [Текст] / В.Ф. Галиакбаров, В.Д. Ковшов, Э.В. Галиакбарова, З.М. Нагаева // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов: науч.–техн. журн. – 2015. – № 2. – С. 188-195.
14. Белозеров, В.В. Метод и автоматизированный комплекс обнаружения, предотвращения и тушения торфяных пожаров [Электронный ресурс] / В.В. Белозеров, А.А. Нестеров, Ю.Г. Плахотников, Ю.В. Прус // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2010. – № 5(33). – URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/> (дата обращения 30.03.2018)
15. Замышляев, А.М. Совершенствование системы управления содержанием эксплуатационной инфраструктуры с применением современных информационных технологий [Текст] / А.М. Замышляев, Г.Б. Прошин // Надежность. – 2009. – № 4(31). – С. 14-22.
16. Гапанович, В.А. Математическое и информационное обеспечение системы УРРАН [Текст] / В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2013. – № 1. – С. 3-11.
17. Шубинский, И.Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта [Текст] / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич // Надежность. – 2017. – Т. 17. – № 1(60). – С. 40-45.
18. Гапанович, В.А. Оценка пожарных рисков тягового подвижного состава в условиях неполной информации [Текст] / В.А. Гапанович, О.Б. Проневич // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 11. – С. 58-63.

Сведения об авторах

Ольга Б. Проневич – начальник отдела АО «НИИ-АС», Москва, Россия, e-mail: o.pronevich@vniias.ru

Игорь Б. Шубинский – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя НТК АО «НИИ-АС», Москва, Россия, тел. +7 (495) 786-68-57, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Поступила: 01.10.2018



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 пристатейным библиографическим списком, предоставляется с одним комплектом рисунков

Внимание! Названия статьи, ФИО авторов, аннотация и ключевые слова обязательно представляются в соответствии с требованиями ВАК на русском и английском языках. Аннотация не менее 350 слов.

Информация о каждом авторе должна содержать следующие стандартные сведения:

- Фамилия, имя, отчество;
- Ученая степень, ученое звание, почетное звание;
- Членство в общественных союзах и т.д.;
- Место работы, должность;
- Перечень и номера журналов IDT Publishers, в которых ранее публиковались статьи автора;
- Сведения для контактов;
- Фотографии всех авторов статьи.

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется.

Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter. Текст статьи набирается через полтора интервала на странице формата А4; слева должно быть поле 2 см; страницы нумеруются, «красная строка» обязательна.

Все буквенные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисуночном тексте. Недопустимы отличия в обо-

значениях на рисунках и в тексте. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в тексте.

Непосредственно в тексте набираются простые формулы (например, m^2 ; n^2t , $C = 1 + DDF - A_2$), греческие буквы и символы, например, β , $\odot$ — шрифтом Symbol. То, что невозможно набрать непосредственно в текстовом редакторе, — с использованием редактора формул Microsoft Equation (входящего в комплект поставки Microsoft Office) или редактора формул Mathtype.

Не допускается представление текста, в котором формулы представлены в виде изображения.

Фотографии и рисунки к статьям предоставляются отдельными файлами с расширением TIF, или EPS или JPEG с разрешением не менее 300 dpi.

Список использованной литературы составляется в порядке цитирования и дается в конце статьи.

Ссылки на литературу в тексте отмечаются порядковыми цифрами в квадратных скобках.

Вниманию авторов, публикующихся в журналах IDT Publishers.

Представленная информация о каждом авторе помимо журнала будет размещаться на сайте techizdat.ru в разделе «Авторы» на отдельной интернет-странице.

Авторам также предоставляется возможность при публикации своих статей направить в редакцию свою электронную фотографию и дополнительные материалы для размещения их на этой индивидуальной Интернет-визитке. По своему усмотрению автор может рассказать более подробно о себе, об интересных примерах и историях решения технических проблем, о современных задачах — в соответствии с тематикой соответствующего журнала — и т.п. Желательный объем этого материала — не более 1000 знаков с пробелами.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

Подписаться на журнал можно:

- Через агентство «Роспечать» — индекс 81733;

- По каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» — индекс 11804;

- Через редакцию на любой срок
тел.: 8 (495) 967-77-05
e-mail: 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, ПАО «УРАЛСИБ БАНК» г. Москва

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

THE JOURNAL IS PUBLISHED WITH PARTICIPATION AND SUPPORT OF JOINT-STOCK COMPANY RESEARCH & DESIGN INSTITUTE ON RAILWAY TRANSPORT (JSC NIAS)

JSC NIAS is RZD's leading company in the field of development of train control and safety systems, traffic management systems, GIS support technology, railway fleet and infrastructure monitoring systems

Mission:

- efficiency, transportation
- safety,
- reliability



Key areas of activity

- Intellectual control and management systems
- Transportation management systems and transport service technology
- Signalling and remote control systems
- Automated transportation management centers
- Railway transport information systems
- Geoinformation systems and satellite technology
- Transport safety systems
- Infrastructure management systems
- Power consumption and energy management systems
- Testing, certification and expert assessment
- Information security
- Regulatory support



www.nias.ru

SUBSCRIBER APPLICATION FOR DEPENDABILITY JOURNAL

Please subscribe us for 20_____ from No. _____ to No. _____ number of copies _____

Company name	
Name, job title of company head	
Phone/fax, e-mail of company head	
Mail address (address, postcode, country)	
Legal address (address, postcode, country)	
VAT	
Account	
Bank	
Account number	
S.W.I.F.T.	
Contact person: Name, job title	
Phone/fax, e-mail	

Publisher details: Dependability Journal Ltd.

Address of the editorial office: office 209, bldg 1, 27 Nizhegorodskaya Str., Moscow 109029,
Russia Phone/fax: 007 (495) 967-77-02, e-mail: evgenya.patrickееva@yandex.ru
VAT 7709868505 Account 890-0055-006
Account No. 407028101004300000017
Account No. 301018101000000000787

Address of delivery:

To whom: _____
Where: _____

To subscribe for Dependability Journal, please fill in the application form and send it by fax
or email.
In case of any questions related to subscription, please contact us.
Cost of year subscription is 4180 rubles, including 18 per cent VAT.
The journal is published four times a year.

REQUIREMENTS OF EDITION ON EXECUTION OF PAPERS
IN JOURNALS OF PUBLISHING GROUP OF IDT PUBLISHERS

A letter from the organisation where the author (s) works or from the author (s) personally with the paper offered for publication should be sent to the de facto editorial office address: 109029, Moscow, Str. Nizhegorodskaya, 27, Building 1, office 209, LLC "JOURNAL DEPENDABILITY" or e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru (in scanned form).

The letter should be attached to a paper text containing the summary and keywords, information on authors, bibliographic list, and one complete set of figures. All listed items are to be presented in an electronic form (on CD or via the e-mail address provided above).

Attention! Titles of papers, names of authors, summary and keywords must be presented, in Russian and English languages, according to the requirements of the Higher Attestation Commission. The information on each author should contain the following standard data:

- Surname, name, patronymic;
- Scientific degree, academic status, honorary title;
- Membership of relevant public unions, etc.;
- Place of employment, position;
- The list and numbers of Journals of IDT Publishers in which papers of the author have been previously published;
- Contact information.

Texts should be presented in Word 97-2003 format in a 12-point typeface; the text should not be formatted. Paragraphs should be arranged by pressing the "return" key. The text of the paper should be double-spaced on pages of A4; on the left there should be a margin of 2 cm; pages should be numbered, the «first line indent» is obligatory.

All alphabetical designations represented in figures should be explained in the body text or in a legend.

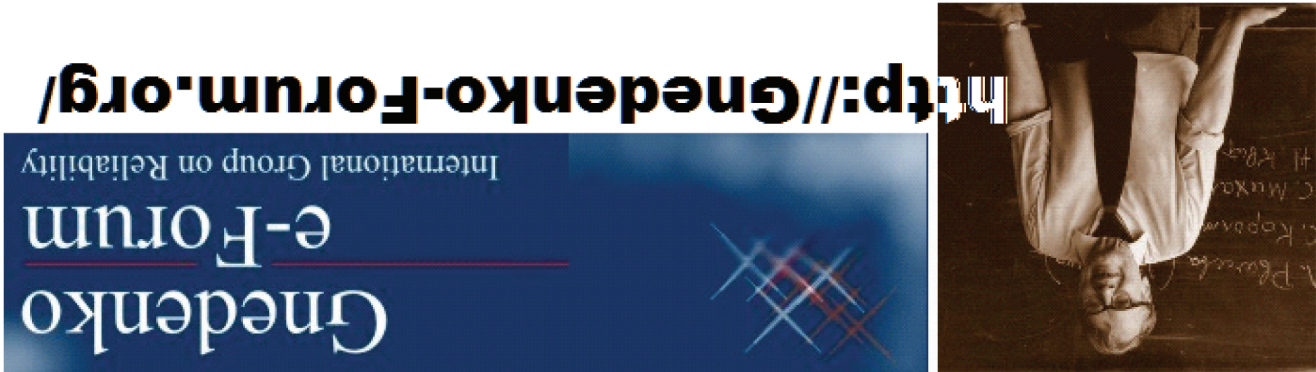
SUBSCRIPTION TO THE JOURNAL «DEPENDABILITY»

It is possible to subscribe to the journal:

- Through the agency «Rospechat»
– for the first half of the year: an index 81733;

- Under the catalogue "Press of Russia" of the agency «Books-services»:
– for half a year: an index 11804;

- Through the editorial office:
– for any time-frame
tel.: 8 (495) 967-77-05; e-mail: evgenya.patrikeeva@yandex.ru



Dear colleagues!

In 2005 the informal Association of Experts in Reliability, Applied Probability and Statistics (I.G.O.R.) was established with its own Internet website GNEDENKO FORUM. The site has been named after the outstanding mathematician Boris Vladimirovich Gnedenko (1912-1995). The Forum's purpose is an improvement of personal and professional contacts between experts in the mathematical statistics, probability theory and their important branches, such as reliability theory and quality control, the theory of mass service, storekeeping theory, etc. Since January 2006, the Forum has published a quarterly international electronic magazine

"Reliability: Theory and Applications".

The magazine is registered with the Library of Congress in the USA (ISSN 1932-2321). All rights reserved for authors so that articles can be freely published in any other publications or presented at conferences.

Join Gnedenko Forum!
Welcome!

More than 500 experts
from 44 countries
worldwide have already
joined us!

To join the Forum, send a
photo and a short CV to the
following address:

Alexander Bochkov, PhD

a.bochkov@gmail.com

Membership is free.



- [13] Galiaikbarov V.F., Kovshov V.D., Galiaikbarova E.V., Nagaeva Z.M. Postroenie intellektualnoy sistemy obnaruuzheniya nesanktsionirovannykh skachkov davleniya v magistralnykh truboprovodakh dlya podderzhaniya protivopozitsionnoy bezopasnosti [Design of the intelligent system for detection of unauthorized pressure jumps in main pipelines for the purpose of maintaining industrial and fire safety]. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefteproduktov 2015;2:188-195 [in Russian].
- [14] Belozerov V.V., Nesterov A.A., Plahotnikov J.G., Prus J.V. Method and the automated complex of detection, prevention and suppression of peat fires. Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti 2010;5(33), <http://ipb.mos.ru/ttb/>, 2018 [accessed 30.03.2018].
- [15] Zamyshlyayev A.M., Proshin G.B. Sovershennost' i razvitiye sistem upravleniya soderzhanie ekspluatatsionnoy infrastruktury s primeneniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy [Improving the maintenance management system of operational infrastructure using advanced information technology]. Dependability 2009;4(3):14-22 [in Russian].
- [16] Gapanovich V.A., Shubinsky I.B., Zamyshlyayev A.M. Mathematical and information support of the URKAN

Received on 01.10.2018

system. Dependability 2012;3:12-19.

[17] Shubinsky I.B., Zamyshlyayev A.M., Pronevich O.B. Graph method for evaluation of process safety in railway facilities. Dependability 2017;17(1):40-45. <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34487751&selid=29443826>

[18] Gapanovich V.A., Pronevich O.B. Otsenka pozharnykh riskov tyagovogo podvizhnogo sastava v usloviyakh nepolnoy informatsii [Estimation of fire risks of motive power under conditions of incomplete information]. Zhelznodorozhny transport 2016;11:58-63 [in Russian].

About the authors

Oлга B. Pronevich, Head of Unit, JSC NIIAS, Moscow, Russia, e-mail: o.pronevich@vnias.ru

Igor B. Shubinsky, Doctor of Engineering, Professor, Deputy Head of Integrated Research and Development Unit, JSC NIIAS, Moscow, Russia, phone: +7 (495) 7866857, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

- [2] Shubinsky I.B. Methods of software functional dependability assurance. Dependability 2014;4:95-101.
- [3] SP 5.13130.2009. Systems of fire protection. Automatic fire-extinguishing and alarm systems. Designing and regulations rules: Code of practice. Approved by order of EMERCOM of Russia of March 25, 2009 no. 175 [in Russian].
- [4] Kirakosyan R.S., Kapustin P.V., Legeyda A.A., Butynskaya T.A. Multikriterialnye i multisensornye pozharnye izveshchateli [Multicriterion and multisensor fire alarms]. Proceedings of the V International Science and Practice Conference of Young Scientists and Specialists, 2017. p. 130-132 [in Russian].
- [5] Thomas I.R. Effectiveness of Fire Safety Components and Systems. Journal of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers 2002;12(2):151-162.
- [6] Milke J.A. Effectiveness and Reliability of Fire Protection Systems. Protection Engineering magazine 2014;64:44-52.
- [7] Kuchera L.Ya., Ivannikova M.V. Analiz nadezhnosti avtomatizirovannykh sistem obespecheniya pozharnoy bezopasnosti [Dependability analysis of automated fire safety systems]. Innovative research: theory, methodology, practice: proceedings of the VIII international research and practice conference: in 2 parts, 2017. p. 57-61 [in Russian].
- [8] PokhabovYu.P. Ensuring dependability of unique highly vital systems. Dependability 2017;17(3):17-23.
- [9] Shubinsky I.B., Schäbe H. A systematic approach to protection against glitches. Dependability 2014;3:103-107.
- [10] Petrova D.A. Analiz i modelirovanie tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov pri nastuplenii chrezvychaynykh situatsiy na primere sistem pozharnoy signalizatsii [Analysis and simulation of processes at the onset of emergencies as exemplified by a fire alarm system]. Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta: trudy XVI-oymezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii [Systems for the design, manufacturing process preparation and lifecycle management of an industrial product: Proceedings of the XVI international youth conference]; 2016. p. 291-293 [in Russian].
- [11] Lebedeva M.I., Fedorov A.V., Lomaev E.N., Bogdanov A.V. Kompleks tekhnicheskikh sredstv avtomatizirovannoy sistemy upravleniya protivopozharnoy zashchitoy tekhnologicheskoy ustanovki pervichnoy pererabotki nefli [A set of technical facilities of automated fire safety control system of the primary crude oil processing unit]. Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya 2015;2:20-25 [in Russian].
- [12] Fedorov A.V., Lomaev E.N., Demehin F.V. Automation of fire protection systems of technological process of ensuring the functioning of modern sports facilities. Tekhnologii tekhosfernoj bezopasnosti 2015;2(60):49-55.

References

- [1] Zdor V.L., Zemlemmerov M.A., Poponin K.A., Rybakov I.V. Pozharnaya signalizatsiya [Fire alarm]. Pozharnaya bezopasnost 2012;2:41-49 [in Russian]. ISSN 0236-4468.
- The paper examines the problem diagnosing fire hazard states of railway facilities that precede fires. It shows the importance of developing a proactive fire safety management system based on fire risk assessment. It was identified that information on the states preceding fires in railway facilities can be obtained from both the existing automated failure reporting and risk assessment systems and the diagnostic results of the actual state of objects as part of scheduled preventive maintenance.
- Selecting the parameters of facilities' actual states is proposed to be performed through an algorithm of diagnostics of railway facility faults that cause increased fire hazard allowing for the participation of a group of experts in the process of diagnostics. A method of automated assessment of fire hazard is proposed for systematic management of fire risks in many railway facilities. Taking into account the requirement of visual inspection of railway facilities, including the recording of the readings of geographically-distributed sensors, a mobile hardware and software system is proposed for auditing fire safety of facilities.

Conclusion

The paper examines the problem diagnosing fire hazard states of railway facilities that precede fires. It shows the importance of developing a proactive fire safety management system based on fire risk assessment. It was identified that information on the states preceding fires in railway facilities can be obtained from both the existing automated failure reporting and risk assessment systems and the diagnostic results of the actual state of objects as part of scheduled preventive maintenance.

Selecting the parameters of facilities' actual states is proposed to be performed through an algorithm of diagnostics of railway facility faults that cause increased fire hazard allowing for the participation of a group of experts in the process of diagnostics. A method of automated assessment of fire hazard is proposed for systematic management of fire risks in many railway facilities. Taking into account the requirement of visual inspection of railway facilities, including the recording of the readings of geographically-distributed sensors, a mobile hardware and software system is proposed for auditing fire safety of facilities.

7. Facility inspection, selection of the diagnostics tools, collection of data on the actual state.
 8. Recording of information on the actual state.
 9. Agreement of the auditors' opinions on the list of identified fire hazardous states
 10. Registration of the facility's actual state.
 11. Updating of the audit data in case of changes in the facility's state.
- The algorithm shown in Figure 2 is iterated for each facility whose fire hazardous state is to be evaluated. Within the period of 2018 springtime inspection of the Far Eastern Traction Directorate 9761 fire hazardous states were identified in 221 units of TE10-series diesel-electric locomotives. Figure 3 shows data on the number of fire hazardous states identified as part of fire safety auditing of 3TE10-series locomotives of the Far Eastern, Moscow, East Siberian Traction Directorates.

3. Architecture of the automated railway facilities fire safety diagnostics and prediction system

Mathematical processing of the results of diagnostics railway facility defects that cause increased fire hazard are examined in [17, 18]. The result of such processing is the prediction of the fire risk of each assessed railway facility and decision-making regarding its clearance for

operation. In order to enable systematic risk management measures in a large number of facilities an automated fire risks management system (AMS) is required. Such AMS must be developed taking into account the geographically distributed management system of the railway transportation. The following structure of the fire risks AMS in railway transportation will be efficient:

- 1) Fire safety supervision center that will collect information on the statistics of fires (e.g. through the integration with existing AMSs of JSC RZD). Such center must include the module for audit criteria and state classifiers development.
- 2) Mobile hardware and software system for fire safety auditing that enables the operation of the auditing module based on the data received from the fire safety supervision center.

Since the inspection of each facility requires visual monitoring, the use of mobile state recording systems will be optimal. Today, most sensors used in the diagnostics of the actual state of facilities (pressure, oil sensors, thermal imaging systems, etc.) are not part of a single network, therefore sensor readings must be taken individually. That is another argument in favour of mobile systems. Figure 4 shows the implementation diagram of the above method of railway facilities fire risk assessment.

The fire safety supervision center includes the central processor 1, whose inputs/outputs are directly connected

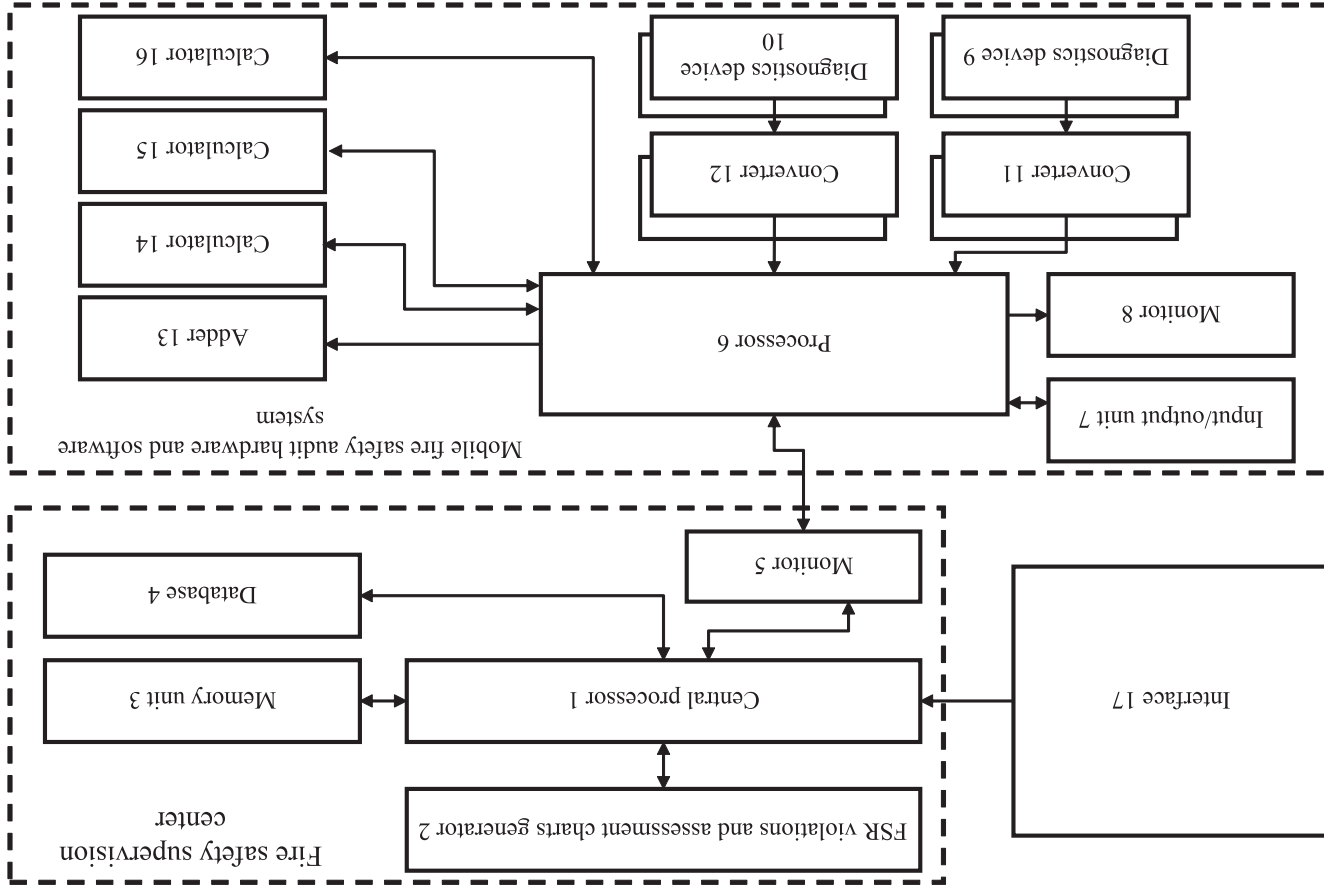


Figure 4. Implementation diagram of the above method of railway facilities fire risk assessment

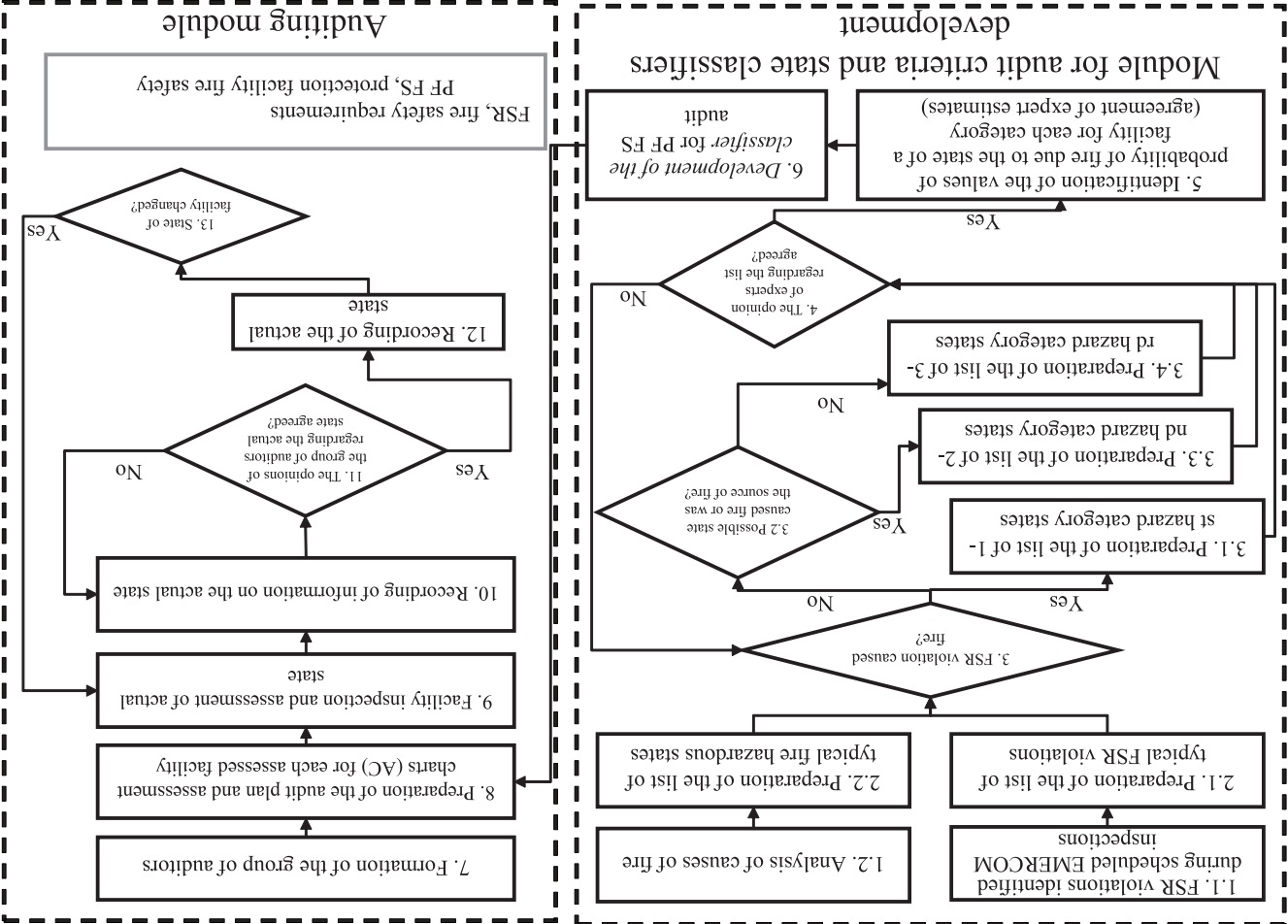


Figure 2. Algorithm of diagnostics of railway facility faults that cause increased fire hazard in railway facilities

6. Development of the classifier of fire hazardous states includes the list of all possible states of a railway facility (taking into account the facility's design). The classifier, if necessary, indicates the tools that can be used to identify fire hazardous states. Using the developed classifiers, the auditing module operates and performs the following functions:

- formation of a group of auditors qualified in identifying fire hazardous states in railway facilities,
- preparation of the audit plan and assessment charts (AC) for each assessed facility. The audit plan describes the sequence of railway facility inspection. ACs contain a list of fire hazardous states that may be observed at the assessed facility. The AC also includes margins for notes on the actual state.

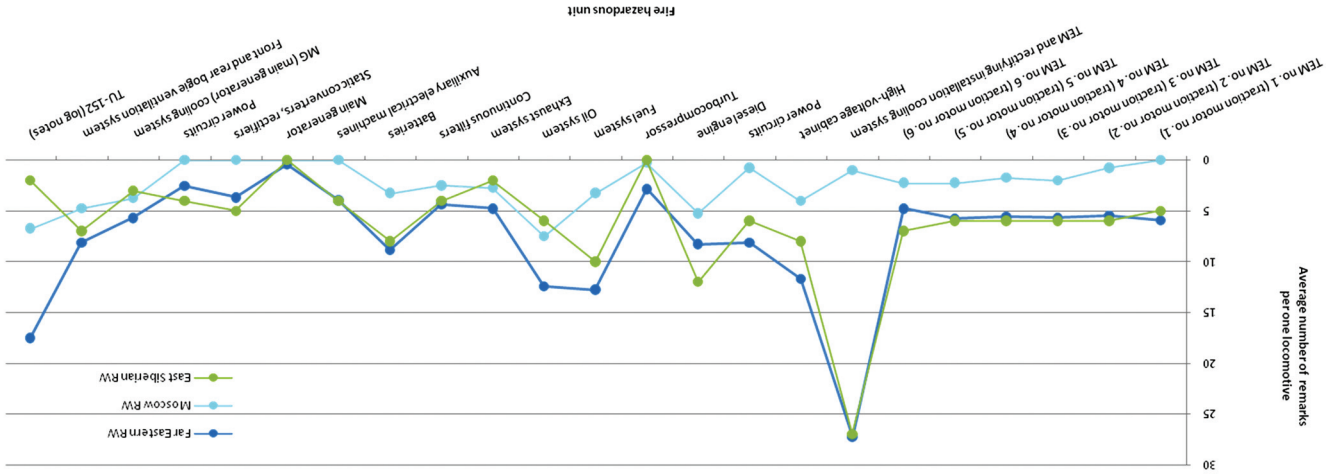


Figure 3. Fire hazardous state identification statistics in 3TE10-series traction rolling stock

2. Diagnosing the faults of railway facilities that cause increased fire hazard

fire safety. It is obvious that the number of fire hazardous states of facilities is much smaller than the number of down or pre-failure states. For this reason, we should talk about fire audit of facilities whose criteria must be associated with the states that can actually cause a fire.

While auditing complex technical systems experts face two problems: limitations of human memory in terms of the number of the possible hazardous states of railway facilities (including "rote learning" of standard sets and ignoring the states outside of the expert's experience), as well as the time expenditures of coordination of the auditors' opinions. These problems are efficiently solved through the use of man-machine systems that enable real-time display of the list of auditing criteria for a specific technical system, recording the identified states, as well as using diagnostic tools.

Automated audit requires two modules, i.e. the module for railway facilities audit criteria and state classifiers development, the auditing module. The coordinated operation of these modules enables the algorithm of diagnostics of railway facility faults that cause increased fire hazard in facilities (Figure 2).

The module for audit criteria and state classifiers development must implement the following actions:

1. Source analysis for the causes of fire and results of EMERCOM inspections consisting in the composition of a list of fire safety violations identified as part of planned EMERCOM inspections, composition of a list of causes of fires.
2. Preparation of a list of standard fire hazardous states consisting in the statistics analysis of the fire safety violations and preparation of a list of typical violations, analysis of the causes of fire and composition of a list of typical fire hazardous states.
3. Ranking of typical fire hazardous states:

- preparation of the list of fire hazardous states of the 1-st category of hazard (states that cause fire),
- preparation of the list of fire hazardous states of the 2-nd category of hazard (states that lead to the onset of the causes of fire or states of facilities that were statistically sources of fire),
- preparation of the list of fire hazardous states of the 3-rd category of hazard (other states).

4. Agreement of the experts' opinions on the results of the ranking of fire hazardous states;
5. Quantitative estimation of the hazard of the 1-st category states:

- for the purpose of graph-based estimation of the fire probability, a graph and transition probability matrix are constructed;
- for the purpose of expert-based estimation of the fire probability, for each state the probability is estimated of the onset of fire hazardous events.

Shown in Figure 1 are:

$x(t)$, the parameters of the object of evaluation (equipment/machine/mechanism) indicating the fire hazardous state of the facility, that can be identified by means of diagnostics, including, among other, human visual inspection of such facility,

$x(t)$, the parameters of the object of evaluation (equipment/machine/mechanism) indicating the fire hazardous state of the facility, that cannot be identified by means of diagnostics, including, among other, human visual inspection of such facility,

$y(t)$, the environmental parameters registered by the fire alarm.

The majority of automated fire safety management systems contain only sensors that react to parameters $y(t)$. But currently, due to increasing costs of equipment, the requirement for round-the-clock operation, systems are needed that are capable of identifying signs of fire hazardous states before the appearance of fire. Such system will allow avoiding emergency interruption of manufacturing and business processes, as well as significantly reducing costs, including due to prevention of economic losses. Especially relevant is prevention of losses caused by emergency interruption of processes in railway transportation. Constructing a proactive fire safety management system requires designing methods and tools for diagnosing the parameters that indicate fire hazardous states of facilities. Based on the assessment of the fire risk of the identified states, the decision must be made regarding the modification of the state of the supervised facility before the onset of fire. Table 1 shows the technical facilities used for prediction of fire hazard in facilities before combustion

Today, proactive fire safety management systems are primarily used in the oil and gas industry and the primary parameter $x(t)$ they can observe is gas concentration. Gas alarm-based automated systems are also used in closed systems, e.g. submarines, warehouses. However, such diagnostics tools are not applicable in many other industrial facilities. That causes the requirement for the development of automated systems for monitoring faults affecting fire safety. This objective is especially important in the context of widespread automation of manufacturing and business processes and development of databases of actual states of facilities. For instance, JSC RZD operates an automated systems for recording technical facility failures [15], dependability and risks management systems [16]. Information from such systems should be used for purposes of various tasks. However, complete automation of diagnostics processes is not always necessary. Of high importance is the cost of sensors and other components, the availability of legacy manned facility inspection systems. The latter is especially important in case of facilities that undergo regular cycles of service and repair (S&R). In the railway industry, such facilities include: traction rolling stock, interlocking equipment, traction substations equipment, etc. In such facilities an efficient S&R system is already in place. The results of facilities diagnostics as part of S&R can be used in ensuring

Introduction

management system based on fire risk assessment and enabling the prediction of the probability of fires using information on the results of railway facilities diagnostics.

1. The problem of automated diagnostics of facility faults affecting fire safety

In accordance with the requirements of the code of practice [3] detecting the location of fire can be done using video cameras and matrix optical sensors with targeted indication of the source of fire, targeted automatic fire alarms, liquid flow detectors or sprinklers with start control. The efficiency of all actions following the detection of fire depends on the rate at which the alarm processes the incoming signals. For that purpose, various algorithms of processing the controlled ambient variables are in development [4]. Software dependability is another important factor. Matters of dependability of automated control systems, including those specific to fire safety, was examined by many researchers [5, 6, 7, 8]. In [9], the authors look at the problem of ensuring the protection of software from hardware faults, which is of special relevance in case of sensor-based systems. The high rate of sensor operation and dependability of automated systems components are essential, but not sufficient conditions of efficient fire safety management of complex technical facilities. Today's systems must enable not only efficient suppression of detected fires, but prevent them as well. For this purpose, the fire alarm (FA) and public address and evacuation management system (PAEM) examined in [10] must be complemented with a circuit of early pre-fire detection of fire hazardous states (Fig. 1).

The first fire detection sensors were developed in the XIX century and were based on temperature detection, i.e., according to current existing classification were heat-sensitive alarms [1]. Sensors are at the core of most automated supervision and control systems. With the development of information technology, ensuring safety is becoming progressively more simple, yet it requires complex algorithms. Among today's fire safety technology we can note automated fire safety management systems, as well as the intelligent and robotized fire alarm and suppression systems. The design of buildings with automatic fire suppression systems involves computer simulation of the evacuation process. Automation and application of information technology are evident in each aspect of fire safety both in the fire prevention systems and fire safety systems. At the foundation of such automation are technologies that enable collection of statistical information on the cases of fire, analysis, investigation and proposal of solutions to prevent repeated incidents. In order to ensure fire safety of large facilities various hardware and software systems are integrated into a single automated fire safety management system. A research of the software architecture of safety-critical systems is done in [2]. An event-driven system has a number of advantages that are valuable in terms of fire safety, i.e. a system can be easily extended with a new component, the components can react to any events. However, such architecture does not guarantee a reaction to an event, therefore, the reaction to an event must be confirmed explicitly. That requires an interface to external systems, human operator or an automated decision support system. This paper examines the task of constructing the functional structure of an automated railway facility fire safety

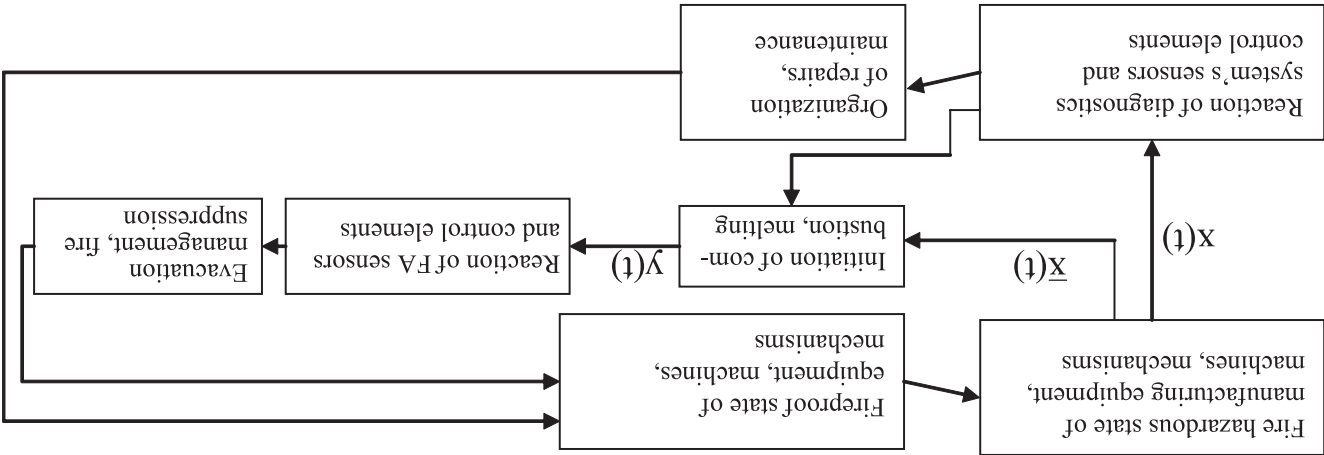


Figure 1. Operation diagram of FA and PAEM with a circuit of pre-fire detection of fire hazardous states

Table 1. Primary means of detection of pre-combustion signs of fire hazard

Facility	Technical facility	Controlled fire hazard state
Oil industry facilities [11]	Air pollution sensor	Dangerous level of explosive gas concentration
Sports facilities [12]	Combustible gases and ammonia vapors sensors	Dangerous level of explosive gas concentration, maximum acceptable concentration
Pipelines [13]	Pressure sensor	Elevated pressure
Peatlands [14]	Peat gas thermal probes	Temperature, gas concentration

Risk-based automated system for prediction of fire safety in railway facilities

Original article
Dependability, vol. 19 no. 1, 2019
DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-48-54

Olga B. Pronovich, JSC NIIAS, Moscow, Russia, e-mail: o.pronovich@vniias.ru
Igor B. Shubinsky, ZAO IBTrans, Moscow, Russia, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru



Olga B. Pronovich



Igor B. Shubinsky

Aim. The development of the Russian railway industry is associated with the growing number of operated buildings, rolling stock, more complex business processes of infrastructure maintenance and client service. In this context, JSC Russian Railways (JSC RZD) needs to manage the fire safety of more than ten thousand units of traction stock and hundreds of buildings, where potential fires may cause harm to passengers or interruption of service. Fire safety management of both fixed and mobile railway facilities is performed at all lifecycle stages from design to disposal. Implementing the processes of fire safety diagnostics and prediction requires the development of a man-machine system whose core would be an automated fire risk control system (ACS) that allows – based on the fire risk prediction – making decisions regarding the requirement for the repairs, replacement or maintenance of railway facilities and fire safety systems. **Methods.** The methods of the automatic control theory, expert assessment were used. The study aimed to develop an algorithm of automated auditing of railway facilities fire safety. **Results.** It is established that the majority fire safety control systems use gas concentration sensors to detect symptoms of hazard before flame development. This approach is hardly effective in terms of fire safety of railway facilities. For railway facilities whose actual state has an effect on the probability of fire a fire audit algorithm was developed that is based on the existing service and repair system, as well as statistical data on the states of railway facilities that precede fire. In order to enable systematic risk management measures in a large number of railway facilities, the paper proposes the structure of an automated fire risks management system that includes a fire safety management center and a mobile hardware and software system for fire safety auditing. **Conclusions.** It shows the importance of developing a proactive fire safety management system based on fire risk assessment. It was identified that information on the states preceding fires in railway facilities can be obtained from both the existing automated failure reporting and risk assessment systems and the diagnostic results of the actual state of objects as part of scheduled preventive maintenance. A method of automated assessment of fire hazard is proposed for systematic management of fire risks in many railway facilities.

Keywords: fire risk, automatic auditing algorithm, proactive fire safety management system, automated fire risk assessment

For citation: Pronovich O.B., Shubinsky I.B. Risk-based automated system for prediction of fire safety in railway facilities. Dependability 2019;19(1): 48-54. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-48-54

of socionic psychodiagnostics of aeronautical personnel]. Transport: science, equipment, management 2017;2:23-30 [in Russian]. <<https://elibrary.ru/item.asp?id=284422669>>

[10] Dzharfazarade T.R., Malishhevsky A.V. The challenge of improving professional psychological selection of pilots of civil aviation. Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations 2013;3: 66-70 [in Russian]. <<https://elibrary.ru/item.asp?id=21034457>>

[11] An-148 aircraft crash in the Moscow region, <<https://ru.wikipedia.org/?oldid=95115464>>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[12] Crash of the Tu-134A aircraft of the Ivanovo air enterprise in the vicinity of the Ivanovo airport. Aviation-nnye proissheshestviya, intensity i aviakatastrofy v SSSR i Rossii: fakty, istoriya, statistika [Aviation accidents, incidents and disasters in the USSR and Russia: facts, history, statistics], 2006-2018, <<http://www.airdisaster.ru/database.php?id=90>>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[13] Final report on the results of the investigation of aviation incident. Tu-134 RA-65691 20.06.2011. Interstate Aviation Committee. 19.09.2011, <https://mak-iac.org/upload/iblock/bb2/report_ra-65691.pdf>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[14] Final report on the results of the investigation of an aviation incident. Yak-42 RA-42434 07.09.2011. Interstate Aviation Committee. 02.11.2012, <https://mak-iac.org/upload/iblock/b75/report_ra-42434.pdf>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[15] Final report on the results of the investigation of an aviation incident. Boeing 737-500 VQ-BBN 17.11.2013. Interstate Aviation Committee. 23.12.2012, <https://mak-iac.org/upload/iblock/481/report_vq-bbn.pdf>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[16] Final report on the results of the investigation of an aviation incident. Boeing 737-500 VP-BKO 14.09.2008. Interstate Aviation Committee. 29.05.2009, <https://mak-iac.org/upload/iblock/c2d/vp-bko_report.pdf>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[17] Antsupov A.Ya., Shipilov A.I. Konfliktologiya: ochebnik dlia vuzov: 5-e izd. [Conflict management: textbook for higher education establishments: 5-th edition]. Saint Petersburg: Piter, 2013 [in Russian].

[18] Shevchuk D.A. Konfliktky: izbegat ili forsirovat. Vse o konfliktnykh situatsiyakh na rabote, v biznese i lichnoy zhizni [Conflicts: to avoid or to intensify. All about conflicts in the workplace, business activities and personal life]. Moscow: GrossMedia, 2009 [in Russian].

[19] Grishina N.V. Psikhologiya konfliktov: 2-e izd., pererab. i dop. [Psychology of conflict: 2-nd edition, updated and revised]. Saint Petersburg: Piter, 2008 [in Russian].

[20] Vasilyeva L.N., Schepekova S.S. Study of medicine students' behaviour strategies in interpersonal conflicts on their first years of education. Historical and social-educational ideas 2016;8(4/2):111-114 [in Russian]. DOI: 10.17748/2075-9908-2016-8-4/2-111-114.

[21] Kilmann R.H., Thomas K.W. Developing a forced-choice measure of conflict-handling behaviour: the MODE

Received on 02.11.2018

About the authors

Olga V. Arinicheva, Candidate of Engineering, Senior Lecturer in Flight Operation and Safety in Civilian Aviation, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Russia, <20675355@mail.ru>

Alexey V. Malishhevsky, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer in Flight Operation and Safety in Civilian Aviation, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Russia, <20675355@mail.ru>

Instrument. Educational and Psychological Measurement 1977;37(2):309-325. DOI: 10.1117/001316447703700204.

[22] Kardashina S.V., Shangina N.V. Psychometric characteristics of the Russian version of the Thomas-Killmann questionnaire («Thomas-Killmann Conflict Mode Instrument – TKI-R»). Pedagogical Education in Russia 2016;11:216-228 [in Russian]. <<https://elibrary.ru/item.asp?id=28828302>>

[23] Karelina A.A. Bolshaya entsiklopediya psikhologicheskikh testov [Large encyclopedia of psychological tests]. Moscow: Eksmo, 2007 [in Russian].

[24] Kilmann R.H., Thomas K.W. Thomas-Killmann conflict mode instrument. Tuxedo, NY: Xicom Publ., 1974. DOI: 10.1037/t02326-000.

[25] Thomas-Kilmann Conflict Mode Instrument. Profile and Interpretive Report, <https://takeethetki.com/wp-content/uploads/2017/11/TKI_Sample_Report.pdf>, 2018 [accessed 08.10.2018].

[26] Kuular S.V., Buduk-ool L.K. Psychophysiological features of students with different types of conflict management strategies. Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin 2017;7(5):67-80. DOI: 10.15293/2226-3365.1705.05.

[27] Pavlenkovich S.S. Strategii povedeniya studentov sportmenov s raznyimi lichnostnymi osobennostyami v konfliktnykh situatsiyakh [Behavioural strategies of student athletes with different personality traits in the conflict situations]. In: Konflikt v sovremennom mire: mezhdunarodnye gosudarstvennoye i mezhluchnostnoye izmereniye: materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Conflicts in the modern world: international, national and interpersonal dimensions: Proceedings of the V international science conference]. Saratov (Russia): Saratov Chernyshevsky State University. Moscow: Pero, 2016. p. 644-648, <<https://elibrary.ru/item.asp?id=26478762>>

[28] Aristova Y.V., Freimanis I.F., Ignatova E.S. Features strategies, behaviour of entrepreneurs in the conflict in connection with the gender. Success of Modern Science and Education 2016;7(11):22-25, <<https://elibrary.ru/item.asp?id=27451516>> [in Russian].

[29] Grina, E.S. Behavioural features of high school seniors with different intellectual abilities in interpersonal conflicts. Vestnik SPbSU. Series 12. Psychology and Education 2014;2:58-66, <<https://elibrary.ru/item.asp?id=21653261>> [in Russian].

Table 5. Intercorrelation between TKI-R results on a sample of 603 SPbSUCA and PFLMC ISU students of various specialties

Competing	Collaborating	Compromising	Avoiding	Accommodating
	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Competing	-0.3188	-0.3783	-0.3924	-0.4847
Collaborating		$p < 0.01$	-0.1297	-0.1771
Compromising	$p < 0.001$		-0.0211	-0.1972
Avoiding	$p < 0.001$	$p < 0.001$		-0.1482
Accommodating	$p \geq 0.05$	$p \geq 0.05$	$p < 0.001$	

Note: the values of Pearson correlation coefficient between efficiency indicators are located in the upper right; the characteristics of correlation significance are located in the bottom left

to males. This is to a certain extent consistent with the data of [20] that shows a significant difference in the maturity of competing strategy between female and male respondents (Mann-Whitney U-test, $U = 1003.5$ with $p = 0.036$): male students display a higher level than female students. Student pilots (232 people) and students of humanities (194 people) also show highly reliable differences in the manifestation of such behaviour styles as competing and avoiding according to the Pearson's χ^2 criterion. Humanities students and student air traffic controllers (141 people) have highly reliable differences in the manifestation of the competing behaviour style.

Table 5 shows the intercorrelations between TKI-R results on a sample of 603 students of various specialties (SPbSUCA and PFLMC ISU). There are no fundamental differences between data in Table 4 and Table 5.

Conclusion. Thus, by generalizing the authors' findings and those set forth in other authors' publications [20, 26-29], we can agree with the conclusions of [29] in that "uncooperative behaviour of all tested students is dominated by average manifestation of strategies of competing, collaborating, compromising, avoiding and accommodating, which indicates the ability of the subjects of this age for flexible behaviour in conflict situations subject to the specific conditions of interaction". That means that students, unlike the success-seeking business owners [28], while prioritizing collaboration and compromise in conflict situations, flexibly use other behaviour strategies. This must be taken into consideration when planning measures aimed at improving the reliability of professional psychological selection in commercial aviation. It appears that in view of the above reasons, the application of the TKI-R procedure in the professional psychological selection of aviation specialists is unviable.

References

[1] Maklakov A.G. Professionalny psikhologicheskyy otbor personala. Teoriya i praktika: uchebnik dlya vuzov [Professional psychological selection of personnel. Theory and practice: textbook for higher educational institutions]. Saint Petersburg: Piter, 2008 [In Russian].
[2] Rukovodstvo po psikhologicheskomu obespecheniyu otbora, podgotovki i professionalnoy deyatel'nosti letnogo i dispetcherskogo sostava grazhdanskoy aviatsii Rossiyskoy Federatsii [Guidelines for psychological support of selection of personnel. Theory and practice: textbook for higher educational institutions]. Saint Petersburg: Piter, 2008 [In Russian].

[3] Malishhevsky A.V., Arinicheva O.V., Vlasov E.V. Vozdušnyy transport, 2001 [In Russian].
[4] Malishhevsky A.V., Vlasov E.V., Kaymakova E.M. Vozmozhnye puti resheniya problemy snizheniya negativnogo vliyaniya chelovecheskogo faktora v chrezvychaynykh situatsiyakh na transporte [Possible ways of reducing the negative effect of the human factor in transportation emergencies]. Biomedical and psychosocial aspects of safety in emergency situations 2015;(1):108-114 [In Russian], <https://elibrary.ru/item.asp?id=23735424>.
[5] Arinicheva O.V., Malishhevsky A.V. Nedostatki sushchestvuyushchego professionalnogo otbora pilotov i problema ego sovershenstvovaniya [Disadvantages of the existing professional selection of pilots and matters of its improvement]. Transport: science, equipment, management 2016;6:41-51 [In Russian], <https://elibrary.ru/item.asp?id=26254884>.
[6] Arinicheva O.V., Gerasimenkova A.E., Malishhevsky A.V., Chepik M.G. Possible ways of improving the reliability of professional psychological selection of air traffic controllers. Dependability 2018;18(1):38-45. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-38-45.
[7] Arinicheva O.V. Problema povysheniya kachestva professionalnogo psikhologicheskogo otbora v grazhdanskoy aviatsii [The problem related to the improvement of the quality of professional psychological selection in commercial aviation]. Kachestvo i zhizn 2018;2:67-71 [In Russian], <https://elibrary.ru/item.asp?id=26254884>.
[8] Arinicheva O.V., Malishhevsky A.V., Akimov I.A. Otvetstvennost' v sisteme tsennostey aviatsionnykh spetsialistov [Responsibility in the value system of aviation specialists]. Transport: science, equipment, management 2018;6:20-25 [In Russian], <https://elibrary.ru/item.asp?id=35093752>.
[9] Malishhevsky A.V. Nekotorye voprosy sovershenstvovaniya sotsionicheskoy psikhodiagnostiki aviatsionnogo personala [Some matters regarding the improvement

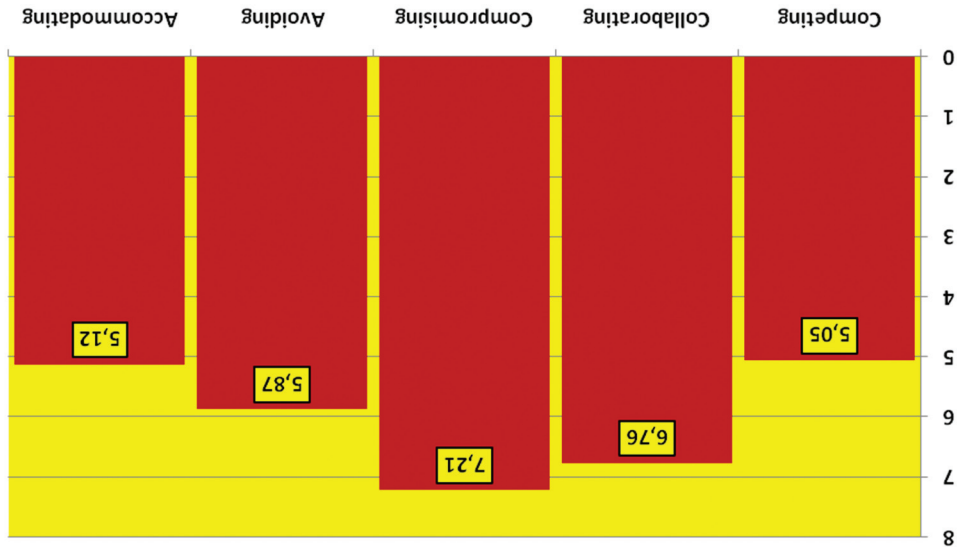


Figure 4. Indicators of average values of behaviour styles of SPbSUCA and PFLMC ISU students in conflict situation in accordance with TKL-R in scores (on a sample of 603 people)

fruitful, since it betrays the principles of both partners that is unacceptable during diagnostic and treatment processes. The avoiding strategy is ineffective at all for the medical profession. However, the first year students, obviously, do not have a clear vision of their future professional activity. Therefore, the identified dominant behaviour strategies in a conflict situation are characterized by individual and stylistic features to a larger extent than by the level of the professional qualities development" [20].

The authors of this paper conducted a multipurpose experiment on a large sample of SPbSUCA students (232 student pilots, 141 student air traffic controllers, 36 student air navigation specialists, 19 student advertisement and PR specialists, 53 student HR specialists). Additionally, in order to rectify the prevalence of students of technical faculties (although they were the focus of the research, since the PPS procedure generally concerns pilots and air traffic controllers) and conduct an objective analysis, with an active support of psychologist V.S. Kamenskaya from Irkutsk, the analysis results for 122 students majoring in Practice and Theory of Translation, Foreign Studies of the Institute of Philology, Foreign Languages and Media Communication of the Irkutsk State University (PFLMC ISU) were obtained. Thus, the total sample of experiment participants was 603 people. Figure 4 shows the distribution of average values of behaviour styles in conflict situations for the entire specified sample (SPbSUCA and PFLMC ISU students). Comparing Figure 3 and Figure 4, it is quite obvious that they are almost identical.

If we compare these 603 participants per individual samples, there are of course differences in the manifestation of such reliable ($p \leq 0.01$) differences in the manifestation of such behaviour styles as competing, compromising and avoiding between males (344 people) and females (259 people) according to the Pearson's χ^2 criterion. Females are significantly less inclined to the competing strategy and somewhat more inclined to avoiding and compromising as compared

style or its absence. Thus, according to the presented sample it can be noted that SPbSUCA students are most inclined to the collaborating and compromising strategies. According to [27], "athlete students, being in a conflict situation, apply such strategies as collaborating, compromising and competing. To a lesser extent they apply the following 2 behaviour styles: avoiding and accommodating". According to [28], female entrepreneurs mostly apply avoiding and competing strategies, while male entrepreneurs apply competing strategy.

The results in [20] are very interesting. The authors made a research on a sample of 129 students of the Yaroslavl State Medical University and noted that the first year students of the medical faculty use the compromising strategy (23.7%, the average score is 7.10) and avoiding strategy (23.6%, the average score is 7.07) approximately at the same degree, and in a lesser extent they use the competing strategy (15.4%, the average score is 4.62). "Therefore, for this group, it is important to focus on finding a mutually acceptable solution (temporary and intermediate) through concession. These respondents prefer to get at least something than to lose. At the same time, these students are inclined with the same extent to give up on their interests, but they are not ready to accommodate their partners. These respondents are less focused on the simultaneous realization of both their own interests and the partners' interests, they do not have the ability to explain the core of their interests and listen to their partner" [20]. First year students of the pediatric and dentistry faculties mostly use the compromising strategy (24.4%, the average score is 7.33, and 25.3%, the average score is 4.31), in a lesser extent they use the competing strategy (16.7%, the average score is 5.00, and 14.37%, the average score is 4.31), "therefore, first year students of all faculties are completely unwilling to come into confrontation or prioritize their own interests. Despite the fact that the compromising strategy is considered one of the most effective, the "doctor-patient" interaction process will not be

Table 3. Correlation between K. Thomas and the Buss-Durkee test results on a sample of 48 student air traffic controllers

Competing	Collaborating	Compromising	Avoiding	Accommodating
A _p	+0.1720	+0.1059	+0.1726	-0.2830
A _{ind}	+0.2157	+0.1294	-0.1510	-0.1684
A _l	+0.0394	+0.2151	+0.2092	-0.3859*
A _N	+0.1374	+0.2227	-0.2594	-0.1094
A _r	-0.1533	+0.1010	+0.1390	-0.0889
A _s	+0.2387	-0.0729	+0.1059	-0.3809*
A _{Va}	+0.6146***	+0.1142	-0.2074	-0.5933***
A _A	-0.1612	+0.1134	-0.0431	-0.1152

Note: Correlation significance (* is $p < 0.05$; ** is $p < 0.01$; *** is $p < 0.001$)

Table 4. Intercorrelation between TKI-R test results on a sample of 48 student air traffic controllers

Competing	Collaborating	Compromising	Avoiding	Accommodating
Competing	-0.1626	-0.3803	-0.4262	-0.4985
Collaborating		-0.2866	-0.2066	-0.0230
Compromising	$p < 0.05$		+0.1121	-0.1944
Avoiding	$p < 0.01$	$p \geq 0.05$		-0.2668
Accommodating	$p < 0.001$	$p \geq 0.05$	$p \geq 0.05$	

Note: At the top right there are values of the Pearson correlation coefficient between performance indicators, and at the bottom left there are the characteristics of correlation significance

correlations between the results of these test methods. The fact that the Buss-Durkee test results negatively correlate with a propensity for the accommodating strategy is clear enough, as well as the fact that they almost all (excl. A_A and A_p) positively correlate with the propensity for competing strategy. But the fact that they also positively correlate with the propensity for the collaborating strategy is not quite clear. The strongest (+0.6146) and most significant ($p < 0.001$) correlation can be observed between the propensities for verbal aggression and competing strategy. Thus, some IEBS students (in the terminology of [26]), i.e. who are inclined to the competing strategy are also inclined to aggression, and another part of IEBS students are inclined to the accommodating strategy.

Figure 4 shows the intercorrelations between TKI-R indicators obtained on the same sample. Significant intercorrelations are only between the tendency towards the competing and compromising, avoiding and accommodating strategies. Intercorrelations, as expected, are negative, but they don't reach an average strength of correlation. This suggests that there is no clear predominance of any style.

Figure 3 shows a similar conclusion on the absence of significant preferences in the selection of one or another strategy. There is no seeming inclination for any behaviour

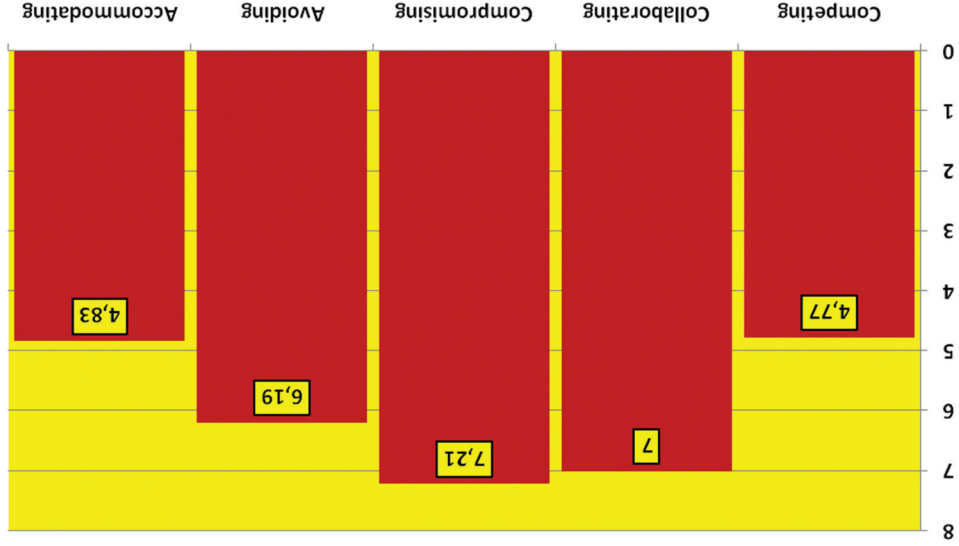


Figure 3. Indicators of average values of behaviour styles of student air traffic controllers in conflict situations per TKI-R in points (on a sample of 48 people from [6])

Taking into consideration that, according to [26], the IEBS group includes people with “accommodating” behaviour style, the last sentence sounds strange indeed. In addition, individuals with an “avoiding” strategy, of course, try to avoid the conflict, and, first of all, its resolution. Another example. As the author writes in [27]: “according to the research data of athlete student, being in a conflict situation, they apply such behaviour strategies as collaborating, compromising and competing. To a lesser extent they apply avoiding and accommodating behaviour styles. There are significant differences that were determined during detailed analysis of students’ behaviour styles (Table 2)” [27].

Table 2. Indicators of athlete students’ behaviour styles in conflicts (in scores) [27] per the TKI-R test

Behaviour style	Level of tendency towards conflict		
	High	Medium	Low
Competing	7.9±0.3	5.1±0.2*	1.8±0.2*
Collaborating	4.3±0.3	7.8±0.2*	7.3±0.5*
Compromising	5.1±0.3	6.5±0.3*	5.2±0.4
Avoiding	2.5±0.2	2.9±0.1	3.2±0.2
Accommodating	3.9±0.3	4.1±0.2	4.4±0.4

Note. *, $p < 0.05$, differences are reliable relative to indicators of students with high levels of tendency towards conflict

Results analysis. Let us compare the data with the results of our own experiments. In [6], we considered a group of 48 students (future air traffic controllers), but in somewhat different aspects. If we compare the sample from [6] with the sample from [26] (Figure 2), then it is obvious that in the sample of students of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPbSUCA) there are significantly more EBS students (according to the classification in [26]). Table 3 shows the correlations between the K. Thomas and the Buss-Durkee tests on a sample of 48 student air traffic controllers. As it can be seen, there are few significant

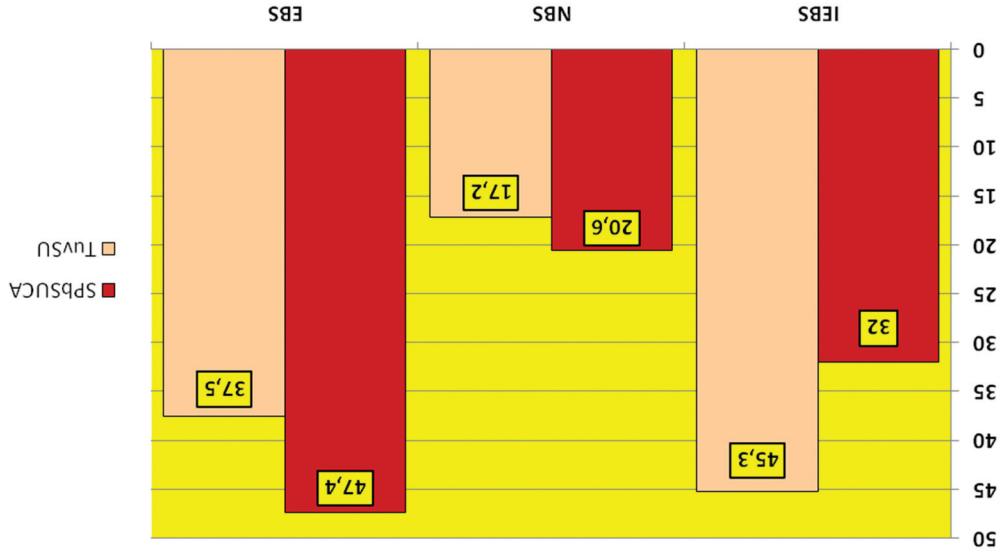


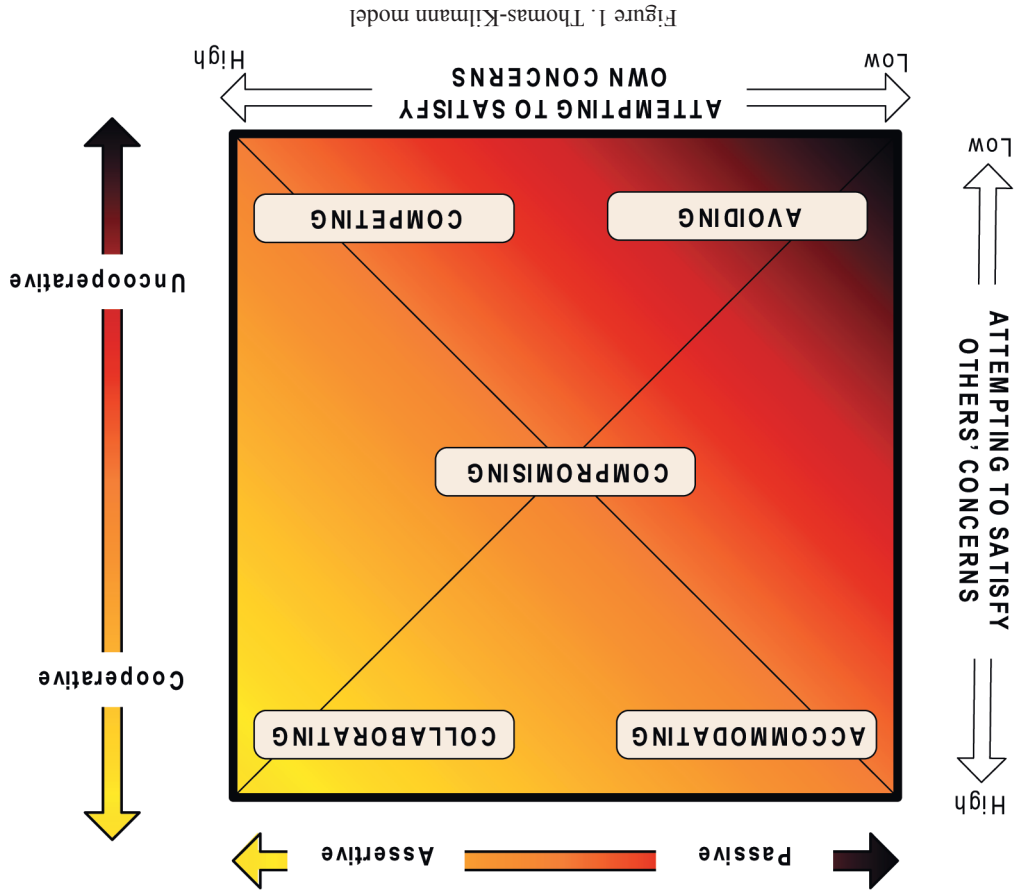
Figure 2. Comparison of the efficiency of behaviour strategies in a conflict situation identified among students of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPbSUCA) and the Tuvan State University (TuvSU)

In [26], a comparison of the Buss-Durkee test results [23] (where A_p is physical aggression, A_{ind} is indirect aggression, A_i an irritation, A_N is negativism, A_R is resentment, A_S is suspicion, A_V is verbal aggression and A_A is autoaggression) for individuals with different behaviour strategies (Figure 1). “Adequate diagnostic indicators of aggressiveness include physical aggression, as well as emotional experiences associated with aggression, i.e. irritation, negativism, resentment, suspicion, hostility and guilt. Analysis of the research results of the students’ level of aggression showed a relatively high level of suspicion in the NBS group with IEBS and EBS groups (Table 1). Probably, this is due to the fact that people, who prefer to avoid conflicts, are anxious, timid, avoidant. It is easier for such people to avoid conflict and remain neutral towards the source of the conflict. IEBS students have higher rates of irritation and negativism, they are characterized by impetuosity, emotionality, proactivity and therefore, only care about their own point of view and do not accept others’ opinion, do not allow compromises and agreements” [26].

Table 1. Average values of aggressiveness and hostility indicators of students per the Buss-Durkee test, scores [26]

Indicators	IEBS	NBS	EBS
A_p	4.4±0.5	4.0±0.7	4.4±0.4
A_{ind}	4.3±0.4	4.4±0.7	4.1±0.3
A_i	5.3±0.4	4.5±0.8	4.5±0.5
A_N	2.2±0.3	1.9±0.3	1.9±0.3
A_R	3.2±0.3	3.1±0.7	3.4±0.4
A_S	5.7±0.3*	6.6±0.5**	5.7±0.3*
A_V	6.4±0.4	6.6±0.5	6.0±0.8
A_A	6.3±0.4	6.5±0.5	5.9±0.3

Note: the data are given as arithmetic means (M) and their errors (m); * is a significant difference between IEBS and NBS groups; ** is a significant difference between NBS and EBS.



“The strategy (authors’ note: or style) of behaviour in conflict is an orientation of a person towards a conflict and towards certain forms of behaviour in a conflict situation” [20].

“In the early 1970’s Ralph H. Kilmann and Kenneth W. Thomas, using the theoretical model by Robert Blake and Jane Mouton, proposed an instrument to measure the manifestation of five main behaviour types in interpersonal conflict: competing, collaborating, compromising, avoiding and accommodating. That is called “Management-of-Differences Exercise” or MODE [21]. Similarity of the abbreviation with the term “mode” led to the fact that the authors of this instrument started calling it the “Thomas – Kilmann Conflict Mode Instrument (TKI)” meaning the conflict management tool. Using this instrument, it became clear that this is a powerful tool for managing interpersonal conflicts” [22]. (In Russian psychological literature the Russian-language version of the TKI-R test is more commonly known as the “K. Thomas test adapted by N.V. Grishina” [23]. This version was used by the authors in this paper). Usually, the so-called Thomas-Kilmann model is used to interpret the TKI test [24, 25] (Figure 1).

Tendency towards aggression. A large number of scientific publications are dedicated to the problem of conflict and the factors that influence the emergence and development of such conflict. It is logical to assume that tendency towards conflict and aggression should be connected with a positive correlation. In [26], the authors note that “based

on the collected data it can be concluded that individuals, who choose ineffective strategies of behaviour in conflict situations, have a higher level of aggression, which may be associated with conflicts and disputes that satisfy their own interests in conflicts”. Unfortunately, the authors of [26], while using TKI-R to assess the behaviour style, made further analysis of the results difficult by using non-standard terms. In particular, the authors write that “while evaluating the degree of realization of the interests by opponents and conflict resolution quality using a specific strategy in a conflict, we should talk about the efficiency of a behaviour strategy in a conflict. Efficiency is assessed based on two criteria: satisfaction and productivity. Based on these criteria collaborating and compromising were defined as effective behaviour strategies (EBS) because if they are used, the interests of counter-parties will be satisfied to a greater extent; competing and accommodating were defined as ineffective behaviour strategy (IEBS) because if they are used, the interests of only one party will be satisfied; avoiding is a neutral behaviour strategy (NBS), because in this case the interests of both parties are not satisfied” [26]. (From the authors’ point of view this is a strange classification. We suppose, if the strategies are ranked from the best to the worst, they will be presented as follows: collaborating, compromising, accommodating, competing and avoiding. According to the authors, the in-nobody’s-favour solution, when resolving the conflict is impossible, is the least effective strategy of all).

Introduction. Professional psychological selection (PPS) is a set of measures aimed at ensuring quality staff selection in an organization based on compliance assessment of the level of relevant psychophysiological (individual) qualities and characteristics of individuals with the professional requirements [1].

In most cases, such professional psychological selection involves an assessment of the level of some individual psychological and personal characteristics of candidates for specific professions that determine the success of their professional activity, in order to identify their compliance with the requirements of a specific profession [1], which, of course, includes aviation. Currently, in the Russian civil aviation the PPS is conducted in accordance with the Guidance [2].

It is well known that most flight accidents are associated with the human factor. Therefore, the problem of its negative impact will remain most important and urgent for many years. In order to reduce it, it is required to improve the reliability of professional psychological selection of aviation specialists [3, 4].

The authors have already pointed out in their papers, as for example in [5], the significant weakness of the current PPS [2]. In some papers, such as [6-10] and others, the authors considered various possible ways to increase its reliability. In this paper, the authors also intend to point out another aspect of this issue.

Problem definition. Failed interaction within the crew is

one of the primary or associated causes of all plane crashes that made the headlines over the last few years. As a rule, such failures of interaction are followed by conflicts of varied intensity. An example of such conflict is the An-148 crash in the Moscow region, when "the captain was trying to obtain higher readings (authors' note: critically low speed displayed by the instruments) by nosediving, while the co-pilot was opposing such actions. At the same time, the interaction between crew members was affected by psychomotor stress, pilots were swearing according to the voice recorder" [11]. A similar direct conflict was the reason of the Tu-134 crash near Ivanovo, when "virtually, the captain alone was piloting the plane, and didn't accept any information from the crew members" [12]. "Probably, co-pilot's and air navigator's mistakes made during landing approach in the Mineralnye Vody Airport were the reason for increasing tension between captain and crew members. The captain's comments could be the key factor in determining the style of the crew's future behaviour during the flight back to Ivanovo" [12]. When a Tu-134 crashed in Petrozavodsk, on the contrary, the air navigator was the leader in the situation. Investigators noted that one of the causes of the crash was "unsatisfactory interaction among crew members and crew resource management (CRM) on the part of the captain of flight 9605 during landing. The captain was following the air navigator's instructions, who was very active and under the influence of alcohol, and, in fact, while the co-pilot removed himself from the process at the final stage of the accident flight" [13]. Similarly, the investigation of the Yak-42 crash

[14] near Yaroslavl identified "uncoordinated actions of the crew during the last stage of the run" and heated debates with the use of strong language. The crashes near Kazan [15] and Perm [16] were characterized by conflicts between the onboard crew and air traffic controllers, as well as general perplexity, when both crew members avoided accepting responsibility for the aircraft control and "during the turn maneuver the crew were complaining about the dispatcher" [15, p. 232]. Similarly, "the dispatcher's instructions to seek guidance made the crew members, the captain in particular, extremely annoyed, which as confirmed by the instrumental analysis of speech (paragraph 1.16.6, time 22:51:40)" [16, p. 128]. Pointing out the current altitude, the dispatcher asked whether the aircraft was descending, which caused "a strong reaction of the captain, who emotionally asked to 'Tell the altitude! Tell the altitude!'. That question, as well as the captain's constant errors (call sign, frequency, flight levels) showed that his psychoemotional state and situation awareness were far from optimal" [16]. The perplexity and avoidance of responsibility are evident "at 23:08:55, when the left bank angle was 30°, and the speed was less than V_{avg} (authors' note: target speed of landing) the co-pilot asked the captain to take control ("...take it, take it, take it..."), obviously being conscious of his own inability to control the aircraft". However, by that time the captain was also unable to assume control the situation and the aircraft: "Take what (non-printable words), I can't do that either" [16, c. 147].

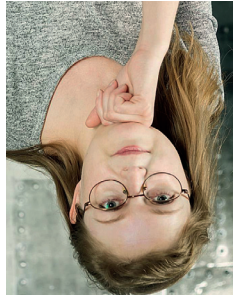
All the above examples of in-flight conflicts (and we only examined a few) show that improving the reliability of professional psychological selection of aviation specialists, especially pilots, it requires the research of the tendency of flight school applicants to conflicts, as well as the behaviour strategies employed in conflict situations, if such arise. Let us take a closer look at this problem.

Behaviour in conflict. "A conflict is understood as the most acute way to resolve significant contradictions that arise in the course of interaction that consists in based on opposition between the parties to the conflict and is accompanied by negative emotions" [17]. The necessary and sufficient condition of a conflict is the opposite motives or judgements of the subjects of social interaction [17].

The so-called interpersonal conflicts most often occur during flight. "An interpersonal conflict is a confrontation between interacting parties on the basis of the arisen contradictions, which include opposite aims that are not compatible in some specific situation. An interpersonal conflict can arise in the course of interaction between two or more people. In interpersonal conflicts the parties confront each other and sort out their relations face to face. This is one of the most common types of conflict" [18]. In other words, "an interpersonal conflict is a confrontation between parties perceived and experienced by them (or, at least, one of them) as a significant psychological problem, which requires its resolution and causes the activity of the parties, aimed at overcoming the contradiction and resolving the situation in the interest of one or both parties" [19].

Improving the reliability of professional psychological selection of aviation specialists

Olga V. Arinicheva, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia
 Alexey V. Malishevsky, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia



Olga V. Arinicheva



Alexey V. Malishevsky

Abstract. Aim. The paper examines one of the possible ways of improving the reliability of professional psychological selection of aviation specialists using the method of assessment of their behaviour strategy in conflict situations in order to prevent failures of interaction within aircraft crews and air traffic control shifts. **Methods.** The research used the Thomas-Kilman Conflict Mode Instrument (TKI) (more specifically, TKI-R, the Russian adaptation by N.V. Grishina) psychodiagnostic procedure to assess the behaviour strategy in conflict situations, as well as the Buss-Durkee Inventory to determine the tendency of subjects to various forms of aggressive behaviour. Statistical processing of the findings was done using the Bravais-Pearson correlation coefficient and Pearson's χ^2 criterion. **Results.** At the first stage of the multipurpose experiment 48 student dispatchers were surveyed, at the second stage the total of 603 subjects were surveyed (students of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation and the Institute of Philology, Foreign Languages and Media Communications of the Irkutsk State University), i.e. while emphasizing operator professions in order to improve the validity of the experiment the sample was significantly extended to include, among others, students of the humanities. It was found that the results of the Buss-Durkee Inventory have an inverse correlation with the tendency to an adaptation strategy and direct correlation with the tendency to rivalry and collaboration strategies. According to Pearson's χ^2 fitting criterion, there are significant differences in the manifestation of such behaviour styles as rivalry and avoidance between pilot and humanities students, while for the samples of males and females the differences are in the manifestation of such behaviour styles as rivalry, avoidance and compromise. Females are significantly less inclined to rivalry and somewhat more inclined to avoidance and compromise as compared to males. There are also no observable crucial differences between the intercorrelations of the TKI-R results of the first and second stages of the experiment. The authors' findings were compared with the published results of the survey of the students of the Tuvan State University and Yaroslavl State Medical University, as well as with the results of surveys of athletes and business owners. **Conclusions.** By generalizing own findings and those set forth in other authors' publications, we can conclude that uncooperative behaviour of all tested students is dominated by average manifestation of strategies of competing, collaboration, compromising, avoiding and accommodating, which indicates the ability of the subjects of this age for flexible behaviour in conflict situations subject to the specific conditions of interaction. That means that students, unlike the success-seeking business owners, while prioritizing collaboration and compromise in conflict situations, flexibly use other behaviour strategies. This must be taken into consideration when planning measures aimed at improving the reliability of professional psychological selection in commercial aviation. It appears that in view of the above reasons, the application of the TKI-R procedure in the professional psychological selection of aviation specialists is unviable.

Keywords: commercial aviation, professional psychological selection, psychological assessment, dependability, conflict, behaviour strategy.

For citation: Arinicheva O.V., Malishevsky A.V. Improving the reliability of professional psychological selection of aviation specialists. *Dependability* 2019;19(1): 40-47. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-40-47

locomotive crews]. Inzhenerny vestnik Dona 2017;4, <iv-don.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4438> [in Russian].

[12] Kaptsov VA, Mezentsev AP, Pankova VB. Proizvodstvenno-professionalny risk zheleznodorozhnikov [Professional risk of railway personnel]. Moscow: Reinform, 2002 [in Russian].

About the authors

Tatiana A. Finochenko, Candidate of Engineering, Head of Center for Professional Safety, Associate Professor,

Received on: 10.08.2018

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: fta09@bk.ru

Igor G. Pereverzev, Candidate of Engineering, Senior Lecturer in Life Safety, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: npcot@mail.ru

Marina V. Balanova, post-graduate student, Engineer, Professional Safety Research and Development Center, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: fmv04@mail.ru

References

- [1] Balanova MV, Pereverzev IG, Finochenko TA, Yait-skov IA. Problemy shumovogo diskomforta na rabochikh mestakh mashinistov kranov na zheleznodorozhnom khodu [Problems of noise-related discomfort at the workstations of rail crane operators]. In: Collection of scientific papers. The Actual Problems and Challenge Developments of the Transportation, Industry and Russian Economy (TransPromEc-2018). Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2017. p. 182-184 [in Russian].
- [2] National Safety Council: Accident Facts, 1996 (presently Injury Facts). Itasca (Illinois, USA); 1996. p. 34.
- [3] Gapanovich VA, Shubinsky IB, Zamyshlyayev AM. Risk assessment of a system with diverse elements. Dependability 2016;16(2):49-53. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-2-49-53.
- [4] Shubinsky IB, Zamyshlyayev AM, Pronovich OB. Graph method for evaluation of process safety in railway facilities. Dependability 2017;17(1):40-45. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-1-40-45.
- [5] Finochenko TA, Lysenko AV, Nazimko VA, Sheykho-va RG. Upravleniye skorstuyu staniyu i effektivnostyu adaptatsii v neblagopriyatnykh usloviyakh professionalnoy deyatelnosti: monografiya [Managing the aging rate and efficiency of adaptation in adverse working conditions: monograph]. Rostov-on-Don: DSTU Publishing; 2013 [in Russian].
- [6] Ermolenko VA, Vitshuk PV. Special aspects of calculation of lifting equipment reliability. Dependability 2016;16(2):20-25. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-2-20-25.
- [7] Chubar EP, Chukarin AN, Finochenko TA. Snizheniye urovney shuma na uchastkakh ispytaniy lokomotivov: monografiya [Noise reduction at locomotive test sites: monograph]. Rostov-on-Don: FGBOU VO RGVUPS; 2018 [in Russian].
- [8] Finochenko TA, Semiglazova EA. Professionalnyy risk na osnovov spetsializatsionnykh usloviy truda [Professional risk based on special evaluation of working conditions]. Inzhenernyy vestnik Dona 2017;3, <ivdon.ru/tu/magazine/archive/n3y2017/4355> [in Russian].
- [9] Yaitskov IA, Chukarin AN, Finochenko TA. Theoretical research of noise and vibration spectra in cabins of locomotive and diesel shunting locomotive. International Journal of Applied Engineering Research 2017;12(21):10724-10730. ISSN 0973-4562.
- [10] Shubinsky IB, Zamyshlyayev AM, Ignatov AN, Kibzun AI, Platonov EN. Use of automatic signalling system for reduction of the risk of transportation incidents in railway stations. Dependability 2017;17(3):49-57. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-3-49-57.
- [11] Yaitskov IA, Chukarin AN, Finochenko TA. Identifikatsiya proizvodstvennykh faktorov, vliyayushchikh na usloviya truda rabotnikov lokomotivnykh brigad teplovozov i motovozov truda [Identification of workplace factors affecting the working conditions of diesel-electric and gasoline working conditions of crane operators [12].
- Thus, reducing the noise and vibration is a relevant technical and economic task whose solution will allow improving the technical and operational characteristics, as well as the state of the body and the mental condition of the person creating the feeling of anxiety and irritation. The effect of noise on the central nervous system causes the increase of the latent period of visual motor reaction, leads to reduced mobility of nervous processes, changes in the electroencephalographic indicators, disrupts the bioelectric activity of the brain accompanied by overall functional changes in the body (starting with noise of 50 to 60 dBA), substantially changes the brain potentials, their dynamics, causes biochemical changes in the brain structures. Changes in the functional state of the central and autonomic nervous systems occur much earlier and at lower levels of noise than those causing reduced auditory sensitivity [5 – 7]. The above negative effects of noise cause crane operators to make errors and develop occupational health problems.
- Crane operators are also affected by general and local vibration. The general vibration is felt under the feet and on the seat of the operator, local vibration affects the control handles. Vibration is generated by the running engine that sends it to the operator's cabin via the rigid frame. During a crane's operation vibrations occur both in the vertical and horizontal planes. The bouncing of the crane's mechanisms has the frequency range of 1.5 to 8.0 Hz. The cross shake that is imparted to the control cabin as the load swings has the frequency range of 0.2 to 1.0 Hz.
- Given that the resonance frequency of human organs is within the range of 1 to 15 Hz, the operator is exposed to vertical oscillations of the most unfavorable range.
- Vibration is also a physical factor of high biological activity. In case of lasting exposure it causes chronic occupational health problems, the hand-arm vibration syndrome disease that is the second on the list of railway personnel occupational health problems. General vibration primarily affects the supporting-motor apparatus and causes pains in the lower back, extremities, joints, muscles, tendons and around the stomach. The hand-arm vibration syndrome is manifested as systemic abnormalities with vascular tone disorder, absence of appetite, insomnia, irritability, easy fatigability and pain sensitivity. Workers affected by vibration experience vertigoes, decomposition of movement, symptoms of motion sickness. Shock vibration is especially hazardous as it causes microtraumatization of various tissues with subsequent changes in them. Changes in metabolic processes, blood chemistry values are observed. General vibration with frequencies lower than 0.7 Hz (rocking) causes sea sickness as the result of disrupted vestibular system activity [5]. Vibration measurements made in the cabins of KZh-1572A and DGKu cranes showed that the levels of vibration (on the floor) are between 100 and 116 dB which exceeds the maximum permissible values by up to 9 dB (per vibration velocity levels) [8 – 11].

As it is known, load-lifting rail cranes employed as part of repair and recovery trains are high-risk facilities. They normally have large dimensions and powerful engines that generate significant thrust and high energy. These circumstances largely define the high levels of the factors of operating conditions and workflow at the workstations of crane operators.

Rail crane operators' work is not associated with excessive physical activity, however, it requires significant nervous and emotional effort, tension in the visual and auditory analyzers. The causes of accidents associated with the operation of cranes, along with the technical failures and "physical fatigue" of crane structural components, include the "human factor", i.e. errors by crane operators associated with reduced productivity and fatigue in the course of the working shift. That is due to the powerful and lasting vibration and noise affecting the operator and generated by the crane's mechanisms in the course of operation. These effects cause reduced performance during the work shift, while if such effects are lasting and recurring there is a risk of occupational health problems [1-4].

The sources of noise affecting rail crane operators should be divided into several groups:

- noises produced by the crane moving along the track. Despite the fact that the crane does not move fast when handling cargo, the operation is associated with the interaction between the rough surfaces of the wheel and rail, impacts within automatic coupling devices between the crane and flatcars. In this case the noise is nonstationary stochastic pulse processes.
- noises generated by main equipment (diesel generator, traction motor, speed transformer). As it is known, wear and tear of cogged wheels causes a significant increase of vibration in the speed transformer and traction motor frame.
- noises generated by auxiliary equipment (electrical machines and rectifying installation cooler fans, air conditioning system of the cabin). The sound power level of a fan is in complicated dependence with its parameters. For instance, as the blade speed increases the aerodynamic noise grows more rapidly than mechanical one, therefore a well-designed fan predominantly produces aerodynamic noise.

Depending on the design of rail cranes the level of noise they produce may differ. The paper cites the findings of experimental studies of the levels of noise for various models of cranes.

Thus, for the KZh-1572A hydraulic crane intended for loading operations on 1520 mm gauge tracks, the primary sources of noise are the carriage and pivoting frames connected with a 360-degree rotation crown installed on two four-axle bogies fitted with a hydraulic travelling mechanism, as well as the crane's engine. The measurement data of the noise levels at the workstations where the operator is to be at during the operation and maintenance of the crane are given in Table 1.

The measurements were taken using an Assistant Total+ noise and vibration analyzer in the course of operation of rail cranes when handling cargo.

The DCKu railcar is one of the models of rail crane. Its design includes a load-lifting crane. It is intended for loading, unloading and transportation of loads, including 25-meter rails on its own platform or coupled flatcar, transportation of workers to work sites, conducting shunting operations in station tracks. The measurement data for the DCKu railcar in cargo handling mode are given in Table 2.

It should also be noted that when the operator is in the control cabin even if the engine idles, the noise can be as high as 52 to 63 dBA, or 61 to 78 dBA if the operator is communicating with the dispatcher via the radio. Thus, among the harmful physical factors affecting crane operator workstations noise stands out as a persistent high-intensity factor whose prolonged effect causes easy fatigability, hearing loss, reduced performance.

The effects of noise on the human body are not limited to the auditory organ. Through the fibers of auditory nerves the stimulation is transmitted to the central and autonomic nervous systems and thus affects the internal organs and causes significant changes in the functional

Table 1. Levels of noise at the workstations of track machine operators, KZh-1572A rail crane

Measurement point	Center frequency band, Hz									dBA
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
RC	95	95	87	81	78	75	73	71	69	80
control cabin	104	105	88	86	83	78	76	82	76	83
engine platform	107	110	110	104	105	101	95	95	90	84

Table 2. Levels of noise at the workstations of track machine operators, DCKu rail crane

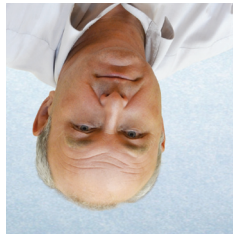
Measurement point	Center frequency band, Hz								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RC	95	95	87	81	78	75	73	71	69
transport mode	96	96	88	85	82	82	76	74	68
operating mode	95	92	90	88	83	80	74	71	61
									84

Physical factors affecting the reliability of rail crane operators

Tatiana A. Finochenko, Candidate of Engineering, Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia
Igor G. Pereverzev, Candidate of Engineering, Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia
Marina V. Balanova, Post-graduate Student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia



Tatiana A. Finochenko



Igor G. Pereverzev



Marina V. Balanova

Abstract. As it is known, load-lifting rail cranes of various models employed as part of Russian Railways repair and recovery trains are high-risk facilities. They normally have large dimensions and powerful engines that generate significant thrust and high energy. The paper examines the effects of harmful occupational factors of physical nature, i.e. industrial noise and vibration on the performance and health of rail crane operators. **Aim.** Based on the analysis of the causes of incidents that occurred in the course of operation of rail cranes, generalizing the experimental findings regarding the effects of industrial noise and vibration on crane operators and identifying the correlation between the clinical signs of distress in this category of workers and the levels of the above harmful physical factors. **Methods.** Experimental studies and the subsequent evaluation of the effect of industrial noise and vibration generated by the mechanisms of cranes were conducted with the use of an Assistant Total+ noise and vibration analyzer in the course of operation of rail cranes of various models when handling cargo, as well as when crane engines idle. Measurements were conducted at workstations where the operator is to be at during the operation and maintenance of the crane, i.e. the control cabins, operator seat, control handles, near the crane engine. **Results.** The paper provides a classification of sources of noise and vibration that affect crane operators, experimental findings regarding the levels of industrial noise, general and local industrial vibration for various models of cranes. Clinical signs of distress are identified, a list is set forth of the most typical occupational health problems for this category of workers. **Conclusions.** The paper concludes that the reduction of industrial noise and vibration caused by the mechanisms of rail cranes is a relevant engineering and socioeconomic problem. From the socioeconomic point of view the solution to this problem will allow improving the working conditions of crane operators, while in terms of engineering it will enable higher technical and operational characteristics of crane mechanisms.

Keywords: working conditions, harmful occupational factors, rail crane, industrial noise, local industrial vibration, general industrial vibration, sources of industrial noise, sources of industrial vibration.

For citation: Finochenko T.A., Pereverzev I.G., Balanova M.V. Physical factors affecting the reliability of rail crane operators. *Dependability* 2019;1: 36-39. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-36-39

technical systems. Dependability 2018;18(2):17-24. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-2-17-24.

[9] Morozov DV, Chermoshentsev SF. Model lokalizatsii otkazov v apparature sistemy upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata pri ispol'zovanii gibkogo algoritma funktsionirovaniya v polete [Model of failure location in the control system equipment of unmanned aerial vehicles in flight using a flexible operation algorithm]. Proceedings of MAI 2018;99 [in Russian], <http://trudymai.ru/published.php?ID=91997>.

[10] Morozov DV. Binarnaya ierarhicheskaya model sistemy upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Binary hierarchical model of the control system of an unmanned aerial vehicle]. Sistemy upravleniya bespilotnymi kosmicheskimi i atmosferynymi letatel'nymi apparatami: tezisy dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Control systems of unmanned space and atmospheric aerial vehicles: Abstracts of the IV national science and technology conference, Moscow, 2017. p. 132-133 [in Russian].

[11] Morozov DV. Metodika opredeleniya poter v reshenii zadach povysheniya nadezhnosti funktsionirovaniya sistemy upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata v polete [Method of loss calculation as part of improving the functional dependability of the control systems of unmanned aerial vehicles in flight]. Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo» [Proceedings of the international symposium Dependability and quality. Volume 1]. Penza: PSU, 2018. p. 139-144.

[12] Makoveev OL, Kostyunin SY. Evaluation of safety and reliability parameters of supervision and control systems. Dependability 2017;17(1):46-52.

About the authors

Denis V. Morozov, post-graduate student, Kazan A.N. Tupolev National Research Technical University – KAI(KNRTU – KAI), Institute for Computer Technologies and Information Protection, Kazan, Russia, e-mail: i_am_morozov@mail.ru

Sergey F. Chermoshentsev, Doctor of Engineering, Professor, Head of Chair of Computer-Aided Design Systems, Kazan A.N. Tupolev National Research Technical University – KAI(KNRTU – KAI), Institute for Computer Technologies and Information Protection, Kazan, Russia

Received on 17.12.2018

process, out of the ACC subset per minimal $P_{*}^{(i)}$ of the next ESC till a one-element subset is obtained and/or the corresponding decision is taken.

References

- [1] Chermoshentsev SF. Informatsionnye tekhnologii elektronnykh sredstv [Information technology of electronic compatibility of electronic devices]. Kazan: Kazan State Technical University Publishing, 2000 [in Russian].
- [2] Morozov DV. Elektromagnitnaya sovsestimmost elektronnykh sistem bespilotnykh letatelnykh apparatov pri vozdeystvii elektromagnitnykh voln [Electromagnetic compatibility of the electronic systems of unmanned aerial vehicles when exposed to electromagnetic waves]. In: Gorokhov AA, editor. Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike: sbornik nauchnykh trudov 4-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; V 4-kh tomakh, Tom 3. [Today's innovations in science and technology: proceedings of the 4-th international research and practice conference, In 4 volumes. Volume 3]. Kursk: South-West State University, 2014. p. 124-127 [in Russian].
- [3] Kirpichnikov AP, Vasiliev SN. Particular characteristics of today's microelectronics and matters of highly dependable and secure control systems design. Dependability 2017;17(3):10-16.
- [4] GOST 19919-74. Test automated of technical condition of aviation technique articles. Terms and definitions. Izdateilstvo standartov, 1975 [in Russian].
- [5] Pashkovsky GS, Ushakov IA, editor. Zadachi optimal'nogo obnaruzheniya i poiska otkazov v REA [Problems of optimal failure detection in electronic equipment]. Moscow: Radio i svyaz, 1981 [in Russian].
- [6] Shubinsky IB. Funktsionalnaya nadezhnost informatsionnykh sistem: Metody analiza [Functional dependability of information systems. Analysis methods]. Moscow: Dependability Journal, 2012 [in Russian].
- [7] Morozov DV. Povyshenie nadezhnosti funktsionirovaniya sistemy upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata v polete [Improving the functional dependability of the control systems of an unmanned aerial vehicle in flight]. Herald of the Kazan A.N. Tupolev State Technical University 2017;3(89):112-118 [in Russian].
- [8] Cherkesov GN, Nedosekin AO, Vinogradov VV. Functional survivability analysis of structurally complex

The components of formula (4) are calculated based on the procedure of risk of loss identification as part of improving the functional dependability of UAV CS in flight [9, 11] and is shown in Table 1. The selection of the i -th ESC itself and construction of the optimal strategy of failure location is based on the application of the combined branch-and-bound method (BBM). When the combined BBM is used, for the purpose of constructing optimal self-supervision programs the sequential use of ESCs in the process of self-supervision is considered as a multistage process, and the application of any ESC at a random stage is considered as the subdivision of the set of the states of OBTI allowable at such stage into two parts, to one of which belongs the true state.

The idea of combined BBM as part of the design of the optimal OBTI self-control algorithm consists in the consecutive selection at each stage of ESC implementation process,

where $\tilde{Q}^{EFMSE}(M-i)$ is the probability of failure of self-supervision facilities of the functional component of the OBTI EFSME.

$$P^{FD}(i) = P^{FD}(i) + P^{PP}(i) \tilde{Q}^{EFMSE}(M-i), \quad (4)$$

this case formula (2) is as follows:

prediction of the risk of loss from its implementation. The probability of false discarding of OBTI per the i -th ESC is taken as the risk of loss [9, 11, 12]. $P^{FD}(i)$ is calculated based on the procedure of risk of loss identification as part of improving the functional dependability of UAV CS in flight [9, 11] according to formula (2). The implementation of the next ESC in the course of OBTI self-supervision may cause a probability of its false discarding. For that reason this probability is estimated for each ESC that make the ACC of the current step of location. In formula (2) $P^{FD}_{max}(M-i)$ can be estimated through the probability of failure of the self-supervision facilities of the functional component of the OBTI EFSME per the remaining ESCs of the ACC. In this case formula (2) is as follows:

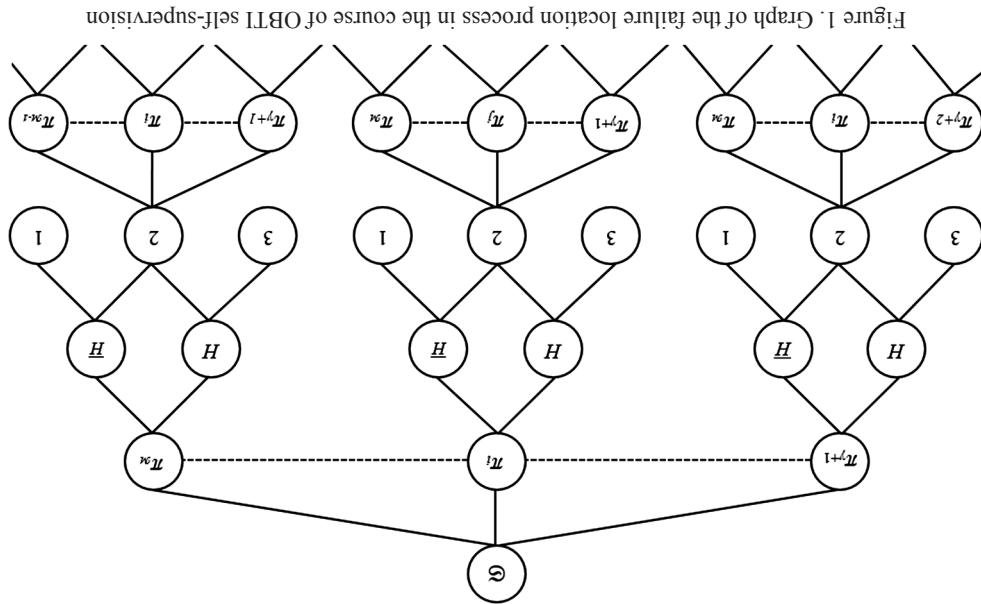


Figure 1. Graph of the failure location process in the course of OBTI self-supervision

out of the subset $\Theta = \{\pi^{j+1}, \dots, \pi^M\}$ per the minimal $P^{FD}(i)$ of the next i -th ESC till a one-element subset is obtained and/or the corresponding decision is taken.

This process is represented by a graph in Figure 1 where the apexes of the corresponding subset $\Theta = \{\pi^{j+1}, \dots, \pi^M\}$ are the results of ESC implementation, corresponding decisions, while the arcs are the logical connections between the apexes. Decisions 2 and 3 correspond to the ESC result "OK", while the decisions 1 and 2 correspond to the result "not OK". Let us examine the left branch of the graph. Let us assume that based on the analysis of the initial ACC per the minimal $P^{FD}(i)$ the $(j+1)$ -th ESC was selected. Its implementation can return "OK" or "not OK", but decision d_c was taken, i.e. continue failure location. On this basis the ACC is specified and in this case $\Theta^i = \{\pi^{j+2}, \dots, \pi^M\}$. At stage i of failure location $P^{FD}(i)$ is calculated, $i = j+2, M$, i -th ESC of Θ^i , and per the minimal $P^{FD}(i)$ the next ESC is selected for implementation. The branching process continues until decision 1 or 3 is taken.

Conclusion

The method of improving the functional dependability of UAV CS allows defining the strategy of in-flight UAV application:

- a) if the failure belongs to OBTI EFSME, about the UAV mission and bring it back to LS.
- b) implementing the procedure of modification of the UAV CS algorithm, if the failure belongs to OBTI SE; location in the course of the self-supervision must have the optimal depth.

If it is decided to continue the failure location, another ESC is selected, which is associated with the risk of loss. The probability of false discarding of OBTI due to ESC selected out of ACC is taken as the risk of loss.

The paper proposes a BBM-based solution that consists in sequential selection at each stage of ESC implementation

Table 1. Components of the model of BTT failure location in the course of self-supervision

Num- bers of graph nodes	δ_1	δ_2	$1-\delta_2$	ESC classification	ESC result hypothesis	PSSF-SPS					Solution		$P^{FD}(t)$	$P^{PP}(t)$	$\tilde{Q}^{EFME}(M-t)$	$P^{FD}(t)$
						$\underline{H}$	H	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
8.4	1	0	1	1	0	1	-	0	1	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t}$	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$
8.5	1	0	1	1	0	1	-	1	0	0	1	0	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$
8.6	1	0	1	1	0	0	0	-	1	1	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$
8.1	1	0	1	0	1	1	-	-	0	0	0	0	0	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$
8.2	1	0	1	0	1	1	1	-	0	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} (1 - R^{EFME_t})$	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} (1 - R^{EFME_t})$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$
8.2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} (1 - R^{EFME_t}) \times \Phi^{EFME_t}$	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} (1 - R^{EFME_t}) \times \Phi^{EFME_t}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \tilde{Q}^{EFME}(M-t)$
8.7	0	1	0	0	1	1	-	-	1	0	0	$1 - P^{SE_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.8	0	1	0	0	1	1	-	-	0	1	0	0	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.12	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	$P^{SE_t} (1 - R^{SE_t})$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.13	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.15	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	$P^{SE_t} (1 - R^{SE_t}) \times \Phi^{EFME_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.16	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.9	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	$P^{SE_t} (1 - R^{SE_t})$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.10	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.19	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	$P^{SE_t} R^{SE_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.20	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.21	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.18	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{SE_t} R^{SE_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.22-8.25	0	0	1	0	1	1	-	-	1	0	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.28	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.29	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.27	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$
8.30	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	$1 - e^{-\sum_{i=1}^t \lambda_{EFME_i}}$	$P^{EFME_t} R^{EFME_t} \times \Phi^{EFME_t}$

The purpose of OBTT self-supervision is the failure location with a depth that allows identifying its ability to perform the primary operations with the probability not lower than P^* and the allowed set of ECS in this case.

The π_j -th EC returned "not OK". In this case the entire set Π of ECS (ECSs) is divided into two non-overlapping subsets (if $\gamma \neq 1$ and $\gamma \neq \mathcal{M}$):

$$\Pi_1 = \{\pi_1, \dots, \pi_\gamma\} \text{ is the subset of implemented ECSs (ECSs),}$$

$$\Pi_2 = \{\pi_1, \dots, \pi_\gamma\} \text{ is the subset of non-implemented ECSs (ECSs).}$$

The following were defined: PSSF ($\mathcal{C}$) that includes $\{b_j\}$ CSEs of BTI and ACC ($\mathcal{S}$), i.e. area of EC (ECS) that covers the PSSF. $\mathcal{S} \subseteq \Pi_2$ is sufficient for the failure location. In terms of functionality, ECSs (ECSs) can be basic and auxiliary.

Based on the current ESC results a decision can be taken out of the following options:

- decision 1: stop the checks and reject the OBTT,
- decision 2: continue failure location,
- decision 3: stop the failure location and continue execution of UAV CS flight plan per modified algorithm.

At the final stage of OBTT self-supervision the second decision degenerates into the first or the third one. Due to that the set $\mathcal{D}$ contains two basic elements: d_s , decision to continue the failure location and d_{ss} , decision to stop the failure location. The second and third decisions define the depth of OBTT self-supervision.

At each stage t_i of failure location in OBTT, based on the results of ESC, the ACC and PSSF are analyzed, which includes verifying the ACC for sufficient coverage of the PSSF ($\mathcal{C} \subseteq \mathcal{S}$), based on which the appropriate decisions are taken. In this case areas $\mathcal{W}_i^{\mathcal{C}}, \mathcal{W}_i^{\mathcal{S}}, \mathcal{W}_i^{\mathcal{C} \cap \mathcal{S}}(t_i)$ are formed, i.e. the area of observable data (processes of changes in the areas $\mathcal{C}, \mathcal{S}$), within which the following decisions are taken

$$d^c = (d_{11}^c, d_{10}^c, d_{01}^c) \text{ and } d_{00}^c$$

where d_{11}^c is the decision to continue the failure location, as in PSSF there are $\{b_j\} \in \mathcal{S}$, OBTT EFMSE, d_{10}^c is the decision to continue the failure location, as in PSSF $\{b_j\} \in \text{OBTT SE}$, provided $P_{\text{MP}}^{\text{MP}} < P^*$, $P_{\text{MP}}^{\text{MP}}$ is the mission performance probability used as the criterion of UAV CS efficiency. It is applicable when changes in an object's characteristics cause only partial reduction of the functional efficiency. We understand this indicator [7] as the a posteriori probability of absence of failures in the CS equipment required and sufficient for successful completion of UAV CS mission.

d_{00}^c is the decision to next implement the i -th ESC, $\pi^{\mathcal{W}}(t_i)$ is the area within which final decisions are taken

$$d_s = (d_{10}^s, d_{01}^s)$$

where d_{10}^s is the decision to stop the checks and discard the OBTT, as in PSSF there are only $\{b_j\} \in \text{OBTT EFMSE}$, d_{01}^s is the decision to stop location and allow OBTT to continue the mission per a modified functional program of CS, since in PSSF $\{b_j\} \in \mathcal{S}$ and $P_{\text{MP}}^{\text{MP}} \geq P^*$.

Description of the solution method

We assume that there is one failed CSE within the OBTT.

Based on the properties of the binary diagnostic model of the OBTT the initial PSSF and ACC are generated. They are then analyzed using the obtained results. For the ACC it consists in the definition of the functional composition of the ESC that can be basic and auxiliary, while for the PSSF it leads to the corresponding decision d_c or d_s . If the results of analysis fell within the area $\mathcal{W}_i^{\mathcal{C}}$, the next ESC is selected out of the initial ACC. The application of the i -th ESC for failure location in OBTT can be regarded as the subdivision of the PSSF set into two subsets $\mathcal{C}_j$ and $\mathcal{C}_p$, with the result of π_i implementation of the i -th ESC unambiguously defining the belonging of the failed CSE to one of these subsets: sub-set $\mathcal{C}_j$ if the result is "OK" and subset $\mathcal{C}_p$ if the result is "not OK". Further failure location, obviously, can only involve ESCs essential to the current PSSF. Therefore, in the process of selection of the i -th ESC the ACC is specified, where upon the implementation of such ESC only essential ones must remain. The selection of the next ESC is based on the

$$(3) \quad \gamma(\delta) = \min P_{\text{FD}}^{\text{FD}}(i) \text{ if } P_{\text{MP}}^{\text{MP}} \geq P^*.$$

and is a random value. Thus, the task at hand comes down to designing the optimal ESC strategy that minimizes the probability of false discarding

$$\tau(\delta_i) = \inf \left\{ \gamma(\delta_i) : d(t_i) \in \mathcal{D} \right\}$$

sequence as well depends not only on the set of decisions $\mathcal{D}$, but their selection. The moment of termination of OBTT self-supervision

the course of the i -th ESC.

$P_{\text{FD}}^{\text{FD}}(i)$ is the probability of false discarding of OBTT in and EFMSE.

$P_{\text{PD}}^{\text{PD}}(i)$ is the probability that as the result of implementation of the i -th ESC, in $\mathcal{C}$ there will be both elements of SE

false discarding in the course of remaining ESCs,

where $P_{\text{max}}^{\text{FD}}(M-i)$ is the estimation of the probability of

$$(2) \quad P_{\text{FD}}^{\text{FD}}(i) = P_{\text{FD}}^{\text{FD}}(i) + P_{\text{PD}}^{\text{PD}}(i) P_{\text{max}}^{\text{FD}}(M-i),$$

identified according to formula [11, 12]. The probability of false discarding of OBTT due to ESC selected out of ACC is taken as the risk of loss. It is identified according to formula

$$(1) \quad \delta_i(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_i) = \begin{cases} d_{10}^s \text{ if } \mathcal{C}_i, \mathcal{C}_i \in \mathcal{W}_i^{\mathcal{C}}, \mathcal{C}_i \in \mathcal{W}_i^{\mathcal{S}}, i \geq 0, \\ d_{01}^s \text{ if } \mathcal{C}_i, \mathcal{C}_i \in \mathcal{W}_i^{\mathcal{C}}, \mathcal{C}_i \in \mathcal{W}_i^{\mathcal{S}}, i \geq 0, \end{cases}$$

sequential rule $\delta = \{\delta_i(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_i), \mathcal{C}_i \in \mathcal{W}_i^{\mathcal{C}}, \mathcal{C}_i \in \mathcal{W}_i^{\mathcal{S}}, i \geq 0\}$ with plan-

ning of observations, has the form

Decision $d(t_i) = \delta_i(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_i)$ that conform to the general

Introduction

In terms of the employed technological solutions, to-

day's unmanned aerial vehicles (UAV) can be described as complex technical systems. The inclusion of a control computer (CC) into the control system (CS) enabled a significant extension of UAV functionality and missions. Not only the supervision and diagnostics functions were implemented onboard, but the flight of UAV was made completely automatic. Successful application of UAV depends on the reliable operation of all onboard systems. UAVs often operate in adverse electromagnetic environments caused by the presence of many characteristic external and internal factors [1, 2, 3]. That caused increased failure rate in UAV CS. The UAV CS [4, 5] consists of onboard test instrumentation (OBTI), its self-supervision system (SSS) and onboard mission equipment (OBE). The existing and future UAV CS under development use binary reliability models, i.e. two states are distinguished [4, 5]: up and disabled. Therefore, each in-flight failure is classified as the UAV CS failure regardless of the current mission. In this case the UAV in-terrupts mission performance and returns to the launch site (airfield) for the purpose of identification and replacement of the failed component. The replacement addresses either the failed unit or a line replacement unit.

However, if we regard a CS as a multifunctional system, it becomes obvious that the failure of not any UAV CS functional element [6, 7, 8] causes the impossibility of further mission performance. Thus, the unequal significance of the failures of different functional elements of UAV CS in terms of mission performance allows, by changing the CS operation algorithm, increasing the efficiency of UAV deployment. The flight plan can be modified based on the principle of exclusion of damaged areas with subsequent continuation of operation using the remaining functions. Since the completion of every task requires the fulfillment of a certain set of control and supervision operations implemented by the respective technical facilities, the CS OBTI includes supervisory equipment (SE) for up state supervision (USSSE), operation (OSE) and emergency flight mode (EFMSE) of a UAV [7, 9].

The aim of this paper consists in the development of a method of improving the functional dependability of UAV CS affected by electromagnetic effects in flight and failures within the functional component of OBTI. That is achieved through the identification of the failed functional element, the functional component of OBTI, the capability to perform the target objective of the UAV CS and decision-making regarding the initiation of the flexible operation algorithm.

Definitions used in the method

In [10], it is proposed to use a binary hierarchical model (BHM) of UAV CS. It involves the subdivision of the CS into local functional components, which is caused by the requirement to evaluate their effect on the final results of UAV CS mission performance in flight and the capability

Problem definition

There is a UAV CS that consists of an OBTI, OBE and SSS. The components of this system are represented with a binary diagnostic model (BDM) [10]. For each functional element of the BDM there are known failure rates represented with row vectors. Using EC (ESC), the operability of all CSEs of CS OBE (OBTI CSE) is supervised, therefore the EC (ESC) can have two definitive outcomes, i.e. "OK" and "not OK". The reliability of UAV CS must be ensured with the required probability P^* . The time of the latest supervision of CS OBE and self-supervision of OBTI is known. EC overlap per OBTI elements. Each EC is associated with an ESC in the course of self-supervision. The OBTI has a failure belonging to one CSE that does not allow executing a part of the EC (set of ECs) of CS OBE.

to modify its operation algorithm. Each operation is implemented by its own set of elements that in the general case overlap [9, 11]. The overlapping of such elements subdivides the OBTI into non-overlapping combinatorial subsets of elements (CSE) each of which implements a precise set of elementary operations.

Definition 1. Elementary operation (EO) is the maximum set of operations on signals constant in all tasks (implemented completely with the execution of any task) performed under the control of a computer and/or human operator.

Definition 2. Elementary check (EC) is a set of EOS required and sufficient for the verification of an individual parameter (attribute) of the object of supervision.

Definition 3. Elementary self-check (ESC) is a set of EOS required and sufficient for the verification of an individual parameter (attribute) of the object of supervision.

Definition 4. Supervised part of set (SPS, $\mathcal{R}_i$) is a subset of OBTI CSE covered by the i -th EC (ESC)

$$\{b_1, \dots, b_j\} \in \mathcal{R}_i$$

Definition 5. Part of set suspected of failure (PSSF, $\mathcal{Q}$) is an area of CSE(a) formed by the overlapping of the $\mathcal{R}_i$ of the i -th ESC, in which a failure has been identified with $\mathcal{R}_i$ of previous ESCs

$$\{b_j\} \in \mathcal{R}_i \cap \mathcal{R}_j \in \mathcal{Q},$$

where $\mathcal{R}_i$ is the SPS of the i -th ESC in which a failure was identified,

$$\mathcal{R}_j, j = 1, i-1$$

is the SPS of ESC performed before the i -th ESC that returned "OK".

In the course of ESC as part of OBTI self-supervision it may occur that $\mathcal{R}_j = \emptyset$, i.e. PSSF is the same as the SPS of the i -th ESC.

Definition 6. ESC (π_j) is essential to $\mathcal{Q}_p$ if simultaneously $\mathcal{Q}_i \cap \mathcal{Q}_j \neq \mathcal{Q}_p$ and $\mathcal{Q}_i \cup \mathcal{Q}_j \neq \emptyset$.

Definition 7. Elementary checks (EC) that ensure UAV CS, control in emergency flight mode called basic.

The remaining ECs are auxiliary. Each EC corresponds with an ESC.

Method of improving the functional dependability of the control systems of an unmanned aerial vehicle in flight in case of failure in the onboard test instrumentation

Denis V. Morozov, Kazan A.N. Tupolev National Research Technical University – KAI (KNRTU – KAI), Kazan, Russia
Sergey F. Chermoshentsev, Kazan A.N. Tupolev National Research Technical University – KAI (KNRTU – KAI), Institute for Computer Technologies and Information Protection, Kazan, Russia



Denis V. Morozov



Sergey F. Chermoshentsev

Abstract. The Aim of this paper consists in the development of a method of improving the functional dependability of the control systems of unmanned aerial vehicles (UAV CS) affected by electromagnetic effects in flight and failures within the functional component of the onboard test instrumentation (OBTI). That is achieved through the identification of the failed functional element, the functional component of OBTI, the capability of performing the target objective of the UAV CS and decision-making regarding the initiation of the flexible operation algorithm. The existing and future UAV CS under development use binary reliability models, i.e. two states are distinguished: up and disabled. Therefore, each in-flight failure is classified as the UAV CS failure regardless of the current mission. If we regard a CS as a multifunctional system, it becomes obvious that the failure of not any UAV CS functional element causes flight termination. Solving the problem involved the use of a CS diagnostic model in the form of binary relations between the control actions and combinatorial subsets of functional elements, risk of losses estimation method as part of improving the functional dependability of UAV CS in flight, decision theory and combined branch-and-bound method. The mission performance probability is used as the efficiency criterion. This criterion is applicable when changes in a UAV CS' characteristics cause only partial reduction of the functional efficiency. **Results.** The purpose of OBTI self-supervision is failure location with the depth that allows determining its ability to perform the basic operations with the probability not lower than required by the customer, as well as the allowed set of elementary checks (EC) in this case. Based on the current results of elementary self-checks (ESC), one of the following decisions can be taken: stop the checks and discard OBTI; continue location; stop failure location and continue UAV CS mission per modified algorithm. At each stage of failure location in OBTI, based on the results of ESC, the area of covering check (ACC) and part of set suspected of failure (PSSF) are analyzed, which includes verifying the ACC for sufficient coverage of the PSSF, based on which appropriate decisions are taken. The following areas are formed: the area of observable data (processes of changes in the ACC and PSSF areas), within which the decision is taken to continue the checks, and the area, within which it is finally decided to terminate the checks. If it is decided to continue the failure location, another ESC is selected, which is associated with the risk of loss. The probability of false discarding of OBTI due to ESC selected out of ACC is taken as the risk of loss. The moment of termination of OBTI self-supervision depends not only on the set of decisions, but their sequence as well. Thus, the task at hand comes down to designing the optimal ESC strategy that minimizes the probability of false discarding. The idea of combined branch-and-bound method (CBBM) as part of the design of the optimal OBTI self-supervision algorithm consists in the consecutive selection at each stage of ESC implementation process, out of the subset of minimum risk checks of the next ESC till a one-element subset is obtained and/or the corresponding decision is taken. **Conclusions.** The developed method allows continuing the performance of the target objectives of a UAV CS in flight when affected by failures in OBTI.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control system, self-supervision, combinatorial subsets of elements, part of set suspected of failure, binary diagnostic model, probability of false discarding, combined branch and bound method, risk of loss.

For citation: Morozov DV, Chermoshentsev SF. Method of improving the functional dependability of the control systems of an unmanned aerial vehicle in flight in case of failure in the onboard test instrumentation. *Dependability* 2019;1: 30-35. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-30-35

3. Structural optimization of pipeline systems should be achieved by defining the values of F_x for each of the alternatives with subsequent adoption of a solution that enables the highest level of resilience against the development of progressive damage processes.

References

- [1] Winston R, editor. Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook. John Wiley & Sons, Inc.; 2015.
- [2] Menon SE. Pipeline Planning and Construction Field Manual. Gulf Professional Publishing, USA; 2011.
- [3] Silowash B. Piping Systems Manual. The McGraw-Hill Companies, Inc.; 2010.
- [4] Sverdlov A.B. Dependability analysis of gas compression units. Dependability 2015;2(53):65-67.
- [5] Tkachev OA. Reliability analysis of networks consisting of identical elements. Dependability 2014;(1):45-59.
- [6] Cherkesov GN, Nedosekin AO, Vinogradov VV. Functional survivability analysis of structurally complex technical systems. Dependability 2018;18(2):17-24.
- [7] Cherkesov GN, Nedosekin AO. Description of approach to estimating survivability of complex structures under repeated impacts of high accuracy. Dependability 2016;16(2):3-15.

About the author

Igor A. Tararychkin, Doctor of Engineering, Professor, V. Dahl Lugansk National University, Ukraine, Lugansk, e-mail: donbass_8888@mail.ru

Received on 09.05.2018

- [8] Deyneko SV. Obespechenie nadezhnosti sistem truboprovodnogo transporta nefi i gaza [Ensuring the dependability of oil and gas pipeline transportation systems]. Moscow: Tekhnika, TUMA GRUPP; 2011 [in Russian].
- [9] Tararychkin IA, Blinov SP. Osobenosti povrezhdeniya setevykh struktur i razvitiya avariynykh situatsiy na ob'ektakh truboprovodnogo transporta [The distinctive features of damage to network structures and development of accidents in pipeline transportation facilities]. Bezopasnost truda v promyshlennosti 2018;3:35-39 [in Russian].
- [10] Tararychkin IA, Blinov SP. Simulation of the process of damage to pipeline network structures. World of Transport and Transportation 2017;15(2):6-19 [in Russian].
- [11] Tutte W. Graph theory. Moscow: Mir; 1988.
- [12] Tararychkin IA. Ensuring resilience of pipeline transportation systems to damage to network structure elements. Dependability 2018;18(1):26-31.

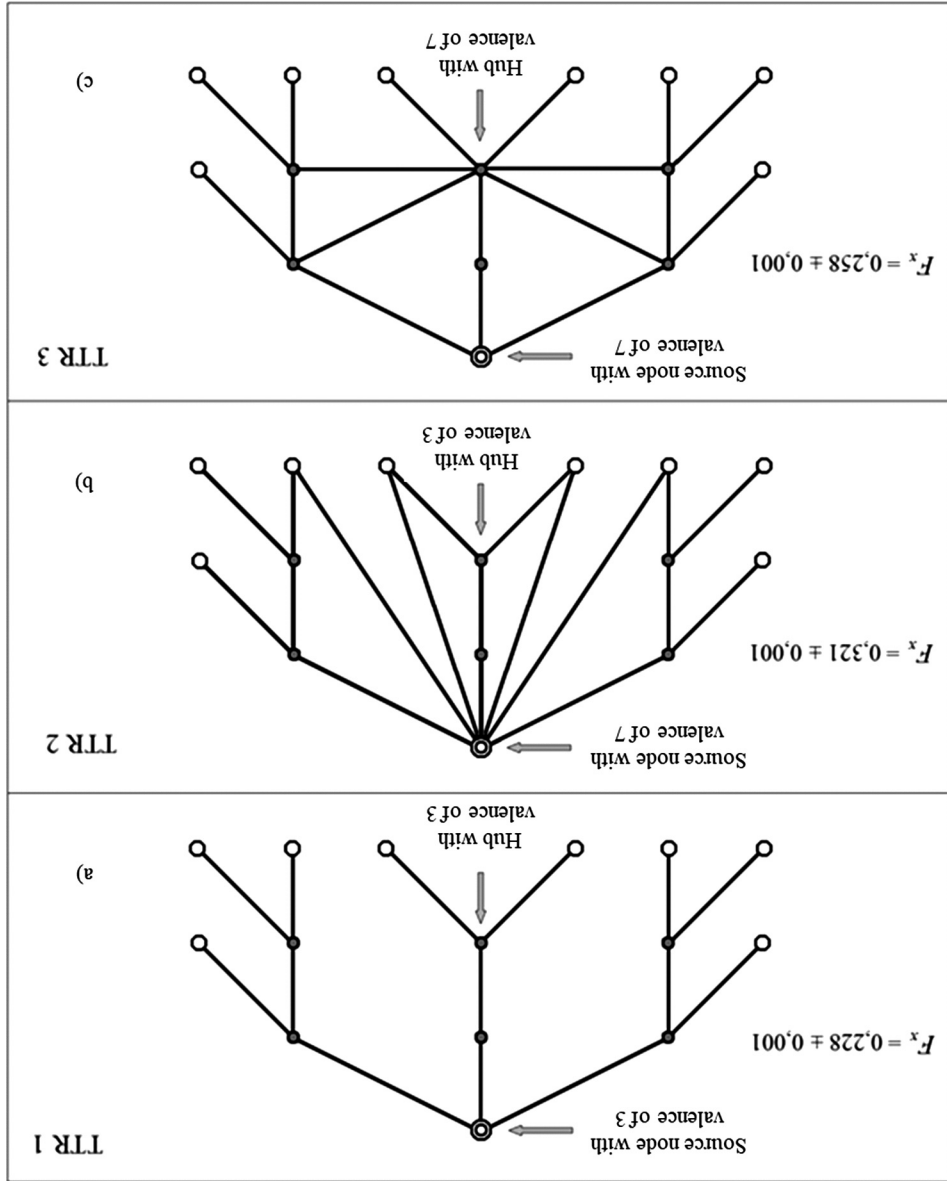


Figure 5. Structure diagram of a basic pipeline system (a) and derived structures with increased valence of the source node (b) and the hub (c)

Let us assume the solution of the synthesis problem is associated with planned inclusion of 4 linear elements into such base object. If the valence of the source node is increased by 4 out of elements of subset G_1 , thus synthesized structure diagram TTR2 will take the form shown in Figure 5b.

Now, let us increase the valence of the hub of TTR1 by adding 4 linear elements of subset G_4 . Thus, obtained derived structure TTR3 has the form shown in Figure 5c.

Taking into account the previously obtained results, it should be assumed that solution shown in Figure 5b will be close to the best, while the one shown in Figure 5c will prove to be one of the worst. The expected values of the resilience indicator for each of the above variants of derived network structures are shown in Figure 5.

As we can see, the value of F_x identified for the version shown in Figure 5b exceeds the value of the resilience in-

Conclusions

1. The process of progressive blocking of pipeline transportation system nodes is a hazardous development of an emergency situation, as each fact of blocking is associated with the simultaneous transition to the state of non-operability of all the pipelines converging to the node.

2. The most efficient method of improving pipeline system resilience against progressive blocking of nodes consists in increasing the valence of the source node and inclusion of additional linear elements of the subset G_1 in the system.

Thus, the results of the calculations confirm the earlier assumption regarding the expected properties of synthesized network structures.

The increasing valence of consumer nodes has an intermediate effect on the growth of the resilience indicators of network structures against the development of the progressive blocking process.

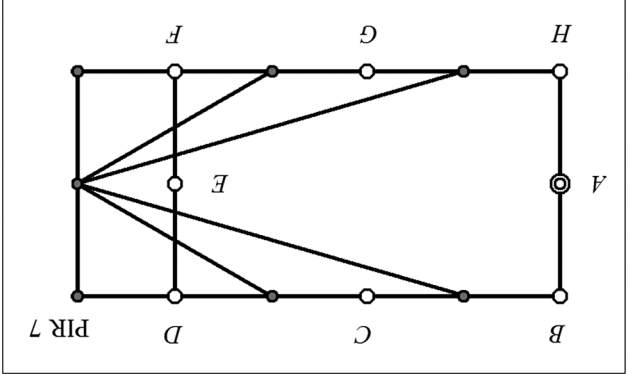


Figure 4. Derivative network structures with increased valence of the hub

Obviously, with regard to problems of structural synthesis the inclusion of additional pipelines into a system is always costly. Therefore, in practical terms, it is important to enable the required level of resilience of network structures to the development of the progressive blocking processes by adding the minimal possible number of linear elements into them.

Then, the most efficient method of improving pipeline transportation system resilience should consist in the inclusion of a small number of linear elements of the subset G1.

As an example, let us examine the structure diagram of a pipeline system designated TTR1 shown in Figure 5a.

Let us now examine the effect of the hub's valence on the resistance of a network object to progressive damage. For that purpose, let us increase 3 times the hub's valence using elements of subsets G3 and G4 as it is shown in Figure 4. The characteristics of thus synthesized structures are also shown in Table 2. As we can see, the minimal increase in the values of F_x is observed when only elements of subset G4 converge at the hub.

Thus, based on the results of performed analysis it was established that there are three types of point elements of systems whose growing valence to different degree affects the increase in the values F_x .

Thus, the most pronounced positive effect associated with the increase of the valence of the source node is observed when linear elements of the subset G1 are added to the system.

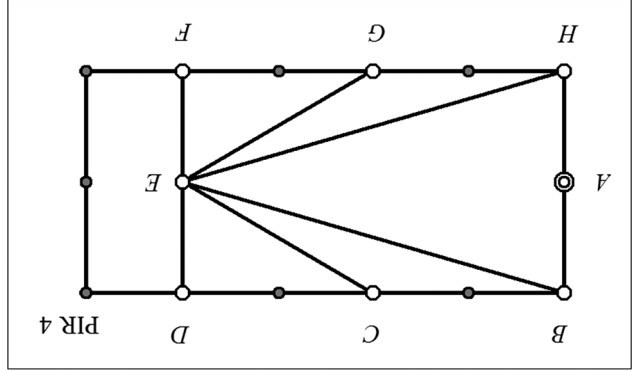


Figure 3. Derivative network structures with increased valence of the consumer node

The least increase of the values of F_x is observed as the valence of the hubs grows and additional linear elements of the subset G4 are included in the system.

the development of the progressive blocking process is of practical interest and requires additional research. Identifying such patterns involves selecting appropriate network structures and substantiating the associated computational schemes.

In this context, let us examine the basic structure diagram of a pipeline system shown in Figure 1. The analyzed facility includes the source of end product A , that is a point element with valence of 2, as well as 7 consumers of end product $B, C, \dots, H$.

Let us increase the valence of the source node 3 times. For that purpose, let us include 4 additional linear elements into the basic object. The above elements may be part of subsets $G1$ and $G5$ and their inclusion in the system will increase the valence of not only the source node, but other nodes as well.

Structure diagram variants PIR1 to PIR3 with an increased valence of the source node A are shown in Figure 2. All the mentioned objects are comparable and their characteristic and results of calculation of the values of F_x are shown in Table 2. As we can see, the most pronounced positive effect associated with the increase of the valence of the source node is observed when linear elements of the subset $G1$ are added to the system. If the number of elements of subset $G1$ decreases at the expense of elements of subset $G5$, the value of the resilience indicator F_x decreases as well.

Thus, the valence of the source node should be increased primarily by including additional linear elements of the subset $G1$ into the system. In this case the achieved positive effect is most pronounced.

Now, using the base structure diagram, let us increase 3 time the valence of the consumer node E as it shown in Figure 3. The characteristics of derived structure diagrams designated PIR4 to PIR6, as well as the modeling results of progressive blocking of nodes are shown in Table 2. As we can see, the most pronounced positive effect associated with the increase of the valence of the source node is observed when linear elements of the subset $G2$ are added to the system. As they are gradually replaced with elements of subset $G3$ the system's resilience against progressive blocking of nodes decreases.

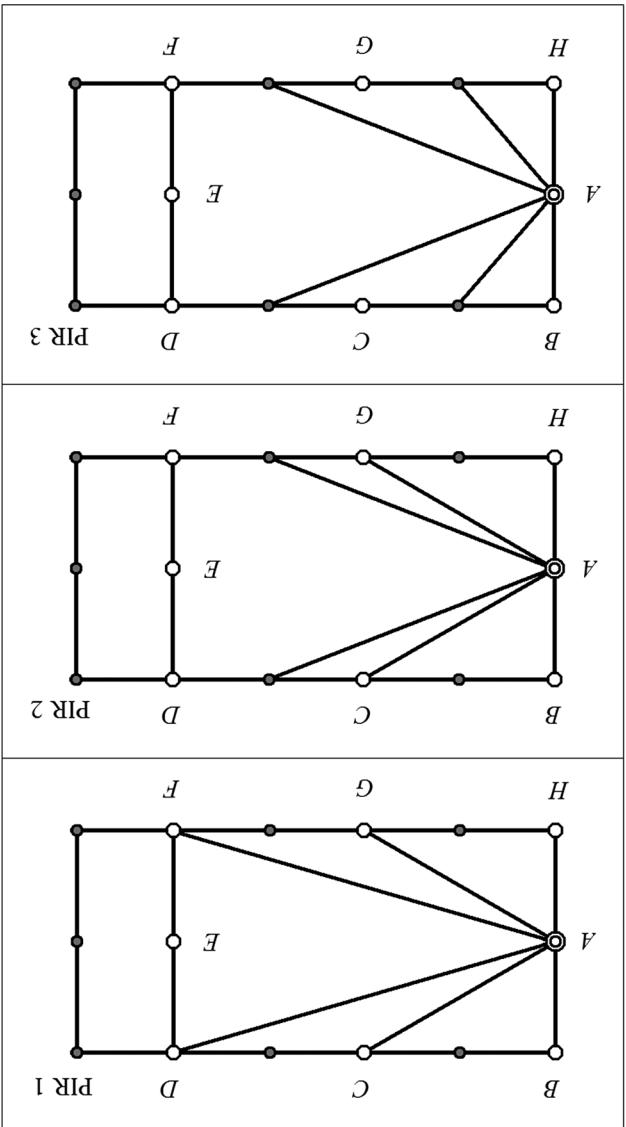


Figure 2. Derivative network structures with increased valence of the source node

examined subject to the observed changes in the valence of the other associated node.
The analysis of the effect of the valence of the transportation nodes on the resilience of network structures against

Table 2. Characteristics of derivative network structures

Network structure designation	Number of linear elements belonging to different subsets converging at the valence node 6, pcs					Resilience indicator, F_x	Correlation of values of F_x for the derivative and basic structures
	G1	G2	G3	G4	G5		
PIR1	6	0	0	0	0	0.374±0.001	1.45
PIR2	4	0	0	0	2	0.348±0.001	1.35
PIR3	2	0	0	0	4	0.339±0.001	1.31
PIR4	0	6	0	0	0	0.320±0.001	1.24
PIR5	0	4	2	0	0	0.316±0.001	1.22
PIR6	0	2	4	0	0	0.302±0.001	1.17
PIR7	0	0	0	6	0	0.294±0.001	1.14
PIR8	0	0	2	4	0	0.304±0.001	1.18
PIR9	0	0	4	2	0	0.307±0.001	1.19

1. Any network structures of pipeline transportation systems with equal numbers of nodes and equal numbers of end product consumers are comparable regardless of the number of the linear elements they include.

2. The increasing number of linear elements in a system is associated with growing values of the resilience indicator F_x , however, this effect is manifested to different degrees and depends on the structural features of the analyzed object.

In the general case, the structure of a pipeline transportation system is described with a marked-out graph that clearly shows the existing connections between individual point elements. The number of edges that converge into a node is called valence that is a characteristic of each node [11]. Similarly, the number of pipelines converging into an individual transportation node is further considered to be its valence. Additionally, a system is characterized by the set of linear elements G that is divided into 5 subsets whose designations are shown in Table 1 [12].

As the blocking of an individual transportation node causes immediate transition into the state of non-operability of all connected pipelines, we should assume that the number of linear elements in the node is its characteristic that affects the development of the progressive damage process.

Table 1. Characteristic and designations of subsets of the transportation system's linear elements

Designation of subset of linear elements	Nodes of the transportation network connected by linear elements out of different subsets					
		G1	G2	G3	G4	G5
		product source – consumer	consumer – consumer	consumer – hub	hub – hub	product source – hub

If, as part of solving the synthesis problem, an additional linear element is included in the system, such structural variation causes increased valence of two transportation nodes at once. Thus, a change in the valence of any node of the system in the process of structural synthesis should be

Introduction. Pipeline transportation systems are used in various industries for the purpose of delivering raw materials and end products to consumers [1-3]. The highest potential hazard is associated with the processing and delivery of toxic, flammable, explosive substances. Efficient operation, dependability and operational characteristics of such complex technical systems depend both on the properties of individual structural elements and the specificity of their interaction [4-7].

Transition into the state of non-operability of individual pipelines negatively affects the process capabilities of transportation systems and their operational efficiency [8]. The highest hazard to an operational system is associated with the process of node damage. That is due to the fact that normally several linear elements converge at a single node. In this context, damage (blocking) to a node means simultaneous failure of all the pipelines converging into it.

If in an emergency situation a system's nodes are progressively blocked in a random order, such scenario is called progressive blocking.

The development of emergency situations in the form of progressive blocking of nodes is associated with rapid degradation of the system's properties and can cause complete interruption of the end product's delivery to all consumers.

The ability of a system to resist the development of progressive blocking of nodes is characterized by the resilience indicator F_x [9]. Resilience indicator $0 \leq F_x \leq 1$ represents the average share of a transportation system's nodes whose blocking in a random order causes the complete disconnection of all consumers from the source of the end product. For the specified structure of a transportation system the value F_x is established by means of simulation [10]. The closer F_x is to one, the higher is the analyzed system's resilience against the development of progressive blocking.

The Aim of this paper is to study the effect of the structural features of pipeline systems on the development of emergency situations by the mechanism of progressive blocking of nodes.

Computer simulation of progressive damage to various network structures allows identifying the following specifics and patterns of the process.

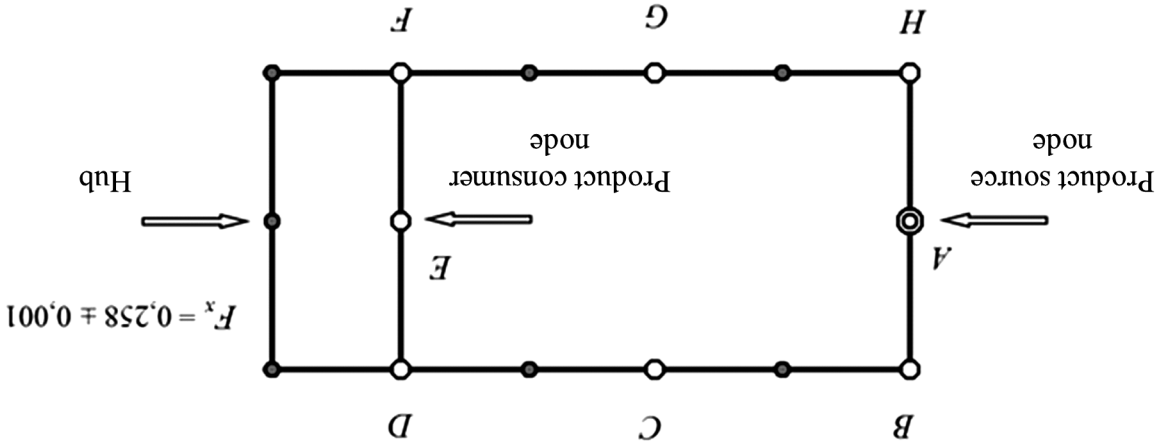


Figure 1. Structure diagram of a pipeline transportation system

The effect of the structural composition on the resilience of pipeline systems to node damage

Igor A. Tararychkin, V. Dal Lugansk National University, Ukraine, Lugansk



Igor A. Tararychkin

Abstract. The Aim of this paper is to study the effect of the structural features of pipeline systems on the development of emergency situations by the mechanism of progressive blocking of transportation nodes. The blocking of an individual point element of a system is considered as the result of simultaneous failure of all the pipelines converging into the node. The process of progressive blocking of a certain set of nodes of a pipeline system in random order is called a progressive blocking. The development of progressive blocking is associated with the disconnection of the consumers from the source of end product and is a dangerous scenario of emergency development. The system's resilience against progressive blocking is estimated by the resilience indicator F_x , the average share of the system's nodes whose blocking in a random order causes the disconnection of all consumers from the source of the end product. **Methods of research.** The values of $0 \leq F_x \leq 1$ were identified by means of computer simulation. After each fact of damage associated with a random blocking of an individual node, the connection between the source and consumers of the end product was established. The statistical characteristics of the process of progressive blocking were evaluated according to the results of repeated simulation of the procedure of damage of the analyzed network structure. In general, the structure of a pipeline system is characterized by a graph that describes the connections between point elements. The valence of an individual graph node is the number of edges that converge into it. Similarly, the valence of the respective network node is the number of converging linear elements (pipelines). Furthermore, an important characteristic of an individual node is the composition of the converging linear elements. Thus, the set of a system's linear elements includes the following varieties that ensure the connection between: the source and the consumer (subset G1), two consumers (subset G2), a consumer and a hub (subset G3), two hubs (subset G4), the source and a hub (subset G5). **Results.** The author analyzed and examined the effect of the structural characteristics on the ability of pipeline systems to resist the development of emergency situations through the mechanism of progressive blocking of nodes. It was established that with regard to structural optimization the most pronounced positive effect associated with the increase of the values F_x is observed as the valence of the source node grows and additional linear elements of subset G1 are included in the system. **Conclusions.** The process of progressive blocking of pipeline transportation system nodes is a hazardous development scenario of an emergency situation. The most efficient method of improving pipeline system resilience against progressive blocking consists in increasing the valence of the source node and inclusion of additional linear elements of subset G1 in the system. Structural optimization of pipeline systems should be achieved by defining the values F_x for each of the alternatives with subsequent adoption of a substantiated design solution.

Keywords: pipeline, system, resilience, damage, node, structure, blocking, optimization.

For citation: Tararychkin IA. The effect of the structural composition on the resilience of pipeline systems to node damage. Dependability 2019;1: 24-29. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1- 24-29

- [18] Tenenbaum M.M. Soprotivlenie abrazivnomu iznashivaniyu [Resistance to abrasive wear]. Moscow: Mashinostroeniye, 1976 [in Russian].
- [19] Tkachiov V.N. Rabotosposobnost detalей mashin v usloviyakh abrazivnogo iznashivaniya [Operability of machine components in the presence of abrasive wear]. Moscow: Mashinostroeniye, 1995 [in Russian].
- [20] Yampolsky G.Ya., Kragefsky I.V. Issledovanie abrazivnogo iznosa elementov par kacheniya [Research of abrasive wear of rolling pair components]. Moscow: Nauka, 1973 [in Russian].
- [21] Kolokol'tsev V.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V., Feoktistov N.A. Otsenka ekspluatatsionnoy stoykosti i modelirovaniye tekhnologii izgotovleniya otlivki «Zub ko-vsha ekskavatora» [Evaluation of the operating durability and simulation of a technology of "Excavator bucket tooth" casting]. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University 2015;4:61-64 [in Russian].
- [22] Khazanet L.L., Ostapenko P.V., Moiseenko M.G. Ekspluatatsiya karternogo oborudovaniya nepreryvnogo deystviya [Operation of continuous quarry equipment]. Moscow: Nedra, 1984 [in Russian].
- [23] Chudnovsky V.Yu. Mekhanika rotornykh ekskavatorov [Mechanics of bucket wheel excavators]. Jerusalem: Izd-vo MIKA K.A., 2002 [in Russian].
- [24] Balovnev V.I., Zelenin A.N., Kerov I.P. Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earth-moving machines]. Moscow: Mashinostroeniye, 1975 [in Russian].
- [25] Shchadrin M.I., Vladimirov V.M., editors. Quarry mining engineer's guidebook. Continuous excavation and transportation machines. Moscow, Nedra: 1989 [in Russian].
- [26] Rashedovsky V.V., Artemiev V.B., Sil'yutin S.A. Kachestvo ugley OAO «SUEK» [Quality of the SUEK charcoal]. Moscow: Kuchkovo pole, 2010 [in Russian].
- [27] Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in the dependability theory]. Moscow: Nauka, 1965 [in Russian].
- [28] Pronikov A.S. Nadezhnost mashin [Dependability of machines]. Moscow: Mashinostroeniye, 1978 [in Russian].
- [29] Sobol I.M. Metod Monte-Karlo [The Monte Carlo method]. Moscow: Nauka, 1968 [in Russian].
- [30] Papich L., Gadolina I.V., Zaimetdinov R.I. Interval Estimation of the Availability Factor of the Bucket-wheel Excavator Based on Bootstrap Modeling. Journal of Mathematics. 2018;10(1):4-13. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-10-1-4-13.
- About the authors**
- Irina V. Gadolina**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Federal State Publicly Funded Scientific Establishment Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: gadolina@mail.ru
- Petr A. Pobegaylo**, Candidate of Engineering, Senior Researcher, Federal State Publicly Funded Scientific Establishment Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: petrp214@yandex.ru
- Dmitry Yu. Kritsky**, engineer, Head of Unit for Mining Equipment Operation and Maintenance, SUEK Krasnoyarsk, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: kritskiydy@suek.ru
- Ljubisa Papić**, DR.SC in Engineering, Professor, Director, Research Center of Dependability and Quality Management, Prijedor, Serbia
- Received on: 31.10.2018**

- [3] Gaevskaya K. S. Statisticheskie issledovaniya nagruzok rabochego oborudovaniya i mekhanizmov karternykh ekskavatorov [Statistical studies of the loads of implements and mechanisms of mining excavators]. In: Voprosy mekhanizatsii otkrytykh gornykh i zemleroynykh rabot [Matters of mechanization of quarry mining and excavation]. Moscow: Gosortekhnizdat, 1961 [in Russian].
- [4] Shenderov A. I., Emtianov O. A. Nadezhnost gor-notransportnogo oborudovaniya [Dependability of mining and conveyor equipment]. Moscow: Nedra, 1976 [in Russian].
- [5] Vladimirov V. M., Trofimov V. K. Povyshenie proizvoditelnosti karternykh mnogokovshovykh ekskavatorov [Improving the performance of quarry multibucket excavators]. Moscow: Nedra, 1980 [in Russian].
- [6] Ikramov U. Mekhanizm i priroda abrazivnogo iznashivaniya [Mechanism and nature of abrasive wear]. Tashkent: FAN, 1979 [in Russian].
- [7] Khrushchiov M. M., Babichev M. A. Abrazivnoe iznashivanie [Abrasive wear]. Moscow: Nauka, 1970 [in Russian].
- [8] Kragefsky I. V. Trenie i iznos [Friction and wear]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968 [in Russian].
- [9] Kogaev V. P., Drozdov Yu. N. Prochnost i iznosostoykost detalей mashin [Strength and durability of machine components]. Moscow: Vishaya shkola, 1991 [in Russian].
- [10] Kosetskyy B. I. Soprotivleniye iznashivaniyu detalей mashin [Wearing resistance of machine components]. Moscow, Kiev: Mashgiz, 1959 [in Russian].
- [11] Abezgauz B. D. Rezhushchie organy mashin frezernogo tipa dlya razrabotki gornykh porod i gruntov [Cutting units of mill-type machines for rock and soil excavation]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1965 [in Russian].
- [12] Bogoliubov B. N. Dolgovechnost zemleroynykh i dorozhnykh mashin [Longevity of excavation and road-making machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964 [in Russian].
- [13] Vetrov Yu. A. Rezanie gruntov zemleroynymi mashinami [Digging by excavators]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971 [in Russian].
- [14] Zimin A. I. Povyshenie dolgovechnosti i prognozirovaniye strokov sluzhby detalей mashin [Improving the longevity and prediction of machine components' service life]. Sverdlovsk: KPIITPSOS NTO, 1982 [in Russian].
- [15] Ikramov U. Mekhanizm i priroda abrazivnogo iznashivaniya [Mechanism and nature of abrasive wear]. Tashkent: FAN, 1979 [in Russian].
- [16] Papik L., Gadolina I., Zaynetdinov R. Iznos zubiev rotornogo ekskavatora [Wear of bucket wheel excavator teeth]. Proceedings of the 8-th DQM International Conference Life cycle engineering and management ICDQM-2017, 2017. p. 84-89 [in Russian].
- [17] Reysh A. K. Povyshenie iznosostoykosti stroitelnykh i dorozhnykh mashin [Improving the durability of construction and road-making machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1986 [in Russian].
- [1] Fedorov D. I., Bondarovich B. A., Pereponov V. I. Nadezhnost metallokonstruktsiy zemleroynykh mashin [Dependability of excavators]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971 [in Russian].
- [2] Fedorov D. I. Nadezhnost rabochego oborudovaniya zemleroynykh mashin [Dependability of excavator implements]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981 [in Russian].

References

with average values corresponding with the middles of the intervals and given variation coefficients, let us use the Monte Carlo method [29 and many others] (an example is given in [30]).

As the result, in calculating the distribution of constant A with 90% variation for several variables the confidence interval for A under the assumption of normal distribution of the values from the above tables according to preliminary calculations is $6,8 \cdot 10^{-8} \dots 1,2 \cdot 10^{-8}$.

The calculations were performed in the R programming environment [35]. An example of application is in [36].

Conclusion. Based on both the experimental data we obtained regarding the operation of a bucket wheel excavator under various operating conditions over a long period of time and taking into account out analysis of the available literature we estimated the coefficient in the formula used for calculation of the wear rate.

At the same time, we evaluated the accuracy of the results.

In conclusion, we can state that now the Reysh formula can be successfully used in the assignment of inspections, repairs and replacements, as well as for the analysis of the effect of the operational factors (optimization goals can be set in a way similar to that described in [31], in particular, taking into account the economic criteria).

Additionally, now we can set and subsequently successfully solve the problem of spare parts and tools optimization in respect to mining excavators and in individual repair units, for example in the way proposed in [32].

Obviously, the applicability of the Reysh formula is a significant contribution to the design of the method of prediction, maintenance and, as far as possible, improvement of the dependability of quarry mining machines ([33] can be cited as an example).

In conclusion let us note that although the study was conducted on a specific excavator operated under specific conditions, the generality of the findings will not be lost as the conditions of the Nazarovskiy mine and Krasnoyarsk Krai as a whole are quite typical in terms of such machines' operation in Russia. The conditions of Ukraine or Kazakhstan and other regions will possibly require the data presented in this paper to be refined.

We will continue the respective activities both in terms of further refinement of the values of coefficient A and examination of other types of excavators. The methods of collection and processing of expert information will also be essentially improved (based, for example, on [34 and many others]).

Table 1. Coefficients among the second generalized wear coefficient

C_p^0	C_{p0}^y	s, m	t_p , s	C_{*}^y	P, MPA
0.6 – 3	0.6 – 1.54	5 – 10	3600	1.088 – 1.132	0.1 – 2.0
1	2	3	4	5	6

* this parameter is identified using formula [17]: $C_p^y = 1 + 0.44 \cdot U$, where U is the projection of wear surface (normally from 0.2 to 0.3 m).

Table 2. Coefficients among the first generalized wear coefficient

f	C_{ABR}	C_{WEAR}	C_{20}
0.25 – 0.8	0.7 – 6.6	1.0 – 2.1	$C_{20}^{20} = (0.05 \dots 0.08) \cdot t_p^*$
1	2	3	4

* the t_p parameter is the actual temperature within the range from -60 to +50 degrees Celsius (in our opinion it must be modulo, excluding the value equal to zero).

Table 3. Distribution of excavator operation time per type of soil and some of their characteristics

Type of soil	Average portion of operation time, p_i	Specific weight of soil, ρ , t/m ³	Friction coefficient, f	Ground abrasion factor, C_{ABR}
1	2	3	4	5
Peat	0.15	0.8 ... 1.2*	0.25	0.7
Loams	0.25	2.04	0.30	1.66
Silt	0.1	1.8 ... 2.0*	0.25	1.0
Aleuolites	0.1	2.04 ... 2.15	0.50	1.0
Clay	0.15	2.03	0.35	1.2
Argillaceous sandstone	0.25	2.4	0.30	6.6
	$\sum p_i = 1.0^{**}$			

* the precise value significantly depends on the humidity.

Tables 1 and 2 show the initial data for calculation.

Accounting for operation in different modes. Some of the above coefficients depend on the type of soil. In order to more accurately take account for this factor subject to a specific excavator's operating conditions based on its operational dependability data we created the so-called generalized series that takes into consideration the multi-mode nature of the product's operation. That is due to the fact that during the period of operation in question the SRS(k)-4000 bucket wheel excavator worked on various soils.

Table 3 contains a number of characteristics of the operating conditions of the excavator in question that are required for the creation of the above generalized series. We made it based on the expert estimations and analysis of known literature. Let us note that data per the coefficients were collected for each of the modes.

Further, for each i -th mode, using formula (3) individual wear rate γ_i was identified taking into account the data from the tables. Since wear-related degradation damage accumulates all operating modes, applying the above formulas requires estimating the average wear rate $\bar{\gamma}$ taking into account the generalized series information from the tables.

The average rate $\bar{\gamma}$ is expressed as the quotient of the total distance by the total time, while the distance U_{Σ} is the amount of total wear, mm:

$$\bar{\gamma} = \frac{U_{\Sigma}}{T} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot T \cdot p_i = \sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot p_i \quad (5)$$

where T is the total operation time, k is the number of operating modes under consideration.

Let us note that while deriving formula (5) we used obvious formulas of the form $t_i = T \cdot p_i$, where t_i is the operation time in the i -th mode and $U_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k \gamma_i t_i$.

Thus, it can be stated that the average wear rate under time-specific apportionment of operating modes is the arithmetical value of the modes subject to portions p_i . **Regarding coefficient f .** Under the time T , h , known from the full-scale experiment the possible numerical values of the proportionality coefficient f are identified based on the above formulas and tables.

Our average estimate of the coefficient was: $f = 8.1 \cdot 10^{-8}$ 1/(PA·h) provided that γ has the dimensionality of m/h. Nevertheless, as the dependability theory goes [27, 28 and many others] point estimation alone does not suffice. In order to estimate the confidence intervals per parameter f , assuming that all the required parameters (some of which, let us remember, are within the above ranges) that, obviously, generally are stochastic, have normal distribution

mechanisms [1 – 5 and many others]. Failure analysis shows that most idle hours of any excavator (including the one under consideration) are associated with the recovery of the bucket teeth, more specifically the replacement of worn-out implements, confirmed by Fig. 2. The main factor causing failures of bucket teeth (Fig. 3) and their components is abrasive wear (Fig. 4).

Abrasive wear is the subject of many research papers (a sufficiently good pre-1980 study can be found, for example, in [6]).

The works of Khrushchiov M.M. [7 and many others], Kragefsky I.V. [8 and many others], Drozdov Yu.N. [9 and many others] and Kostetsky B.I. [10 and many others] are now considered among the most fundamental studies of abrasive wear.

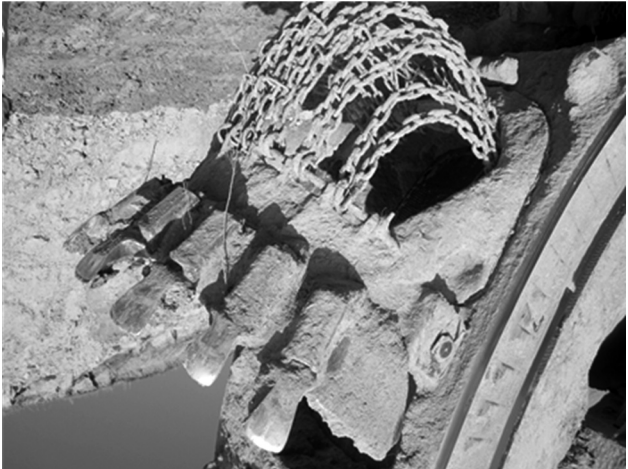


Figure 3. Bucket of a bucket wheel excavator

As regards mining and construction vehicles, the following well-known experts were involved with this subject

Relevance and state of the art. Stable development of Russia's fuel and energy industry directly depends on the reliable and productive operation of the existing manufacturing chains, starting from single mining machines to plants and ultimately high technology power station equipment. The primary task of open pit mining was and is to ensure convenient, complete and cost-efficient access to mineral resources. For that purpose, various machines, plants and processes are used.

For the sake of specificity, this paper considers the SRS(k)-4000 continuous operation bucket wheel excavator (Germany) in operation for many years in Krasnoyarsk Krai (Nazarovskoe brown coal field).

Figure 1 shows the graph of the expected C_{TA} availability coefficients of the above equipment. It is evident that the actual dependability indicator does not reach the expected value, which indicates the requirement to develop and implement measures to as quickly as possible correct this negative situation.

It is known that the availability of machines for use in time is largely ensured by reliable operation of all units and

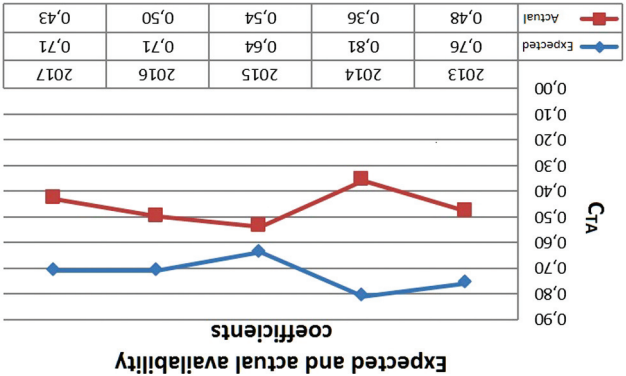


Figure 1. Expected and actual availability coefficients of the SRS(k)-4000 excavator

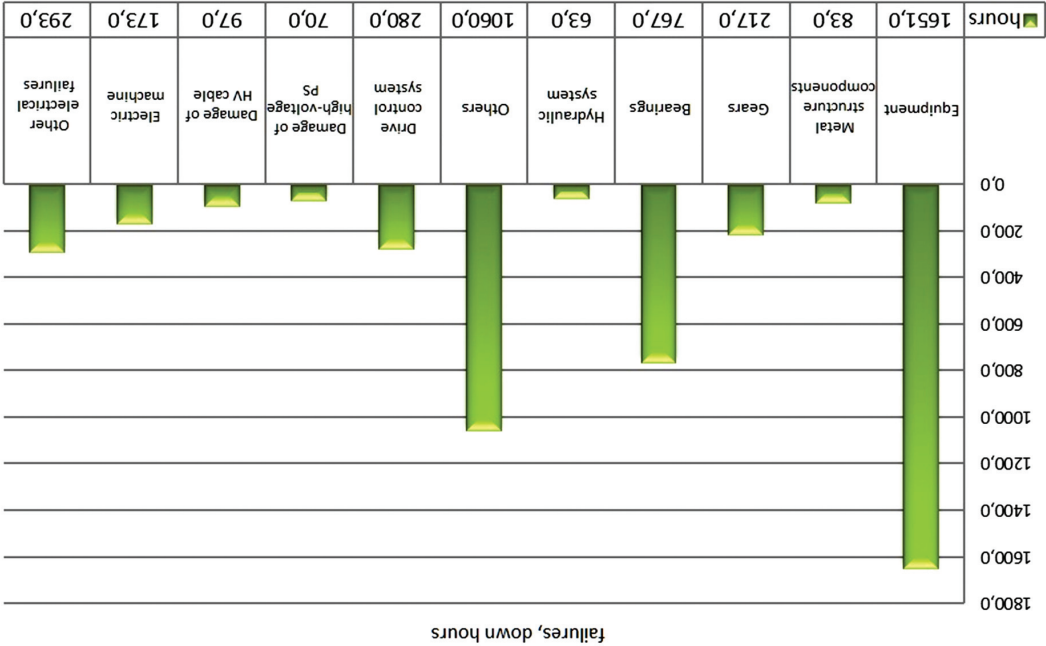


Figure 2. Diagram of failure distribution of excavator components in 2013 – 2017

Refinement of the engineering practice of evaluation of the wear rate of excavator implement components

Irina V. Gadolina, Federal State Publicly Funded Scientific Establishment Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Petr A. Pobegaylo, Federal State Publicly Funded Scientific Establishment Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Dmitry Yu. Kritsky, SUEK Krasnoyarsk, Krasnoyarsk, Russia
Ljubisa Papic, Research Center of Dependability and Quality Management, Prijedor, Serbia

Abstract. The existence of humankind on Earth largely depends on the energy at its disposal. It is mostly generated by processing minerals extracted from the Earth's crust by open-cut mining. The quality and low cost of extraction are largely defined by the dependability of employed machines and mechanisms, plants and process engineering solutions. Various types of excavators are the backbone of a mining machine fleet. Their parts that principally interact with the environment (rock) are components of implements, i.e. primarily the buckets and components of bucket(s). It must be noted that in the process of interaction with the environment (rock) the excavator implements and their components are exposed to so-called abrasive wear. Since abrasive wear of implement components (most frequently excavator bucket teeth) causes their recurrent replacement, this inevitably affects the performance of the excavator as a whole and those process flows it is part of. Occasional interruptions of operation and repairs reduce the availability factor, the most important complex indicator of equipment dependability. Given the above, the aim of this paper is to refine the previously known formula proposed more than thirty years ago in VNIISSM (Reysh A.K.) for evaluation of the rate of abrasive wear of excavator bucket teeth. For the first time, with a sufficient accuracy we examined the multitude of operating modes of mining equipment, i.e. operation of excavators in various conditions, e.g. on different soils. Additionally, we extended Reysh's approach from single-bucket machines to continuous operation multi-bucket ones. For that purpose, the authors used a method of data integration from known sources, method of full-scale experiment under the operating conditions of a specific excavator and method of mathematical simulation (a form of the Monte Carlo method). All of that allowed revising the values of the parameters in the Reysh formula. The refined formula that we obtained can now be used for the dependability evaluation of machines operating under varying conditions, as well as for the purpose of appointing the time of preventive inspections.

Keywords: wear, wear rate, bucket wheel excavator, bucket teeth, mine rock, operating modes.

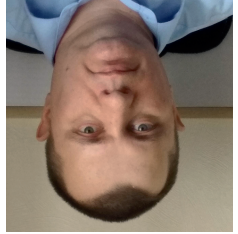
For citation: Gadolina I.V., Pobegaylo P.A., Kritsky D.Yu., Papic L. Refinement of the engineering practice of evaluation of the wear rate of excavator implement components. Dependability 2019;1: 18-23. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-18-23.



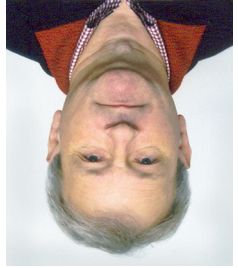
Irina V. Gadolina



Petr A. Pobegaylo



Dmitry Yu. Kritsky



Ljubisa Papic

About the author

Yuri P. Pokhabov, Candidate of Engineering, Head of Center of Research and Development, NPO PM – Maloe konstruktorskoye buro (OAO NPO PM MKB), Russia, Krasnoyarsk Krai, Zheleznogorsk, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Received on: 16.08.2018

nad yozhnost' kosmicheskikh apparatov (na primere povorotnykh konstruktitsiy) [Problems of comprehensive analysis and assessment of individual design dependability of spacecraft (with the example of rotating structures)]. Ekaterinburg: AMB, 2018 [in Russian].

[14] Volkov L.I., Shishkevich A.M. Nadiozhnost letatelnykh apparatov [Aircraft dependability]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975 [in Russian].

The DEAD procedures, namely parameterization (12); substantiation of parameters' values being within the permissible range (4) and (6); regulatory and technical documentation requirements definition; verification of parameters' compliance with specified requirements, fulfil a function of technical quality management [4; 7-9].

Problem 7: How does dependability affects development costs?

It is generally believed that the development costs directly depend on the values of the specified dependability indicators (it is assumed that heavy expenses are the price paid for high dependability). This seemingly obvious connection is in fact a delusion in some way. If we proceed from mathematics, then everything seems to be true. According to the classic concepts of the dependability theory [14], the lower one-sided confidence limit for estimating the probability of failure-free operation when conducting a series of tests without failures is calculated by the formula:

$$P_n = (1 - \gamma)^{1/n} \quad (13)$$

From (13) it follows that, for example, with a dependability confidence level of $\gamma = 0.9$, the demonstration of no-failure operation $P = 0.9$ will require a minimum of $n = 22$ independent tests of homogeneous products; if $P = 0.99$ $n = 2302$; if $P = 0.999$ $n = 23025$. Hence the conclusion that with each "extra" nine the development cost should increase by an order of magnitude. However, such "accounting approach" is not always reasonable in real life, because, according to (6) – (12), future production costs can be significantly and effectively reduced at the earliest stages of the life cycle by developing error-free design documentation (with mandatory use of DEAD) and organizing defect-free manufacturing by QMS methods, for example, ISO 9001.

Moreover, this early stage failures prevention technology is fully consistent with the well-known "tenfold cost rule" (if there is an error at one of the stages of the product life cycle, which was detected at the next stage, fixing it will cost 10 times more than if it was detected on time).

Conclusion

The application of design methods for the dependability analysis (assessment) allows – within the framework of existing views, yet with certain corrections – solving dependability-related problems without the use of the mathematics of the classic dependability theory. High dependability can be achieved by the same ways as non-dependability comes about, i.e. through design and process engineering solutions. The analysis, substantiation of engineering solutions and specification of necessary and sufficient requirements for the manufacturing process allows achieving the target dependability by engineering means through higher quality of design and process engineering.

References

- [1] Kuznetsov A. A. Nadyozhnost konstruktivnykh balisticheskikh raket [Structural dependability of ballistic missiles]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1978 [in Russian].
- [2] Pokhabov Yu. P., Ushakov I. A. O bezavariynosti funktsionirovaniya unikal'nykh vysokokootvetstvennykh sistem [On the fail-safety of unique highly vital systems]. Metod i menezhmenta kachestva 2014; 11:50-56 [in Russian].
- [3] Pokhabov Yu. P. About the philosophical aspect of dependability exemplified by unique mission critical systems. Dependability 2015; 3:22-27.
- [4] Pokhabov Yu. P. Approach to ensuring of dependability of unique safety critical systems exemplified by large flexible structures. Dependability 2016; 1:31-36.
- [5] Pokhabov Yu. P., Valishevsky O. K. Genesis of dependability of unique safety critical systems. Dependability 2016; 1(6):47-53.
- [6] Pokhabov Yu. P. On the definition of the term "dependability". Dependability, 2017; 1(1):4-10.
- [7] Pokhabov Yu. P. Ensuring dependability of unique highly vital systems. Dependability 2017; 1(3):17-23.
- [8] Pokhabov Yu. P. What should mean dependability calculation of unique highly vital systems with regards to single-use mechanisms of spacecraft. Dependability 2018; 18(4):28-35.
- [9] Pokhabov Yu. P. Teoriya i praktika obespecheniya nadyozhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srabyvaniya [Theory and practice of dependability of single-use mechanical devices]. Krasnoyarsk: SFU Publishing, 2018 [in Russian].
- [10] Netes V. A., Tarasiev Yu. L., Shper V. L. Current issues of terminology standardization in dependability. Dependability 2014; 2:120-123.
- [11] Netes V. A., Tarasiev Yu. L., Shper V. L. How we should define what «dependability» is. Dependability 2014; 4:15-26.
- [12] Bolotin V. V. Prognozirovaniye resursa mashin i konstruktsiy [Lifetime forecasting of machines and structures]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984 [in Russian].
- [13] Timashov S. A., Pokhabov Yu. P. Problemy kompleksnoy analiza i otsenki individualnoy konstruktivnoy

For products with a serial connection of critical elements (if their parameters are independent in terms of dependability), full dependability with regard to (10) is calculated using the formula

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (11)$$

Solutions to the considered problems of dependability. Formulas (6) – (11) allow analyzing and synthesizing dependability by performance parameters, which makes it possible to move away from probabilistic statistical approaches and move on to ensuring dependability based on physicality (laws of cause-and-effect relationships) and physical necessity (non-contradiction to the laws of nature) of failure causes.

Analysis and synthesis of dependability by performance parameters (at least for highly vital products) should be obviously carried out taking conditions (1) – (2) into account. In order to do so, a full parameterization procedure is performed, during which the drawing and technical documentation is presented in the form of column vector of performance parameters characterizing the full functionality of the product structure in the following form

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_i)^T, \quad A_i = [1, n]. \quad (12)$$

Column vector (12) is the basis of the parametric representation of the structure (7) and does not take into account the differences in ranking (for example, the frequency of events: never, rarely, frequently) and/or in significance (for example, the severity of malfunction: significant, insignificant, critical, catastrophic) between possible failures as events not being able to fulfil specified or intended functions (this is the only way improbable failures can be identified). The construction of the column vector in practice is done by performing successively the following procedures of dependability engineering and design analysis (DEAD) [4, 7-9]:

- identify functions that ensure the performance of the structure, which must be taken into account when making engineering decisions, and identify failures as hypothetical situations that interfere with the fulfilment of each of the functions in question;
- identify causes, directly leading to failures, which occur, exist and develop in environmental conditions as a combination of environmental factors and operating modes, taking the worst possible combinations into account;
- determine the properties of critical structural elements, which make each of the failure causes impossible (the failure causes are countered by the prescribed properties of the corresponding critical elements);
- each of the properties of critical elements is quantified using parameters (indicators), which ultimately belong to the desired column vector (12).

Then, dependability is calculated by formula (8) or (11), using stochastic methods to evaluate whether parameters' values of the structure lie within the permissible range (for example, individual design dependability method [13], which takes into account individual statistical characteristics of the parameters' distribution under specific production conditions). The other way is to ensure performance parameters margin by design so that they would fall in a given range with a permissible confidence level (for example, DEAD [4, 7-9]). The dependability calculated in this way shows how much the selected performance parameters comply with the requirements of the technical specification for dependability (basically, this is the expected or design dependability). It should be noted that with a proper choice of the performance parameters margins (when DEAD is used), the expected dependability is $R(t) \equiv 1$. In order to translate this dependability into practice, error-free design and technical documentation should be developed, and critical defects should be eliminated at the production stage. For that purpose, DEAD provides certain procedures for verification of parameters' compliance with specified requirements in regulatory, design and technical documentation, as well as compliance control procedures. Dependability calculations are adjusted based on the results of these procedures, and final conclusions on the compliance with the dependability requirements are made [4, 7-9]. Thus, not only the dependability problems listed above are solved, but also some problems beyond the dependability.

Problem 6: Why doesn't the quality management system always guarantee quality and dependability? A quality management system (QMS), for example, ISO 9001 is a set of procedures (methods of carrying out activities), which allow converting drawing and technical documentation into an end product during the manufacture in strict accordance with the established requirements.

QMS can be visualized as milestones. If you add grain, you get flour, if you add garbage, you get the same garbage. The reason is that there are no formalized procedures that would separate (sort the "grain" from the "garbage") correct (sufficient) requirements from incorrect (insufficient) ones. Obviously, technical quality management procedures (that are rarely mentioned in the present day) should be applied together with the QMS procedures formalized in the ISO 9001 standards.

find there in advance (not after the failures occur, but at the end of the documentation development).

Here, the author sees semantic inconsistencies at the system methodology level. It is quite clear that in order to manufacture and operate a product in accordance with the design documentation (this particular documentation, not some "other documentation", as the new standard GOST 27.002–2015 interprets, since *design documentation alone* can be the basis for the manufacture of a product), it should contain all the necessary and sufficient requirements. Moreover, in order to develop error-free design documents, the engineer must determine all the necessary and sufficient design parameters that characterize the ability to fulfill the specified functions, demonstrate the values of the chosen parameters and establish necessary and sufficient requirements for the manufacture that strictly correspond to the chosen design parameters. Not being able to perform any of these actions and/or to establish their criteria may lead to failures. However, these highly important concepts (how to identify all the necessary and sufficient parameters and ensure that they are relevant to the established requirements) are not reflected in any way in the terminology or in other provisions of the "Dependability in technical" series of standards.

Moreover, it is clear that in order to fulfil the specified functions, the values of a structure's design parameters must lie within the permissible limits during operation, ensuring its up state. It is also obvious that a state when the parameters' values are at the boundaries of the permissible range is a limit state; and a state when the parameters' values are outside of the permissible range is beyond the limit (disabled state). The transition of the parameters' values across the boundaries of the permissible range is called a failure. Thus, the limit state is determined by the formula

$$(3) \quad X_{lim} = \begin{cases} \bar{X} \\ X \end{cases}$$

From (3) follows the formula of the up state:

$$(4) \quad \bar{X} \leq X \leq \underline{X}.$$

From (3) – (4) follows the formula of the disabled state, which leads to failure:

$$(5) \quad X \in \{X < \bar{X}\} \vee (X > \underline{X}).$$

Formulas (3) – (5) clearly show that the concept of "limit state" not only plays a key role in determining the durability property (as interpreted by modern dependability terminology), but it is also directly related to dependability in general and, first and foremost, to fail-free operation.

Problem 5: How quality and dependability are related. Today, there is a firm understanding – at the level of regulatory documents – that quality among other things is characterized by dependability indicators. In other words,

dependability is an integral part of quality. However, this is not quite so [3, 9]. Quality, as well as all its lower level properties, is determined by the relations of things in the form of collocation, interconnections and interactions, i.e. in the current state. At the same time, these relations themselves have a tendency to change over time, and it is this property that we call dependability. It characterizes in time the quality of products and, accordingly, each of the properties of quality individually.

$$(6) \quad \bar{X} \leq X(t) \leq \underline{X}.$$

In a parametric form, formula (6) can be written as follows:

$$(7) \quad X(t) \in D = \{X_i(t) | \bar{X}_i \leq X_i(t) \leq \underline{X}_i, t \in [\underline{t}, \bar{t}]; \forall i = [1, n]\},$$

where D is the domain, inside which the general dependability parameter $X(t)$ lies. Taking into account (6) – (7), full dependability can be calculated as follows:

$$(8) \quad R(t) = P\{X(t) \in D; t \in [\underline{t}, \bar{t}]\}$$

Formula (7) conforms with the definition of the term "dependability" according to GOST 27.002 (old and new editions), and formula (8) conforms with the conclusions of the general dependability theory for mechanical systems of V.V. Bolotin [12].

$$(9) \quad X = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} X(t + \Delta t).$$

The connection between quality (4) and dependability (6) is naturally determined using the dependence [9]

Formula (9) shows that dependability is a continuous function of time, and quality is some kind of a point locus on a dependability function curve. There is no "frozen" quality (inherent to the product once and for all), it constantly changes over time due to physicochemical processes, and it is exactly in relation to this change that quality is characterized by dependability. Quality can be identified at any fixed moment in time, for example, by means of direct or indirect measurements of product parameters with non-destructive testing. Dependability cannot be measured, it can only be predicted based on calculations (8) or by identifying the probability of each of the parameters' values being within a given range (6)

$$(10) \quad R_i(t) = P\{\bar{X}_i \leq X_i(t) \leq \underline{X}_i; t \in [\underline{t}, \bar{t}]\}.$$

R – Reliability (dependability); P – Probability

of improbable events. For example, failure statistics for USV deployable structures [9] shows that, in practice, the existing modern computational and experimental methods allow achieving a dependability level of no more than 0.996 (while the acceptable requirement is at least 0.999). Therefore, in no case dependability can be evaluated (even indirectly) based on positive results of computational and experimental testing. It can only be argued that, for example, the successful experimental development (including flight tests) showed that the product demonstrated its performance n times successfully.

If the specified dependability level $R(t) > \bar{R}$ has to be demonstrated, objective evidence must be provided to prove that

$$\bar{Q}(t) < 1 - \bar{R}. \quad (2)$$

The fulfillment of condition (2) obviously cannot be confirmed only by computational and experimental identification of the performance parameters.

Thus, for highly vital systems, the *direct* methods of confirming the specified level of the failure function (non-dependability) (2) must be used in addition to the computational and experimental demonstration of the performance parameters. The easiest solution is to carry out dependability tests, however, for financial and economic reasons they are not acceptable for costly highly vital one-of-a-kind products. All that is left to do is perform additional analysis to identify improbable failures, which should be carried out in parallel with the computational and experimental performance assurance (preferably with the use of a single data base). That requires the appropriate methodological framework for such analysis, which is not yet provided for in the regulatory documentation on dependability.

Problem 4: Fuzziness of dependability terminology.

We are not even talking about the term “dependability” (its functional and parametric definition [6, 9 – 11]) that did not become clearer with the introduction of the new standard GOST 27.002–2015. In view of the above, it is much more important and useful to consider the term “up state”. It is the author’s opinion that one of the main problems of dependability of unique highly vital systems lies in the fuzziness of this term’s definition. Let us put aside the vague definition in the new standard and assume that its essence has not changed with the introduction of the notes (clarifications), and therefore we can use a clearer definition of the term from the repealed standard. Thus, up state is “a state of an object, in which the values of all parameters characterizing the ability to fulfil the specified functions comply with the requirements of regulatory and technical and/or design (project) documentation”. In other words, in order to identify the up state one must not only identify “the values of all parameters...”, but also make sure that each of these parameters complies with “the requirements of regulatory and technical and/or design (project) documentation”, which should be timely speci-

course of operation. Moreover, each stage of the product life cycle, starting with the preparation of the design and operational requirements, has a certain degree of criticality of hereditary factors due to the probability of loss of function, while the heredity itself is subject to the laws of realization. As shown in [5, 9], the conditional reliability of products defined by the failure heredity factors, has a tendency to accumulate before the end of the design stage, reaching its local maximum, and to spend starting from the stage of preproduction engineering, reaching a certain local minimum by the time of operation. That minimum should be taken as the initial conditions in the development of highly vital products.

It is important to understand that any development testing is a sort of quasi-operation (usually carried out under tougher conditions compared to normal operation) that is performed on a limited number of test objects (for financial and economic reasons). This suggests that for the purpose of justifying the target reliability the sample size may simply not be sufficient for evaluation of the test results with the required level of confidence (even given the tough testing). That is due to the fact that in the course of operation a combination of product technical states, operating modes, external loads and effects may occur that was not covered or technically infeasible during simulation at the testing stage.

Hence is the task of identifying and eliminating the potential hazard of improbable failures at the early stages of unique highly vital systems development. That can only be achieved by considering the genesis of their dependability [5, 9].

Problem 3: How to prevent improbable failures?

The conclusion that the performance demonstration during testing does not guarantee the absence of failures during operation directly follows from the total probability formula

$$R(t) + \bar{Q}(t) = 1. \quad (1)$$

Obviously, the dependability function $R(t)$ in formula (1) is defined by the up state of an object, while the failure (undependability) function $\bar{Q}(t)$ is defined (similarly to the dependability function) by the *fallible state* of the object. If not proven otherwise, an object by default can simultaneously be in two states at any moment in time: up state and fallible state. For some reason, this obviously and important fact is not reflected in the dependability terminology (the concept of “*fallible state*” is not used in the regulatory documentation).

An important conclusion follows from (1): any methods for performance parameter calculation and product testing with limited sampling provide only a certain extremum of the dependability function $R(t)$ (which is not known in advance). This is a consequence of the ever-present uncertainty of the total probability’s second component, the failure function $\bar{Q}(t)$ that characterizes the occurrence

limits of such parameters' variation (as required by the GOST). Thus, the problem of calculating dependability as *continuous operation within a given time interval* centers around establishing the parameters of the structure's operation and justifying their values lying within permissible limits, not only (and not so much) around obtaining and processing statistical data on the products' behavior during operation.

Problem 2: Should the genesis of dependability be

taken into account? The predominance of the probabilistic statistical approach in quantifying dependability resulted in a situation when, willingly or otherwise, "a blind eye is turned on" the genesis of dependability. Since the physical nature of any particular product's creation becomes somewhat unimportant, what is "important" is how its possible failures correspond to the chosen mathematical model. As a result, the focus of attention shifts from making and implementing specific engineering solutions to a model of products' behavior in operation (when it, unfortunately, becomes almost impossible to alter a poor decisions).

To fully realize how deeply the probabilistic statistical interpretation of dependability (or rather, undependability) is rooted in the regulatory documentation, let us take a look at GOST R 56526–2015, where an example of calculation of the dependability indicators of a single (small-batch) production unmanned space vehicle (USV) is preceded by the following hypothesis: "*It is assumed that at the initial moment of time (the moment of the beginning of operating time calculation), the USV is in the up state...*". It is a rather strange situation: a highly vital product is made in only one copy, but instead of making sure that the product is 100% operational, it is **assumed** to be so with some probabilistic statistical behavior model (where would it come from for a one-of-a-kind product) with questionable distribution parameters being applied (operation is carried out in the space environment, and therefore it is, by definition, difficult to obtain experimental data with the necessary level of trust).

On the other hand, when an existing mathematical model has to be adjusted to a real physical object, assumptions and schematization of physical states and processes are always used and then are balanced out (adjusted) by selecting the model's parameters (that is the foundation engineering calculations). These parameters are selected based on a long-term observation and research practice. When it comes to unique highly vital products, for which there cannot be any reliable statistics, the assumption that the product is operational before the start of operation (i.e., that there are no fundamental errors in the technical documentation or manufacturing defects) is at least controversial. In the case of batch products that means "turning a blind eye" to the fact that the developer or manufacturer, like all people, can make mistakes. These mistakes lead to any product having a heredity of failures long before the start of operation, which can manifest itself in the

for any given time interval based on the statistical data acquired. Thus, instead of studying dependability as a physical property (as a result of changes in the internal state of an object), which ensures *continuous fulfillment of the functions within a given time interval*, dependability assessment has been reduced to studying *undependability*, a model in which failures are a priori possible (predefined). Eventually, studying actual causes of failures was reduced to studying their effects, i.e. failures as the results of events the causes of which are not always known. This approach is clear and convenient for mathematicians, but has neither sense nor value for engineers, since it is not clear how to use dependability calculations for making and analyzing real technical solutions.

As a result, a rather common notion appeared: dependability can only be quantitatively estimated by probabilistic statistical analysis of the failures of technology in operation, based on "reference data on the dependability of components and elements of an object, data on the dependability of similar objects ..." (GOST 27.002–2015). Meanwhile, the definition of the term "dependability" does not set any limitations on this matter. For example, according to the GOST there is no reason why dependability cannot be defined qualitatively (alternatively), if there is a way to ensure the "ability to fulfill functions over time" on the physical level and quantitatively estimate criteria of the required functions, which "can be defined, for example, by setting for each function a set of parameters, characterizing the ability to perform it, and permissible limits for changing of these parameters' values". After all, quantitative estimation of dependability is required when comparing different products with each other or a particular product with established development goals to evaluate their efficiency. However, this is not always necessary, for example, in the case of a unique production equipment, that cannot be compared to anything (the point here being to ensure the specified performance parameters during the service life). But without quality assurance of dependability (combined with specifying and justifying performance indicator values), it is impossible at the physical level to create a dependable product. At the same time, it is not always possible to accurately quantify dependability (logical and mathematical relations and dependences between quality assurance of dependability and its quantitative measure remain unknown without information on failure statistics). Meanwhile, the probabilistic statistical approach to dependability is firmly rooted in the GOST series Dependability in techniques in the following forms: a restrictive list of products, to which statistical approaches can be applied, list of dependability indicators, standardized methods for determining (monitoring) dependability and dependability calculation methods etc. At the same time, it is quite obvious that any given quantitative requirement for dependability will be automatically met if the "ability to fulfill functions over time..." is provided on the physical level so that the parameters characterizing the ability to perform them would certainly lie within the permissible

Introduction

There are two approaches to ensuring dependability of non-repairable products depending on the end goal of their

use:

- some products are intended for failure-free operation during an indefinitely long period or for dependable performance of one-time operations/functions (their failure is undesirable or unacceptable);

- other products are intended to operate for a strictly defined time (warranty period), after which their operation *should be terminated* due to irreversible changes in the design or its parameters.

The first approach is used when creating highly vital unique products that are non-repairable or difficult to replace with new ones without serious financial and time costs, or the failure of which leads to a catastrophic breach of safety. Unmanned space vehicles or industrial nuclear facilities are examples of such products. The second approach is used when manufacturing single use (non-repairable) consumer goods (cars, household appliances, computers, gadgets, etc.) by programming their breakdowns (failures) immediately after the end of the warranty period in order to encourage sales. Some examples of programmable breakdowns are:

- an ordinary incandescent electric lamp should have an average warranty period of 1 000 hours, and today it is no secret that this is the result of a 1924 cartel agreement, when the largest manufacturers of electric lamps agreed for the first time to artificially limit the life of the incandescent lamps (they basically started manufacturing light bulbs of a degraded quality);

- at the same time, it is known that an experimental light bulb by Shelby Electric has been shining almost continuously since 1901 (more than 1 000 000 hours) at a fire station in Livermore, California, although its rated power of 60 W has since dropped to 4 W.

In the former case, when failures are unacceptable or undesirable, in order to ensure the required dependability, the products are made with structural reserve of working capacity. In the latter case, when failures are expected and allowed, a certain probability of maintaining the stability of the performance parameters by the end of the warranty period is ensured. In both cases, the dependability of products is characterized by failure-free operation, but it has a different physical meaning. In the former case, failures are not planned or implied, and in the latter case, they are not excluded, but rather planned, however they are allowed with a frequency of occurrence not exceeding a predetermined value.

For products that are considered only at the ultimate limiting state, these approaches differ in terms of choice of safety factors and safety margins that allow achieving the required dependability by varying them (programming breakdown or, on the contrary, making it unlikely). Strengthening calculations in the first approach are carried out by deterministic methods based on the mechanics of deformable solids, while in the

second approach it is carried out by probabilistic statistical methods based on the probability theory and mathematical statistics.

If a product is in two or more limiting states, dependability calculations in second approach are carried out in probabilistic statistical setting using phantom elements method [1]. The modern dependability theory does not provide the answer to calculating dependability in the first approach, when a product can simultaneously be in several limiting states and at the same time should have dependability close to one, even though solving such problems in some cases is of critical practical importance, for example, for unique highly vital systems [2-8].

The paper examines the problems caused by the conventional view of the dependability that prevents the practical use of dependability analysis (assessment) as a tool for engineers involved in the creation of unique highly vital systems/products and substantiates proposals for their resolution.

Problem 1: How to calculate dependability without failure statistics? First of all, it should be noted that it is fundamentally impossible to create dependable products without studying certain characteristics and properties of materials, as well as units and components. Of course, it would be useful to have at least some failure statistics, if it is possible to obtain any. However, the question is whether it is necessary to conduct statistical tests before failure (without building probabilistic statistical models) in order to create products with specified dependability indicators.

Terminological definition apart, in regard to its semantic meaning dependability is something that will not let you down, something you can rely on for a long time. Failure-free operation speaks for itself, it is a manifestation of operation without accidents. There is no conceptual difference between dependability and failure-free operation with regard to non-repairable products: in both cases there should be continuous operation without failures within a given time interval. Now let us consider the terminological definition of GOST 27.002-2015, according to which dependability is the “ability of an object to fulfil the required functions in time...”. With this definition of the term “dependability”, a question (and even a problem) obviously arises, i.e. how to calculate continuous fulfilment of the functions within a given time interval (without failure), which (meaning functions) also need to be defined. For lack of anything better, the solution of a purely physical problem, i.e. the quantitative estimation of the property to continuously fulfil specified functions over time, was transformed through inversion into the solution of a mathematical problem, i.e. counting the events that reflect facts of not being able to fulfil the functions (failures). With this approach, it is not hard to register failures as events (without getting into the specifics of functional performance criteria or their number). Moreover, failures can be statistically analyzed, and the probability of their occurrence can be calculated

Problems of dependability and possible solutions in the context of unique highly vital systems design

Yuri P. Pokhabov, Joint Stock Company NPO PM – Maloe konstruktorskoye buro, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, Russia



Yuri P. Pokhabov

Aim. The paper examines the problems caused by the conventional interpretation of dependability that prevent the practical use of dependability analysis (assessment) as a tool for engineers involved in the creation of unique highly vital systems and substantiates proposals for their resolution. **Methods.** The paper analyzes the problem of quantitative estimation of the dependability of unique highly vital systems without the use of probabilistic statistical models. The view of dependability as a physical property of a product (as a result of changes in its internal state) allows – at the physical level – ensuring lasting capability to fulfill the required functions and quantitatively estimating the criteria of the required functions' performance, that can be defined by, for instance, specifying a set of parameters for each function that characterizes the capability to perform, as well as the permissible limits of such parameters' variation. Such approach causes the requirement to take the origin of dependability into consideration and examine the causes of unlikely failures that are to be identified by means of additional analysis in parallel with calculations and experiments performed to support dependability. The solution to the problems of fuzzy terminology allows revealing the interrelation between the quality and the dependability, thus enabling – using the single information basis of design and process engineering solutions – the analysis, synthesis and assessment of the dependability of unique highly vital systems based on performance parameters without the use of probabilistic statistical models. **Results.** The solution of the above dependability-related problems allows ensuring dependability based on the physicality (causal connections) and physical necessity (consistency with the laws of nature) of the causes of failures. The dependability of unique highly vital systems must be ensured from the very early lifecycle stages based on consecutive execution of certain design, process engineering and manufacturing procedures, as well as application of engineering and design analysis of dependability, which also allows solving problems indirectly related to dependability, e.g. improving the quality and reducing the cost of the manufactured products. **Conclusions.** The paper shows that the application of design engineering methods for the dependability analysis (assessment) allows – within the framework of existing views, yet with certain corrections – solving dependability-related problems without the use of the mathematics of the classic dependability theory. High dependability can be achieved by the same ways as unavailability comes about, i.e. through design and process engineering solutions. The analysis, substantiation of engineering solutions and specification of necessary and sufficient requirements for the manufacturing process allows achieving the target dependability by engineering means through higher quality of design and process engineering. If we regard dependability as a multiparametric property, parametric models of products can be developed that enable the evaluation of the temporal stability of parameter values using methods of individual design dependability and/or design engineering analysis of dependability. The principles of unity of the design concept and its implementation in manufacture enables the development of products and assessment of their dependability based on a single foundation, i.e. the design and process engineering solutions directly associated with the capabilities of a specific manufacturing facility.

Keywords: unique highly vital system, individual design dependability, design engineering analysis of dependability, ensuring dependability.

For citation: Pokhabov YurP. Problems of dependability and possible solutions in the context of unique highly vital systems design. Dependability 2019;1: 10-17. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-10-17

Comparison of channel quadrupling $P_4(t)$ with a non-redundant circuit and triplication $P_3(t)$; $P_3(t)$ is shown in fig. 9.

Conclusion

Quadrupling at transistor level is the most efficient solution in terms of designing radiation-resistant digital equipment. It enables higher probability of no-failure as compared to triplication throughout the timeframe. In some cases the redundancy of quadrupling is lower than that of triplication, if majority elements are taken into account. Countering any single failure in each transistor configuration requires quadrupling redundancy. Countering any two failures in each transistor configuration requires nonuple redundancy that enables a higher probability of no-failure of a quadruple circuit, yet it is outperformed throughout the timeframe by a sixteen-fold redundant circuit that counters the failures of any three transistors in each transistor configuration whose implementation required sixteen-fold redundancy. Countering powers supply failures can be done by doubling it as part of a quadruple circuit, e.g. as it is proposed in [10].

References

- [1] ГОСТ 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform, 2016 [in Russian].
- [2] Ramaswamy S, Rockett L, Patel D et al. A Radiation Hardened Reconfigurable FPGA, <<https://pdfs.semanticscholar.org/57f8/f540360eadceaf062797b7a01065f6f9cc.pdf>, 2018 [accessed 30.03.2018].
- [3] Borisov Yul. O vybore arkhitektury otkazoustoychivyykh vychislitelnykh kompleksov dlya kosmicheskikh apparatov [On the selection of the architecture of fail-safe computer systems for spacecraft]. Dependability 2004;2(21):46-51 [in Russian].
- [4] Schäbe H, Shubinsky IB. Limit reliability of structural redundancy. Dependability 2016;16(1):9-13.
- [5] Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs, <<https://www.xilinx.com/>

About the author

support/documentation/application_notes/xapp197.pdf>, 2018 [accessed 30.03.2018].

[6] Shubinsky IB. Nadiozhnie otkazoustoychivie informatsionnie sistemy. Metody sinteza [Dependable fail-safe information systems. Synthesis methods]. Moscow: Demandability Journal, 2016 [in Russian]. ISBN 978-5-7572-0399-7.

[7] Vasiliev NP, Shubinsky IB. Analiticheskaya otsenka verovatnosti ouspeshnoy adaptatsii k otkazam modulnykh vychislitelnykh sistem s mnogourovnevnoy aktivnoy zashchitoy [Analytical evaluation of the probability of successful adaptation to failures of modular computer systems with multilevel active protection]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 1994;3(7(3-4):47 [in Russian].

[8] Tarasov AA. Minimizatsiya vremeni funktsionalnoy rekonfiguratsii raspredelennoy otkazoustoychivoy sistemy [Minimizing the time of functional reconfiguration of a distributed failsafe system]. Dependability 2010;2(37):24-29 [in Russian].

[9] Tyurin SF. Moving redundancy of tolerant elements. Dependability 2017;17(1):17-21.

[10] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME 1951;18:293-297.

[11] Mead CA, Conway L. Introduction to VLSI Systems, <https://www.researchgate.net/publication/234388249_Introduction_to_VLSI_systems>, 2018 [accessed 30.03.2018].

Received on 25.04.2018

Sergey F. Tyurin, Doctor of Engineering, Professor, Research Polytechnic University (www.pstu.ru), Perm National Research University (www.psu.ru), Perm, Russia, e-mail: tyurinsergeo@yandex.ru

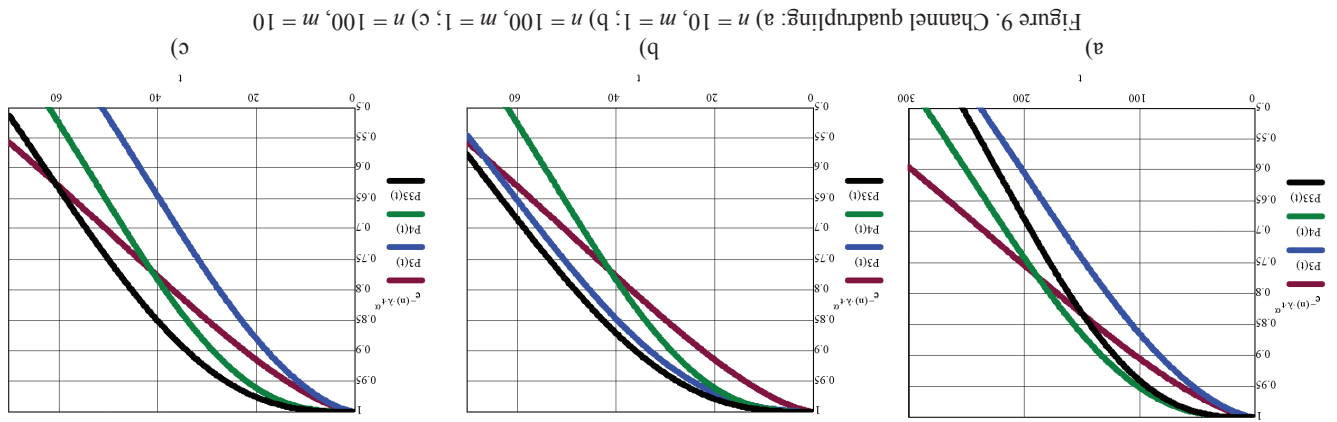


Figure 9. Channel quadrupling: a) $n = 10, m = 10$; b) $n = 100, m = 10$; c) $n = 100, m = 100$

The respective graphs are shown in fig. 7. Counting a failure of any three transistors in each transistor configuration requires sixteen-fold redundancy and is described with formula:

$$P_{fm2}^{(t)}(t) = e^{-(9)\lambda \cdot t} + 9 \cdot e^{-8\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t}) + 36 \cdot e^{-7\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t})^2. \quad (24)$$

Counting a failure of any two transistors in each transistor configuration requires nonuple redundancy and is described with formula:

$$P_{fm3}^{(t)}(t) = e^{-(6)\lambda \cdot t} + 16 \cdot e^{-5\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t}) + 120 \cdot e^{-4\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t})^2 + 560 \cdot e^{-3\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t})^3. \quad (25)$$

Change graphs of the probabilities of no-failure of a non-redundant circuit $P(t)$; a FCTLUT circuit that counts one failure $P_{fm2}^{(t)}(t)$; a FCTLUT circuit that counts two failures $P_{fm3}^{(t)}(t)$ and a FCTLUT circuit that counts three failures $P_{fm4}^{(t)}(t)$ if $n = 4$ are shown in in fig. 8.

Figure 8. Change graphs of the probability of no-failure of a non-redundant circuit $P(t)$; a quadruple circuit that counts one failure $P_{fm2}^{(t)}(t)$; a circuit that counts three failures $P_{fm3}^{(t)}(t)$ and a circuit that counts three failures $P_{fm4}^{(t)}(t)$ if the failure rate is 10^{-5} 1/h; a) within probability range from 1 to 0; b) within probability range from 1 to 0.4

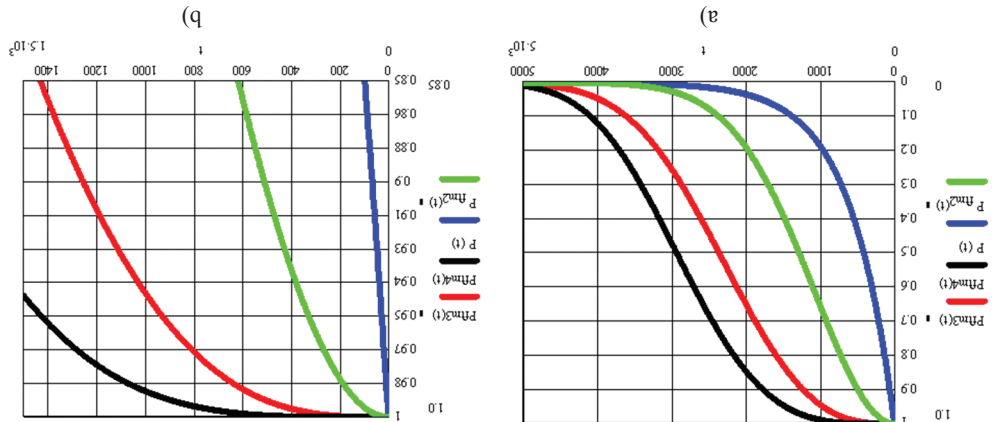
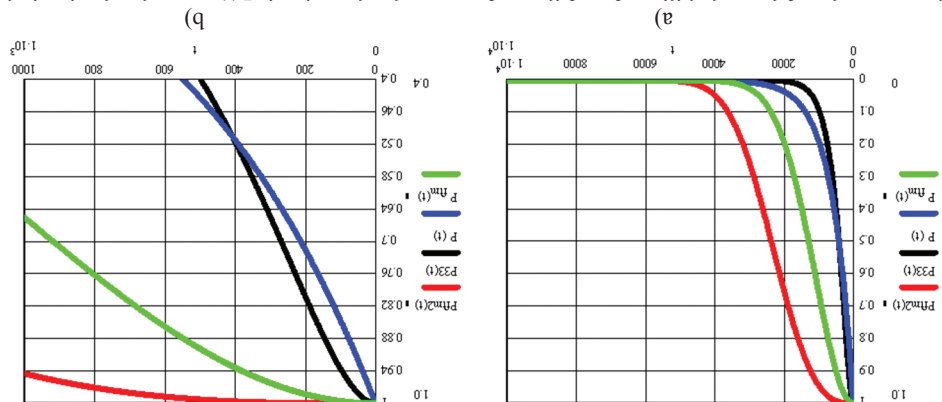


Figure 7. Change graphs of the probability of no-failure of a non-redundant circuit $P(t)$; a quadruple circuit that counts one failure $P_{fm2}^{(t)}(t)$; a triple circuit with three majority elements $P_{fm3}^{(t)}(t)$ and a circuit that counts two failures $P_{fm4}^{(t)}(t)$ if the failure rate is 10^{-5} 1/h; a) within probability range from 1 to 0; b) within probability range from 1 to 0.4



$$P_{mvt} = 1 - (0.1)^3 = 0.999. \quad (20)$$

Let us obtain in MathCad the time curves of comparison of the formulas for the probability of no-failure for a single-channel digital system e_{-n} with majority voting redundancy of “2-out-of-3” (5) and “3-out-of-5” (7) (Fig. 4).

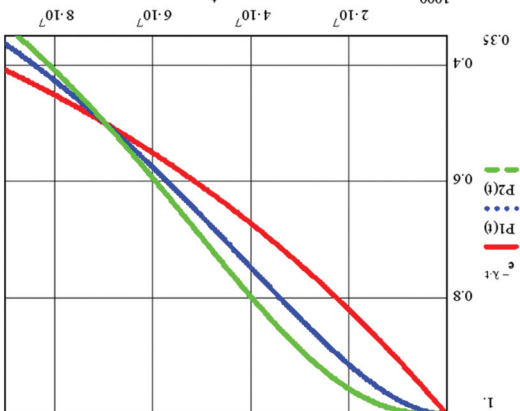


Figure 4. Comparison of a single-channel digital system e_{-n} with majority voting redundancy: “2-out-of-3” ($P_1(t)$, blue line), “3-out-of-5” ($P_2(t)$, green line) if $\lambda = 10^{-8}$, $\alpha = 1$

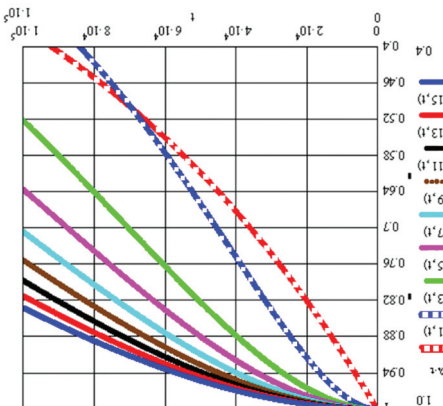


Figure 5. Probability of no-failure curves of a system without majority voted redundancy e_{-n} with majority voted redundancy $P_k(t)$ (k layers, $k = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$) if $\lambda = 10^{-8}$

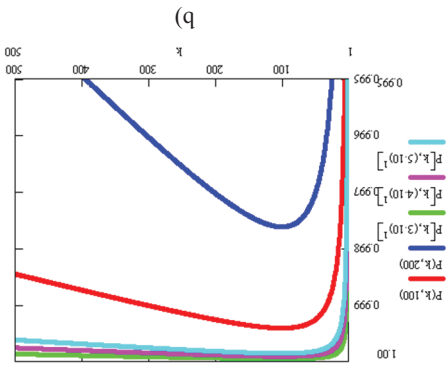
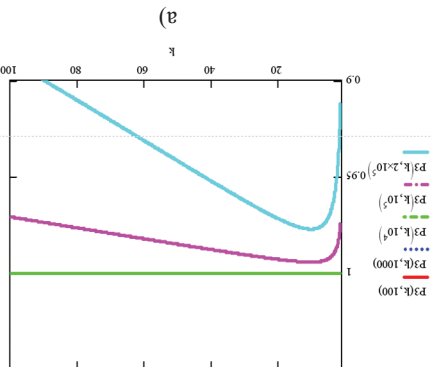


Figure 6. Optimum of deep majority voted redundancy: a) $k = 12$, b) $k = 100$

ordinary majority voted redundancy:

$$C_m = 3(C_\lambda + C_{me} + C_{ps}), \quad (21)$$

where C_λ is the cost of one channel, C_{me} is the cost of the majority element, C_{ps} is the cost of the power supply. The signal propagation delay only increases by the delay of one majority element τ_{me} . In (21), the growing complexity of routing is not taken into consideration. In case of deep majority voted redundancy, the costs are significantly higher:

$$C_{dm} = 3(C_\lambda + kC_{me} + C_{ps}), \quad (22)$$

while the signal propagation delay is increased by the delay k of the $k\tau_{me}$ majority elements. Normally, that is done if high dependability must be ensured, while the reduced performance is compensated by algorithmic methods. Let us obtain comparison graphs for transistor-for-transistor circuit quadrupling with majority voted redundancy: Counting a failure of any single transistor in each transistor configuration (each group of four transistors) requires quadruple redundancy [9] and is described with formula:

$$P_{fnt}(t) = e^{-(4)\lambda t} + 4 \cdot e^{-3\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}). \quad (23)$$

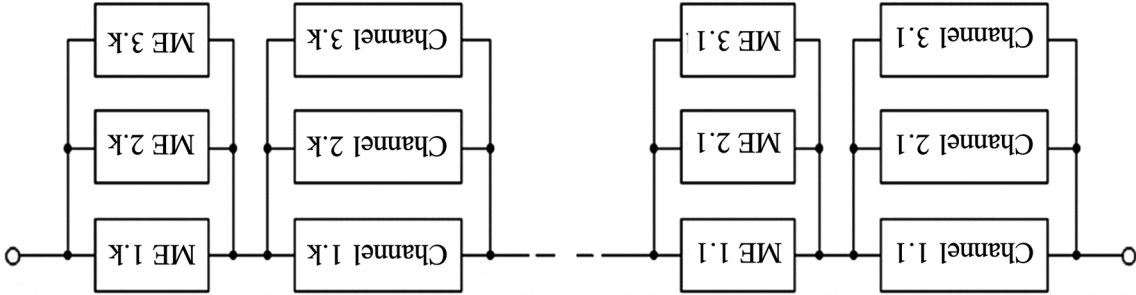


Figure 3. Deep majority voted redundancy

(12)

$$4n \leq 3n + 12m.$$

Otherwise, if the following formula is correct

(13)

$$1 \leq 12 \frac{n}{m}$$

quadrupling is not “costlier” than tripling.

In the case of channel quadrupling “3-out-of-4” voting

is required, therefore we will obtain:

(14)

$$P_4^4(t) = \left[e^{-4\lambda_{mc}t} + 4e^{-3\lambda_{mc}t} + 4e^{-2\lambda_{mc}t} + 4e^{-\lambda_{mc}t} \right] \left[1 - e^{-\lambda_{mc}t} \right]^n.$$

Experimental part

With no regard to the probability of no-failure of the

majority element we obtain the probability of no-failure of

a majority system P_{2003}^{mv} with a “2-out-of-3” selection:

(15)

$$P_{2003}^{mc} = p^3 + 3p^2(1-p) = 3p^2 - 2p^3.$$

Thus, for example, if $P = 0,9$ we obtain a significant

increase:

(16)

$$P_{2003}^{mv}(t) = 3(0,9)^2 - 2(0,9)^3 = 0,972.$$

A “3-out-of-5” majority voted redundancy improves the

dependability even more:

(17)

$$P_{3005}^{mv}(t) = p^5 + 5p^4(1-p) + 10p^3(1-p)^2.$$

For example,

(18)

$$P_{3005}^{mv}(t) = (0,9)^5 + 5(0,9)^4(0,1) + 10(0,9)^3(0,1)^2 = 0,99144.$$

With no regard to this additional equipment and majority elements, that can also be triplicated, in the case of majority voted redundancy that enables operation with one remained channel, we will obtain:

(19)

$$P_{mv}^1 = P^3 + 3P^2(1-P) + 3P(1-P)^2 = 1 - (1-P)^3.$$

In this case the probability of no-failure reaches the value

Furthermore, three power supplies are required. Thus, either the failure of one power supply, or the failure of one channel, or the failure of one majority element is counted.

“3-out-of-5” majority voted redundancy. Accordingly, five “3-out-of-5” majority elements are required.

$$P_{3005}^{mv}(t) = e^{-5\lambda_{mc}t} + 5e^{-4\lambda_{mc}t} + 10e^{-3\lambda_{mc}t} + 10e^{-2\lambda_{mc}t} + 10e^{-\lambda_{mc}t} \left[1 - e^{-\lambda_{mc}t} \right]^2.$$

Majority voted redundancy that enables operation

with one channel. In this case the system is capable of rearranging itself into a doubled configuration and further into a single-channel configuration, if necessary. That requires more complex additional equipment. Taking into account the additional equipment for reconfiguration (the failure rate is λ_n) we will obtain:

$$P_{mv}^1 = \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda_{mc}t} \right)^3 \right] \cdot \left[3e^{-2(\lambda_{mc} + \lambda_n)t} - 2e^{-3(\lambda_{mc} + \lambda_n)t} \right].$$

Formula (9) does not take into consideration the probability of “oversight” in case real-time testing does not detect the failed channel.

The so-called **deep majority voted redundancy** involves

“splitting” channels into k parts (Fig. 3).

Let us assume that λ , the failure rate of the entire channel,

is split into k identical parts, then we obtain

$$P_{dm}^k = \left[3e^{-2\lambda_{mc}t} - 2e^{-3\lambda_{mc}t} \right] \cdot \left[3e^{-2\lambda_{mc}t} - 2e^{-3\lambda_{mc}t} \right]^k.$$

If n elements are quadrupled ($r = 1$), we obtain:

$$P_4^4(t) = \left[e^{-4\lambda_{mc}t} + 4e^{-3\lambda_{mc}t} + 4e^{-2\lambda_{mc}t} + 4e^{-\lambda_{mc}t} \right] \left[1 - e^{-\lambda_{mc}t} \right]^n.$$

However, formula (10) only holds for restriction $(r+1)^2 \leq q$

in connection with the Mead-Conway requirements [8]

on the maximum number of series-connected transistors

r in a circuit that cannot be more than q (before and after

quadrupling).

Let n be the number of transistors (while observing the

Mead-Conway restriction) and m be the number of the circuit's outputs. Then for $r = 1$ by comparing the quadrupling

and tripling, we will obtain:

Introduction

Redundancy, according to the new GOST [1] is "the method of guaranteeing the dependability of an item through

the use of additional means and/or capabilities redundant as regards those minimally required for the performance of the desired function". Redundancy is especially important for systems whose operation is affected by radiation, e.g. spacecraft control systems. In this area the principle of radiation hardened by design (RHBD) is employed that involves, for example, triplication (triple modular redundancy, TMR) [2, 3]. Majority redundancy, whereas a failure or a fault are masked with no significant time expenditure, is indicated in the GOST [1]. However, the associated terms "passive" fault tolerance is not specified. Active, adaptive fault tolerance [4, 5] has a lower redundancy as compared to passive fault tolerance, but it requires procedures for supervision, diagnostics, reconfiguration that take significant time. In critical systems with relatively short time of operation, including those affected by radiation, majority redundancy of 300 percent or more is frequently used. At the same time, so-called quadrupling is also applicable. As it turns out, in some cases 300-percent redundancy can be more costly than 400-percent redundancy, if we take into consideration the required additional equipment that sometimes is not required in case of quadrupling. Let us examine the special features of such redundancy solutions.

Problem definition

TriPLICATION involves "2-out-of-3" voting, i.e., in the binary case, the majority of entities. More generally, majority voting means the choice

$$(r+1)-out-of-(2r+1), \quad (1)$$

where r is the number of masked (counted) failures. The probability of no-failure $P(t)$ for Weibull's exponential model [6] is as follows:

$$P_{(r+1)from(2r+1)}^{(t)} = \sum_{i=0}^{2r+1} C_{2r+1}^i e^{-[\lambda \cdot t^{1/\alpha}]^{1-\alpha}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^{1/\alpha}})^i, \quad (2)$$

where λ is the failure rate of one channel (the dimensionality is $1/h$); α is the Weibull distribution coefficient, $1 < \alpha < 2$; t is the time of operation in hours; r is the number of counted failures (faults). Thus, the redundancy for r failures (faults) by means of majority voted redundancy is described by formula

$$2r+1. \quad (3)$$

I.e. failures (faults) are counted in r channels out of possible $2r+1$.

In case of quadrupling, one failure (fault) is counted in one of the 4 elements that can be regarded both as channels and, for instance, separate CMOS transistors.

A broader interpretation of such configuration requires the following redundancy

$$(r+1)^2. \quad (4)$$

In this case failures (faults) are counted in r channels out of possible $(r+1)^2$.

The probability of no-failure $P(t)$, if voting is not required, is as follows:

$$P_{(r+1)from(r+1)^2}^{(t)} = \sum_{i=0}^{(r+1)^2} C_{(r+1)^2}^i e^{-[\lambda \cdot t^{1/\alpha}]^{1-\alpha}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^{1/\alpha}})^i. \quad (5)$$

Let us examine formulas (1) to (5) taking into account the special features of various implementations of redundancy.

Theoretical part

In case of a "2-out-of-3" majority voted redundancy ($r=1$) we have three channels and majority elements (ME) and obtain the structure diagram of dependability (Fig. 1).

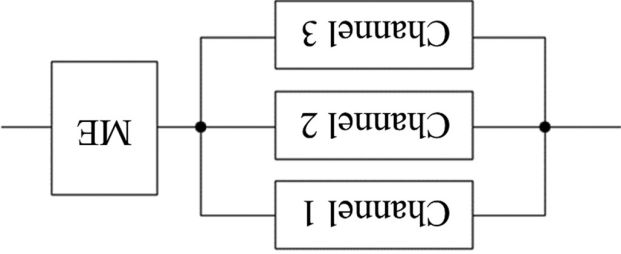


Figure 1. "2-out-of-3" majority voted redundancy

Given that the channel has n elements (e.g. transistors) and the complexity of ME is 12 transistors we obtain [7]:

$$P_{*3} = \left(3e^{-2(n)\lambda \cdot t^{1/\alpha}} - 2e^{-3(n)\lambda \cdot t^{1/\alpha}} \right) e^{-\left((12)\lambda \cdot t^{1/\alpha} \right)}. \quad (6)$$

For the purpose of counting failures (faults) in ME, let us obtain the structure diagram of dependability (Fig. 2).

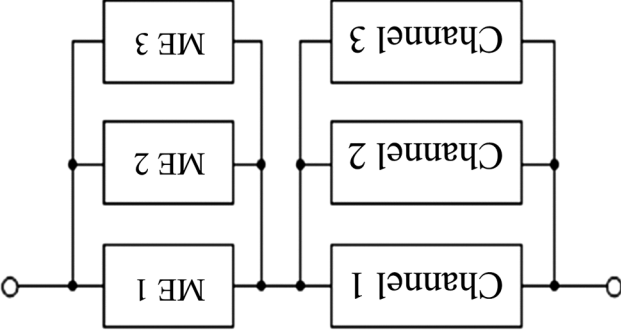


Figure 2. Majority voted redundancy

In this case we obtain:

$$P_{*33} = \left(3e^{-2(n)\lambda \cdot t^{1/\alpha}} - 2e^{-3(n)\lambda \cdot t^{1/\alpha}} \right) \cdot \left(3e^{-2(n)\lambda \cdot t^{1/\alpha}} - 2e^{-3(n)\lambda \cdot t^{1/\alpha}} \right) e^{-\left((12)\lambda \cdot t^{1/\alpha} \right)}. \quad (7)$$

Ensuring the dependability of technical facilities through triplication and quadrupling

Sergey F. Tyurin, Perm National Research Polytechnic University, Perm State National Research University, Perm, Russia



Sergey F. Tyurin

Abstract. Redundancy, e.g. structural redundancy, is one of the primary methods of improving the dependability, ensures fail-safe and fault tolerance of components, devices and systems. According to the International Patent Classification (IPC), the class of systems and methods G06F 1/18 is defined as «using passive fault-masking of the redundant circuits, e.g. by quadrupling or by majority decision circuits». Obviously, «fault-masking» masks not only faults, but failures as well. The majority decision circuits (MDC) in the minimal configuration implementations a «2-out-of-3» choice. According to the above definition, such redundancy should not require a special decision circuit. However, that is not always the case. In cases when the resulting signal out of a quadruple logic is delivered to, for instance, an executive device, a «3-out-of-4» selection circuit is required anyway. Another dependability-improving solution is defined by class G06F 1/20, «using active fault-masking, e.g. by switching out faulty elements or by switching in spare elements». The word «active» is missing here, thus we have active and passive fault tolerance. The paper examines passive fault tolerance that uses triplication and quadrupling and compares the respective probabilities of no-failure. The Weibull distribution is used that most adequately describes dependability in terms of radiation durability under the effects of heavy ions. It shows that in a number of cases quadrupling has a lower redundancy than triplication. A formula is proposed that describes the conditions of preferability of quadrupling at transistor level.

Keywords: dependability, redundancy, triplication, quadrupling, failures, faults, failure rate.

For citation: Tyurin SF. Ensuring the dependability of technical facilities through triplication and quadrupling. Dependability 2019;1: 4-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-4-9

Dear colleagues,

The development of the theory and practice of dependability involves the creation of new systems, technologies, processes. In the course of implementation of advanced systems and processes, they are digitized in order to improve their end-user performance. That ensures the efficient and prompt user service. Now, dependability is considered as the ability of a system to deliver a service that can be reasonably trusted. Here, system failure is the transition of correct service into incorrect, whereas system function is not performed, while a fault is a system state that may eventually cause a failure. Obviously, no one can fully guarantee unfailing service by a system, as there is always a risk of disruption of correct service. The management of system dependability risk is a whole new subject matter of its own that includes the principles and methods of risk evaluation, methods of collection and processing of data for risk management, risk level estimation, integral risk estimation and decision techniques based on the results of risk processing. Given the above, the areas of focus of the Dependability Journal should include a new one: Risk management. Theory and practice.

The theoretic and practical aspects of dependability and reliability subject to risk assessment attract the attention of many researchers both in Europe, US and Russia and, since recently, in Southeast Asia, China, India. Many useful findings and practical information have been collected. The inclusion of these findings in the activities performed by the Dependability contributors will improve the scientific and application value of the published papers and increase the citation of the Journal in international databases.

The Editorial Board of Dependability hopes to receive papers that summarize original findings and/or practical research by authors, as well as analysis of the latest achievements in the area of system dependability. The Journal welcomes reviews of research and engineering conferences and workshops dedicated to its subject matter.

To the Dependability contributors, we wish great creative achievements, good health and well-being.

CONTENTS

<i>Structural dependability. Theory and practice</i>	
Tyurin S.F. Ensuring the dependability of technical facilities through triplication and quadrupling.....	4
Pokhabov Yu.P. Problems of dependability and possible solutions in the context of unique highly vital systems design.....	10
Gadolina I.V., Pobegaylo P.A., Kritsky D.Yu., Papic L. Refinement of the engineering practice of evaluation of the wear rate of excavator implement components.....	18
Tararychkin I.A. The effect of the structural composition on the resilience of pipeline systems to node damage.....	24
Morozov D.V., Chernoshentsev S.F. Method of improving the functional dependability of the control systems of an unmanned aerial vehicle in flight in case of failure in the onboard test instrumentation.....	30
<i>Functional dependability. Theory and practice</i>	
Finochenko T.A., Pereverzev I.G., Balanova M.V. Physical factors affecting the reliability of rail crane operators.....	36
Arinicheva O.V., Malishevsky A.V. Improving the reliability of professional psychological selection of aviation specialists.....	40
<i>Functional safety. Theory and practice</i>	
Pronovich O.B., Shubinsky I.B. Risk-based automated system for prediction of fire safety in railway facilities.....	48
Gnedenko Forum.....	55

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Igor B. Shubinsky, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Expert of the Research Board under the Security Council of the Russian Federation, Director General CJSC IBTrans (Moscow, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

Schäbe Hendrik, Dr. rer. nat. habil., Chief Expert on Reliability, Operational Availability, Maintainability and Safety, TÜV Rheinland InterTraffic (Cologne, Germany)

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail A. Yastrebenetsky, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Head of Department, State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)

Executive Editor

Aleksey M. Zamyshliaev, PhD, D.Sc in Engineering, Deputy Director General, JSC NIAS (Moscow, Russia)

Technical Editor

Evgeny O. Novozhilov, PhD, Head of System Analysis Department, JSC NIAS (Moscow, Russia)

Chairman of Editorial Board

Igor N. Rozenberg, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Director General, JSC NIAS (Moscow, Russia)

Cochairman of Editorial Board

Nikolay A. Makhutov, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Chairman of the Working Group under the President of RAS on Risk Analysis and Safety (Moscow, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Zoran Z. Avramovic, PhD, Professor, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade (Belgrade, Serbia)
Leonid A. Baranov, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Head of Information Management and Security Department, Russian University of Transport (MIIT) (Moscow, Russia)
Alexander V. Bochkov, PhD, Deputy Director of Risk Analysis Center, Economics and Management Science in Gas Industry Research Institute, NIIgazeconomika (Moscow, Russia)

THE JOURNAL PROMOTER:

“Journal “Reliability” Ltd
It is registered in the Russian Ministry of Press,
Broadcasting and Mass Communications.
Registration certificate III 77-9782, September,
11, 2001.
Official organ of the Russian Academy of
Reliability

Publisher of the journal
LLC Journal “Dependability”
Director
Dubrovskaya A.Z.
The address: 109029, Moscow,
Str. Nizhegorodskaya, 27,
Building 1, office 209
Ltd Journal “Dependability”
www.dependability.ru
Printed by JSC “Regional printing house,
Printing place” 432049, Ulyanovsk,

Pushkarev str., 27. Circulation: 500 copies.
Printing order
Papers are reviewed. Signed print
Volume , Format 60x90/8, Paper gloss
Papers are reviewed.
Papers are published in author's edition. The
opinion of members of the editorial board may
not coincide with the point of view of authors'
publications. The reprint of materials is granted
only with the written permission of the editorial
board. Manuscripts are not returned.

Konstantin A. Bochkov, D.Sc in Engineering, Professor, Chief

Research Officer and Head of Technology Safety and EMC
Research Laboratory, Belarusian State University of Transport
(Gomel, Belarus)

Valentin A. Gapanovich, PhD, Senior Adviser to Director
General, JSC RZD (Moscow, Russia)

Viktor A. Kashtanov, PhD, M.Sc (Physics and Mathematics),
Professor of Moscow Institute of Applied Mathematics,
National Research University “Higher School of Economics”
(Moscow, Russia)

Sergey M. Klimov, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Head
of Department, 4th Central Research and Design Institute of the
Ministry of Defence of Russia (Moscow, Russia)

Vyry N. Kofanov, PhD, D.Sc. in Engineering, Professor of Mos-
cow Institute of Electronics and Mathematics, National Research
University “Higher School of Economics” (Moscow, Russia)

Achutha Krishnamoorthy, PhD, M.Sc. (Mathematics),
Professor Emeritus, Department of Mathematics, University of
Science and Technology (Cochin, India)

Eduard K. Letsky, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Head
of Chair, Automated Control Systems, Russian University of
Transport (MIIT) (Moscow, Russia)

Viktor A. Netes, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Moscow
Technical University of Communication and Informatics
(MTUCI) (Moscow, Russia)

Ljubiša Papić, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Director,
Research Center of Dependability and Quality Management
(DQM) (Prijevor, Serbia)

Roman A. Polyak, M.Sc (Physics and Mathematics), Professor,
Visiting Professor, Faculty of Mathematics, Technion – Israel
Institute of Technology (Haifa, Israel)

Boris V. Sokolov, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Deputy
Director for Academic Affairs, Saint Petersburg Institute for
Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
(SPIIRAS) (Saint Petersburg, Russia)

Lev V. Utkin, PhD, D.Sc in Engineering, Professor, Telematics
Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University (Saint Petersburg, Russia)

Evgeny V. Yurkevich, PhD, D.Sc in Engineering, Professor,
Chief Researcher, Laboratory of Technical Diagnostics and Fault
Tolerance, ICS RAS (Moscow, Russia)