

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 начальника отдела анализа и ранжирования объектов контроля Управления «Аналитический центр», ООО «Газпром газнадзор» (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, президент НП «Объединение производителей железнодорожной техники» (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, заведующий 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 08.06.2019

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №

Формат 60x90/8, Бумага глянцевая

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

Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А. Метод определения показателя долговечности микросхем.....	3
Анкудинов А.В., Антонов А.В., Чепурко В.А. Исследование характеристик процессов Кижима-Сумиты при возрастающей функции интенсивности.....	7
Михайлов В.С. План испытаний с добавлением.....	12

Функциональная безопасность и живучесть. Теория и практика

Шебе Х. Автономное вождение. О способах применения принципов безопасности.....	21
Тарарычкин И.А. Прогрессирующее повреждение структурных элементов трубопроводных систем и оценка эффективности мероприятий по их защите.....	34

Управление рисками. Теория и практика

Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Новожилов Е.О. Методика определения зон (не)допустимых значений факторов для уменьшения риска схода с рельсов вагонов грузового поезда по причине излома боковой рамы.....	40
Долганов А.И. О надежности оценок инвестиционных рисков.....	47
Гнеденко – Форум	52

Метод определения показателя долговечности микросхем

Борис А. Долгополов, ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва
Юрий Г. Зайко, ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва
Виктор А. Михайлов, ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва



Борис А.
Долгополов



Юрий Г. Зайко



Виктор А.
Михайлов

Резюме. Целью данной статьи является приведение в соответствие требований по долговечности, предъявляемых к системам космической техники с длительными сроками эксплуатации, с тем фактом, что в нормативных документах на микросхемы показатели долговечности отсутствуют. Так, в соответствии с ОСТ В 11 0998-99 в требованиях по надежности присутствуют только показатели безотказности и сохраняемости. С другой стороны, в требованиях по надежности, предъявляемых к системам космической техники, помимо требований к безотказности и сохраняемости одно из первостепенных мест занимают требования по долговечности функционирования, которые составляют обычно величину гамма-процентного ресурса $T_{p, \gamma} = 100\ 000$ ч и более при $\gamma = 99,9\%$. Следовательно, для такого рода систем с длительными сроками эксплуатации требуется определить показатели долговечности, которые отсутствуют в технических условиях или других документах, по которым производится поставка. Определение таких показателей с помощью проведения испытаний на долговечность требует больших денежных и временных затрат. Поэтому был предложен аналитический метод, согласно которому нижнюю границу оценки для гамма-процентного ресурса $T_{p, \gamma}$ микросхем можно получить, приравняв вероятность безотказной работы микросхемы за время $T_{p, \gamma}$ к вероятности ненаступления ресурсных отказов, которые переводят микросхему в предельное состояние, после чего ее эксплуатация должна быть прекращена. В этом случае для получения величины $T_{p, \gamma = 99,9\%} = 100\ 000$ ч нерезервированная микросхема или другое изделие должны иметь интенсивность отказов 10^{-8} 1/ч. Для более сложных микросхем получить требуемое значение $T_{p, \gamma = 99,9\%} = 100\ 000$ ч не представляется возможным. В данной статье предлагается расширить использование предложенного метода определения показателя долговечности с учетом того факта, что в рассматриваемых системах не допускается отказ одного любого изделия и с этой точки зрения используются различные способы резервирования аппаратуры. Под нагруженным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько резервных модулей, находящихся в режиме основного модуля. Под облегченным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько модулей, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной модуль, до начала выполнения ими функций основного модуля. Рассмотрены различные варианты резервирования сложной микросхемы, при которых удается получить заданные высокие показатели долговечности. Получена формула для расчета показателя долговечности в более общем случае, когда микросхема входит в состав модуля, который резервируется другим идентичным модулем. В этом случае, если второй модуль находится в облегченном резерве, то можно обеспечить высокий показатель долговечности микросхемы. Если же второй модуль находится в нагруженном резерве, то заданный показатель долговечности микросхемы не обеспечивается. Рассмотренный метод определения показателя долговечности может быть использован и при других способах резервирования модулей в системе.

Ключевые слова: долговечность, гамма-процентный ресурс, резервирование, нагруженный резерв, облегченный резерв.

Формат цитирования: Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А. Метод определения показателя долговечности микросхем // Надежность. 2019. № 3. С. 3-6. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6

Введение

В соответствии с ГОСТ 27.006-2015 [1] долговечностью называется свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Одним из показателей долговечности электрорадиоизделий (ЭРИ) является ресурс, определяемый как суммарная наработка ЭРИ от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния. Ресурс, в течение которого ЭРИ не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах, называется гамма-процентным ресурсом $T_{p,\gamma}$.

Показатель долговечности ЭРИ задается в ТУ в виде минимальной наработки $T_{н,мин}$, которая согласно ОСТ 4.012.013-84 [2] приравнивается соответствующему гамма-процентному показателю $T_{p,\gamma}$ при $\gamma = 99,9\%$

$$T_{н,мин} = T_{p,\gamma} \text{ при } \gamma = 99,9\%.$$

Однако в соответствии с ОСТ В 11 0998-99 [3] требования по надежности микросхем не содержат показателей долговечности. Поэтому в ТУ на вновь разрабатываемые микросхемы, как правило, нет данных по долговечности. Следует отметить, что в технической документации на ЭРИ иностранного производства характеристики долговечности также отсутствуют [4]. Для ЭРИ, для которых в соответствующих ТУ или сертификатах не приведены значения $T_{н,мин}$ или $T_{p,\gamma}$, во многих практических случаях необходимо получить оценку $T_{p,\gamma}$.

Оценка величины ресурса $T_{p,\gamma}$

В современной радиоэлектронной аппаратуре, как правило, используются ЭРИ, отказы которых представляют простейший поток отказов. Для таких ЭРИ при условии, что процесс эксплуатации стабилизирован (устранены причины всех конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов), характерны в основном не деградиционные отказы, обусловленные естественным процессом старения, износа, коррозии и усталости, а ресурсные отказы, переводящие ЭРИ в предельное состояние.

Под ресурсным отказом ЭРИ будем понимать отказ ЭРИ за время $T_{p,\gamma}$ от начала эксплуатации, вероятность $R_{p,o}(t = T_{p,\gamma})$ которого не превышает заданное значение $(1-\gamma/100)$. Тогда время $T_{p,\gamma}$ определяется из уравнения

$$R_{p,o}(t = T_{p,\gamma}) = 1 - e^{-\lambda_s \cdot T_{p,\gamma}} \leq \frac{\gamma}{100},$$

или, переходя к вероятности безотказной работы (ВБР) ЭРИ, из уравнения

$$R_n(t = T_{p,\gamma}) = 1 - e^{-\lambda_s \cdot T_{p,\gamma}} \geq \frac{\gamma}{100}, \quad (1)$$

где $R_n(t = T_{p,\gamma})$ – ВБР нерезервированного ЭРИ за время t ;

λ_s – эксплуатационная интенсивность отказов (ИО) для ЭРИ, определяемая по справочнику [5] или предоставляемая фирмой-поставщиком/изготовителем;

γ – вероятность ненаступления ресурсного отказа.

Для нерезервированного ЭРИ из выражения (1) получаем

$$T_{p,\gamma} \geq \frac{-\ln \frac{\gamma}{100}}{\lambda_s}. \quad (2)$$

Как показывает практика, ИО современных сложных цифровых микросхем даже при использовании всех возможных способов улучшения их безотказности нередко превышает значение $\lambda_s > 0,03 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, что в соответствии с равенством (2) дает значение показателя долговечности $T_{p,\gamma} < 33333$ ч при $\gamma = 99,9\%$.

Однако для современных космических систем часто требуются значения $T_{p,\gamma} \geq 100000$ ч. Для получения таких высоких показателей долговечности при использовании в системах современных сложных микросхем приходится рассматривать использование различных способов резервирования.

Учет вариантов резервирования микросхемы

Под нагруженным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента. Под облегченным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент до начала выполнения ими функций основного элемента. Тогда, при резервировании микросхем с помощью облегченного резерва ВБР определяется формулой [6]

$$R_{рез(o)}(t) = e^{-\lambda_s \cdot t} \left[1 + \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \lambda_s \cdot t}) \right], \quad (3)$$

где λ_s – ИО микросхемы в рабочем эксплуатационном режиме;

$\alpha = \lambda_x / \lambda_s$ – коэффициент хранения микросхемы, находящейся в режиме облегченного резерва, где λ_x – ИО микросхемы в режиме облегченного резерва.

Тогда для достижения заданного значения $T_{p,\gamma}$ необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение

$$R_{рез}(t = T_{p,\gamma}) \geq \frac{\gamma}{100}. \quad (4)$$

Рассмотрим следующий пример:

$$\lambda_s = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

$$\alpha = 0,012;$$

$$T_{p,\gamma(тп)} = 100000 \text{ ч};$$

$$\gamma = 99,9\%.$$

Таблица 1. Расчетные значения ВБР резервированной микросхемы.

$T_{p,\gamma}$, ч	100000	110000	120000	130000	140000	150000	160000
$R_{рез(о)}(T_{p,\gamma})$	0,9996	0,9995	0,9994	0,9993	0,9991	0,9990	0,9989
$R_{рез(н)}(T_{p,\gamma})$	0,9991	0,99895	0,9988	0,9985	0,9983	0,9981	0,9978

Тогда из соотношения (3) при $t = T_{p,\gamma(тр)} = 100000$ ч получим

$$R_{рез(о)}(t = 100000 \text{ ч}) = 0,9996 \geq 0,999,$$

что соответствует неравенству (4).

При использовании резервирования с помощью нагруженного резерва ВБР микросхемы будет определяться формулой

$$R_{рез(н)}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda \cdot t})^2. \quad (5)$$

Из этой формулы для рассматриваемого примера получим

$$R_{рез(н)}(t = 100000 \text{ ч}) = 0,9991 \geq 0,999,$$

что также соответствует неравенству (4).

Таким образом, в этом примере резервированная микросхема обеспечит получение требуемого значения $T_{p,\gamma(тр)} = 100000$ ч при $\gamma = 99,9\%$.

Получить явное значение $T_{p,\gamma}$ можно, подставляя в формулы (3) и (5) увеличивающиеся значения t с шагом $+0,1T_{p,\gamma(тр)}$ до тех пор, пока будет выполняться неравенство (4). В таблице 1 представлены полученные значения ВБР микросхемы при заданных значениях $T_{p,\gamma}$.

Таким образом, в рассматриваемом случае микросхема позволяет обеспечить показатель долговечности:

- при использовании облегченного резерва $T_{p,\gamma} = 150000$ ч при $\gamma = 99,9\%$,
- при использовании нагруженного резерва $T_{p,\gamma} = 100000$ ч при $\gamma = 99,9\%$.

Учет вариантов резервирования модулей

На практике отдельные микросхемы входят обычно в состав модулей, которые резервируются в составе системы. Предположим, что микросхема совместно с другими ЭРИ входит в состав модуля M_A , который резервируется модулем M_B , находящимся в облегченном резерве. Найдем ВБР такой микросхемы.

Микросхема проработает безотказно в течение времени t в двух случаях:

- 1) Модуль M_A проработал безотказно в течение времени t , т. е. микросхема в его составе не отказала

$$R_1(t) = e^{-\lambda_{э(M_A)} \cdot t}, \quad (6)$$

где $\lambda_{э(M_A)}$ – ИО модуля M_A в режиме эксплуатации.

- 2) Произошла совокупность следующих событий:
 - модуль M_A отказал в момент времени τ ($0 < \tau \leq t$) (отказала микросхема или другое ЭРИ);
 - модуль M_B до момента времени τ не отказал;

– в момент времени τ произошло отключение модуля M_A и включение в основную работу модуля M_B ;

– в оставшийся промежуток времени $(t - \tau)$ микросхема не отказала.

ВБР для этого случая равняется следующему выражению [7]

$$R_2(t) = \int_0^t a_{M_A}(\tau) \cdot R_{M_B}(\tau) \cdot R_{MC}(t - \tau) dt, \quad (7)$$

где $a_{M_A}(\tau)$ – функция распределения вероятности времени отказа модуля M_A , или, что то же самое, частота отказов модуля M_A за время τ , которая равна выражению $a_{M_A}(\tau) = \lambda_{э(M_A)} \cdot e^{-\lambda_{э(M_A)} \cdot \tau}$;

$R_{M_B}(\tau)$ – ВБР модуля M_B за время τ ;

$R_{MC}(t - \tau)$ – ВБР микросхемы за время $(t - \tau)$.

Объединяя формулы (6) и (7) и подставляя в формулу (7) значения входящих в нее переменных, получим

$$\begin{aligned} R_{рез(о)}(t) &= e^{-\lambda_{э(M_A)} \cdot t} + \\ &+ \int_0^t \lambda_{э(M_A)} \cdot e^{-\lambda_{э(M_A)} \cdot \tau} \cdot e^{-\lambda_{э(M_B)} \cdot \tau} \cdot e^{-\lambda_{э(MC)} \cdot (t - \tau)} dt = \\ &= e^{-\lambda_{э(M_A)} \cdot t} + \frac{\lambda_{э(M_A)}}{\lambda_{э(M_A)} + \lambda_{э(M_B)} - \lambda_{э(MC)}} \cdot \\ &\cdot e^{-\lambda_{э(MC)} \cdot t} \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_{э(M_A)} + \lambda_{э(M_B)} - \lambda_{э(MC)}) \cdot t} \right). \quad (8) \end{aligned}$$

Здесь $\lambda_{э(M_A)}$ – ИО модуля M_A в режиме эксплуатации; $\lambda_{э(M_B)}$ – ИО модуля M_B в режиме облегченного резерва в выключенном состоянии;

$\lambda_{э(MC)}$ – ИО микросхемы в режиме эксплуатации.

Подставляя полученное значение $R_{рез(о)}(t)$ из формулы (8) при $t = T_{p,\gamma}$ в неравенство (4), получим условие достижения микросхемой показателя долговечности, равного $T_{p,\gamma}$.

Проиллюстрируем рассмотренный случай примером из практики [8], в котором были использованы следующие данные:

$$\lambda_{э(M_A)} = 0,4522 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_{э(M_B)} = 0,016 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_{э(MC)} = 30,340 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч};$$

$$T_{p,\gamma} = 100000 \text{ ч};$$

$$\gamma = 99,9 \text{ \%}.$$

Подставляя эти данные в формулу (8), получим

$$\begin{aligned} R_{рез(о)}(T_{p,\gamma}) &= e^{-0,4522 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} + \\ &+ \frac{0,4522 \cdot 10^{-6}}{0,4522 \cdot 10^{-6} + 0,016 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}} \cdot e^{-30,340 \cdot 10^{-9} \cdot 10^5} \times \\ &\times \left(1 - e^{-(0,4522 \cdot 10^{-6} + 0,016 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}) \cdot 10^5} \right) = 0,999897. \end{aligned}$$

В данном случае

$$R_{MC(рез)}(T_{p,\gamma}) = 0,999897 \geq 0,999,$$

т.е. микросхема удовлетворяет заданному показателю долговечности $T_{p,\gamma} = 100\,000$ ч при $\gamma = 99,9\%$.

При условии нагруженного резервирования модулей M_A и M_B соответствующая формула для ВБР микросхемы принимает вид

$$R_{рез(н)}(t) = e^{-\lambda_{\alpha(M_A)} \cdot t} + \frac{\lambda_{\alpha(M_A)}}{2 \cdot \lambda_{\alpha(M_A)} - \lambda_{\alpha(MC)}} \cdot e^{-\lambda_{\alpha(MC)} \cdot t} \cdot \left(1 - e^{-(2 \cdot \lambda_{\alpha(M_A)} - \lambda_{\alpha(MC)}) \cdot t}\right). \quad (9)$$

Тогда, подставляя в формулу (9) данные из рассмотренного выше примера, получим

$$R_{рез(н)}(T_{p,\gamma}) = e^{-0,4522 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} + \frac{0,4522 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,4522 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}} \cdot e^{-30,340 \cdot 10^{-9} \cdot 10^5} \times \left(1 - e^{-(2 \cdot 0,4522 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}) \cdot 10^5}\right) = 0,998956.$$

В этом случае неравенство (4) не выполняется, т.е. микросхема не удовлетворяет заданному показателю долговечности $T_{p,\gamma} = 100\,000$ ч.

Рассмотренный метод может быть использован и при других способах резервирования модулей в системе [9].

Заключение

В тех случаях, когда в ТУ или других документах на поставку микросхемы или другого ЭРИ не приведены показатели долговечности (например, гамма-процентный ресурс $T_{p,\gamma}$), вероятность того, что микросхема за время $T_{p,\gamma}$ не перейдет в предельное состояние, после достижения которого дальнейшая эксплуатация микросхемы недопустима, можно приравнять ВБР микросхемы за время $t = T_{p,\gamma}$.

Нерезервированная микросхема будет иметь заданный гамма-процентный ресурс $T_{p,\gamma}$, определяемый соотношением (2). Если ИО микросхемы не удовлетворяет соотношению (2), то для достижения заданного показателя долговечности можно использовать различные варианты резервирования микросхемы.

Резервированная микросхема будет удовлетворять заданному показателю $T_{p,\gamma}$, если ВБР микросхемы будет удовлетворять соотношению (4).

Получены формулы для оценки ВБР микросхемы, являющейся составной частью резервированного модуля.

Предложенный метод позволяет оценить заданный показатель долговечности микросхемы или другого ЭРИ при отсутствии исходных данных по долговечности.

Библиографический список

1. **ГОСТ 27.002-2015.** Надежность в технике. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017–03–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – IV, 23 с.
2. **ОСТ 4.012.013-84.** Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности [Текст].
3. **ОСТ В 11 0998-99.** Микросхемы интегральные. Общие технические условия [Текст].
4. **Нетес В.А.** Новый международный терминологический стандарт по надежности [Текст] / В.А. Нетес // Надежность. – 2016. – №3. – С. 54-58.
5. Справочник «Надежность электрорадиоизделий», – М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2006.
6. **Зайко Ю.Г.** Оценка надежности систем со смешанным резервированием [Текст] / Ю.Г. Зайко, М.Б. Смирнов // Надежность. – 2004. – №4(11). – С. 40-45.
7. **Половко А.М.** Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко. – М.: Изд-во «Наука», 1964.
8. **Борисов Ю.И.** О выборе архитектуры отказоустойчивых вычислительных комплексов для космических аппаратов [Текст] / Ю.И. Борисов // Надежность. – 2004. – №2(9). – С. 46-51.
9. **Зайко Ю.Г.** Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем [Текст] / Ю.Г. Зайко, Л.Н. Искандарова, А.В. Трахтомиров // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 8-17.

Сведения об авторах

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

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

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

Поступила: 16.05.2019

Исследование характеристик процессов Кижима-Сумиты при возрастающей функции интенсивности

Александр В. Анкудинов, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Российская Федерация, Обнинск

Александр В. Антонов, АНО ДПО Техническая академия Росатома, Российская Федерация, Обнинск

Валерий А. Чепурко, АО РАСУ, Российская Федерация, Москва



Александр В.
Анкудинов



Александр В.
Антонов



Валерий А.
Чепурко

Резюме. Цель. В данной статье уделяется внимание исследованию моделей процессов неполного восстановления Кижима-Сумиты [1–7]. Эти модели довольно новые и относительно малоизученные. По причине того, что случай с неполным восстановлением больше соответствует реальному функционированию современных технических систем, задача изучения моделей Кижима-Сумиты считается особенно актуальной. В данных моделях степень неполноты восстановления определяется значением коэффициента q . В статье приведены исследования, продолжающие работы [5] и [6]. В работе [5] производилось оценивание функции восстановления в виде конечной суммы и с использованием метода статистических испытаний. В работе [6] выводилось интегральное уравнение для функции восстановления и параметра потока отказов, а также было проанализировано влияние коэффициента восстановления на данные показатели. Целью данной работы является вывод уравнений плотности наработки между отказами для модели Кижима-Сумиты и таких показателей надежности, как средние значения перескока, недоскока и длительности цикла, а также проведение анализа влияния коэффициента восстановления q на данные показатели. Исследования представлены в виде графиков и в предположении того, что наработка до первого отказа подчиняется закону распределения Вейбулла, как известно, занимающему одно из центральных мест в теории надежности. В рамках этой статьи рассматривается случай с возрастающей функцией интенсивности. **Методы.** Необходимые расчеты проводились с применением свободно распространяемой среды программирования R, специализированной для статистической обработки данных и работы с графикой. Математическим инструментом в данной работе послужили методы численного интегрирования, такие как метод трапеций и модифицированный для взятия двойных интегралов метод прямоугольников. **Выводы.** Для процесса Кижима-Сумиты в данной работе выведены уравнения и представлены графики плотностей наработок между отказами, а также средних значений для перескока, недоскока и длительности цикла. Приведен вывод уравнение восстановления для процесса неполного восстановления Кижима. Выполнен анализ влияния коэффициента восстановления на указанные показатели надежности в случае возрастающей функции интенсивности, который показал, что при увеличении параметра q наблюдается снижение средних значений перескока, недоскока и длительности цикла.

Ключевые слова: перескок, недоскок, длительность цикла, процесс восстановления, параметр потока отказов, функция интенсивности, виртуальный возраст, коэффициент восстановления, полное восстановление, минимальное восстановление

Формат цитирования: Анкудинов А.В., Антонов А.В., Чепурко В.А. Исследование характеристик процессов Кижима-Сумиты при возрастающей функции интенсивности // Надежность. 2019. №3. С. 7-11. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-7-11

Введение

Пусть имеется некоторая восстанавливаемая техническая система, которая начинает свою работу в момент времени $t = 0$. Моменты отказов системы обозначим как τ_1, τ_2, \dots , а наработки между отказами (ремонтами) – $\Delta_1, \Delta_2, \dots$. Таким образом, моменты отказов формируют процесс восстановления, показанный на рисунке 1, а выражение $\tau_k = \sum_{i=1}^k \Delta_i$ показывает реальный возраст системы на момент k -го отказа. Для упрощения модели временем ремонта отказавшей системы будем пренебрегать.

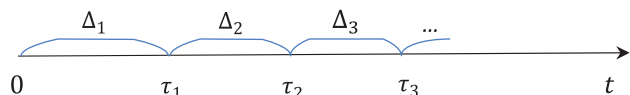


Рисунок 1 – Процесс восстановления

Для моделей, описанных в работе [3], вводится величина q – коэффициент восстановления, и некоторая функция $V(\{\Delta\}, q)$, которая определяет так называемый виртуальный возраст системы. Тогда V_{i-1} – виртуальный возраст системы на момент $(i-1)$ -го восстановления, а Δ_i – наработка между i -м и $(i-1)$ -м отказом имеет следующую условную функцию распределения [4,5]:

$$F_i(x|V_{i-1}) = \frac{F(x + V_{i-1}) - F(V_{i-1})}{1 - F(V_{i-1})}, \quad (1)$$

где $F(x)$ – функция распределения наработки до первого отказа.

В работе [7] представлены две модели обобщенного процесса восстановления (general renewal process): GRP-1 и GRP-2. Особенность модели GRP-1 состоит в том, что n -ое восстановление влияет только на повреждения, полученные системой между $(n-1)$ -ым и n -ым отказом, уменьшив прирост виртуального возраста системы с Δ_i до $q\Delta_i$. Виртуальный возраст системы после n -ого восстановления записывается следующим образом:

$$V_n = V_{n-1} + q\Delta_n = q \sum_{i=1}^n \Delta_i = q\tau_n; \quad V_0 = 0.$$

Согласно модели GRP-2 каждое восстановление влияет на суммарные повреждения, уменьшая суммарный виртуальный возраст:

$$V_n = qV_{n-1} + q\Delta_n = q(q^{n-1}\Delta_1 + q^{n-2}\Delta_2 + \dots + \Delta_n); \quad V_0 = 0.$$

В данной работе будем исследовать модель GRP-1.

Таким образом, можно классифицировать типы восстановления элементов и систем с учетом процессов Кижима-Сумиты:

- полное восстановление ($q=0$, однородный процесс);
- минимальное восстановление ($q=1$);
- неполное восстановление или «хуже чем новое, но лучше чем перед отказом» ($0 < q < 1$);
- «хуже, чем перед отказом» ($q > 1$).

Рассмотрим определения перескока, недоскока и длительности цикла. Уравнения для этих показателей будут выведены исходя из информации о параметре потока отказов, выражение для которого было получено в предыдущей работе [6].

Зафиксируем некоторый момент времени t (см. рисунок 2). *Прямым остаточным временем (перескоком)* является время, оставшееся до момента следующего отказа (восстановления) τ_{k+1} . Перескок определяется по формуле [3, 4]:

$$v_t = \tau_{k+1} - t, \quad t \geq 0, \quad [\tau_k, \tau_{k+1}] \ni t. \quad (2)$$

Обратным остаточным временем (недоскоком) является время, прошедшее с момента последнего восстановления τ_k до текущего момента t . Формула для недоскока [3, 4]:

$$\rho_t = t - \tau_k, \quad t \geq 0, \quad [\tau_k, \tau_{k+1}] \ni t. \quad (3)$$

Длительность цикла определяется суммированием перескока и недоскока [3,4]:

$$\delta_t = \Delta_{k+1} = v_t + \rho_t = \tau_{k+1} - \tau_k, \quad t \geq 0, \quad [\tau_k, \tau_{k+1}] \ni t. \quad (4)$$

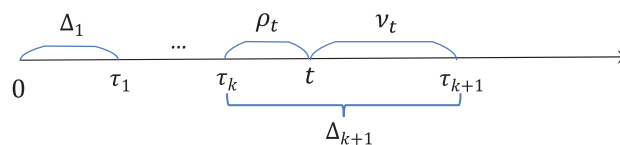


Рисунок 2 – Перескок и недоскок

Вывод уравнения плотности наработки между отказами

Зная условную функцию (1) и условную плотность распределения $f_{\Delta_n}(x|V_{n-1} = y) = \frac{f(x+y)}{1-F(y)}$, а также распределение первой наработки $F_{\Delta_1}(x) = F(x)$, $f_{\Delta_1}(x) = f(x)$, можно найти распределение второй наработки:

$$f_{\Delta_2}(x|V_1 = y) = f_{\Delta_2}(x|\tau_1 = qy) = f_{\Delta_2}(x|\Delta_1 = qy) = \frac{f_{\Delta_1, \Delta_2}(qy, x)}{f_{\Delta_1}(qy)}.$$

Отсюда:

$$f_{\Delta_1, \Delta_2}(qy, x) = f_{\Delta_1}(qy)f_{\Delta_2}(x|\Delta_1 = qy) = f_{\Delta_1}(qy) \frac{f(x+y)}{1-F(y)}.$$

Домножим обе части на $q(q \neq 0)$ и проинтегрируем по y от 0 до бесконечности, тем самым получим плотность распределения второй наработки:

$$f_{\Delta_2}(x) = \int_0^{\infty} f_{\Delta_1, \Delta_2}(qy, x) d(qy) = \int_0^{\infty} f(v) \frac{f(x + v/q)}{P(v/q)} dv.$$

Аналогичным образом выводится распределение третьей наработки:

$$f_{\Delta_3}(x) = \int_0^{\infty} f_{\tau_2, \Delta_3}(qv, x) d(qv) = \int_0^{\infty} f_{\tau_2}(v) \frac{f\left(x + \frac{v}{q}\right)}{P\left(\frac{v}{q}\right)} dv.$$

Применяя правило математической индукции в общем виде получаем выражение для плотности произвольной наработки между отказами:

$$f_{\Delta_{k+1}}(x) = \int_0^{\infty} f_{\tau_k}(v) \frac{f\left(x + \frac{v}{q}\right)}{P\left(\frac{v}{q}\right)} dv = \int_0^{\infty} f_{\tau_k}(v) K_f\left(x, \frac{v}{q}\right) dv, \quad (5)$$

где распределение k -го момента отказа находится по рекуррентной формуле, выведенной в [6]:

$$f_{\tau_k}(x) = \int_0^x f_{\tau_{k-1}}(u) K_f(x-u, qu) du. \quad (6)$$

Известно, что вид функции интенсивности распределения Вейбулла определяется значением параметра формы a . Интенсивность возрастает, если $a > 1$, не меняется при $a = 1$ и убывает, если $a \in (0, 1)$. В данной статье, как указано в аннотации, рассматривается случай с возрастающей функцией интенсивности. На рисунках 3 и 4 показаны плотности распределения моментов (6) и наработок (5) соответственно. Здесь коэффициент восстановления равен единице, а первая наработка распределена по закону Вейбулла с функцией плотности $f(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a}$, где параметры взяты со значениями $a=4, b=2$.

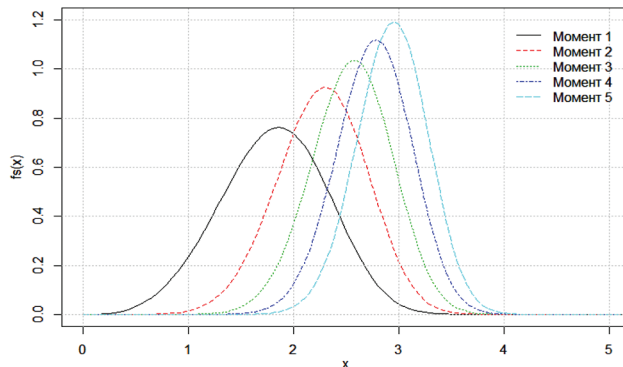


Рисунок 3 – Плотность распределения моментов отказов

Анализируя рисунок 3 можно отметить, что, в сравнении с однородным процессом восстановления, поток отказов модели Кижима постепенно сгущается. Это выражается в том, что наработки между отказами в среднем становятся меньше, поскольку, по мере увеличения номера отказа, плотности распределения моментов отказов смещаются влево все менее и менее интенсивно. Кроме того, в отличие от однородного потока, в условиях которого дисперсия линейно возрастает по мере увели-

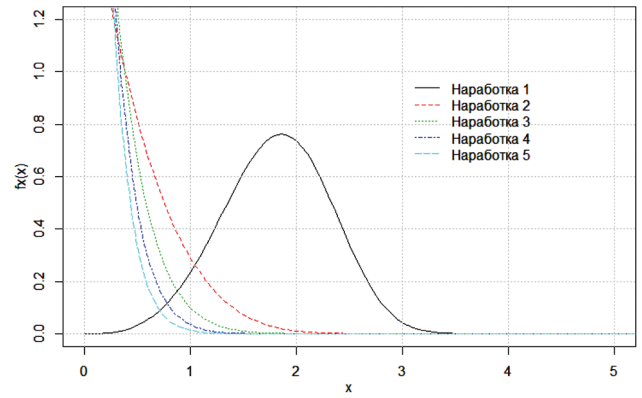


Рисунок 4 – Плотность распределения наработок между отказами

чения номера отказа, в потоке Кижима соответствующая дисперсия постепенно уменьшается. То, что каждая последующая наработка меньше предыдущей, можно непосредственно наблюдать на рисунке 4. Очевидно такая ситуация объясняется неполнотой восстановления.

Исследование недоскока, перескока и длительности цикла

Найдем распределение недоскока ρ_t (3):

$$P_{\rho_t}(x) = Pr(\rho_t > x) = \sum_{k=0}^{\infty} Pr(\tau_k < t-x; \tau_{k+1} > t) = \int_{-\infty}^{t-x} \int_{t-u}^{\infty} K_f(v, qu) \omega_0(u) dv du,$$

где $K_f(a, b) = \frac{f(a+b)}{1-F(b)}$.

Вычислив внутренний интеграл, получаем:

$$P_{\rho_t}(x) = \int_{-\infty}^{t-x} K_p(t-u, qu) \omega_0(u) du, \quad (7)$$

где $K_p(a, b) = \frac{P(a+b)}{P(b)}$.

Возьмем интеграл от полученного выражения и найдем *средний недоскок*:

$$R(t) = \int_0^{\infty} P_{\rho_t}(x) dx = \int_0^t (t-x) \frac{P(t-x+qx)}{P(qx)} \omega_0(x) dx,$$

где $\omega_0(x) = \sum_{k=0}^n f_{\tau_k}(x) = \delta(x) + \sum_{k=1}^n f_{\tau_k}(x) = \delta(x) + \omega(x)$,

$\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, поэтому:

$$R(t) = tP(t) + \int_0^t (t-x) \frac{P(t-x+qx)}{P(qx)} \omega(x) dx. \quad (8)$$

Аналогично найдем распределение перескока v_t (2):

$$P_{v_t}(x) = Pr(v_t > x) = \sum_{k=0}^{\infty} Pr(\tau_{k+1} > t+x; \tau_k < t) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} K_f(v, qu) \omega_0(u) dv du,$$

где $K_f(a, b) = \frac{f(a+b)}{1-F(b)}$.

После взятия внутреннего интеграла получаем:

$$P_{v_t}(x) = \int_{-\infty}^t K_p(t+x-u, qu) \omega_0(u) du, \tag{9}$$

где $K_p(a, b) = \frac{P(a+b)}{P(b)}$.

Далее находим *средний перескок*, проинтегрировав (9):

$$V(t) = \int_0^{\infty} P_{v_t}(x) dx = \int_0^{\infty} P(t+x) dx + \int_0^t \int_0^{\infty} \frac{P(t+x-u+qu)}{P(qu)} \omega(u) du dx. \tag{10}$$

Перейдем к распределению длительности цикла δ_t (4):

$$P_{\delta_t}(x) = Pr(\delta_t > x) = \sum_{k=0}^{\infty} Pr(\Delta_{k+1} > x; \tau_k < t < \tau_k + \Delta_{k+1}) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} K_f(v, qu) \omega_0(u) dv du,$$

где $K_f(a, b) = \frac{f(a+b)}{1-F(b)}$, $x \vee (t-u) = \max(x, t-u)$.

Берем внутренний интеграл и находим распределение длительности цикла:

$$P_{\delta_t}(x) = \int_0^t K_p(x \vee (t-u), qu) \omega_0(u) du, \tag{11}$$

где $K_p(a, b) = \frac{P(a+b)}{P(b)}$.

Таким образом, получаем *среднюю длительность цикла*:

$$D(t) = \int_0^{\infty} P_{\delta_t}(x) dx = tP(t) + \int_0^t P(x) dx + \int_0^t \int_0^{\infty} \frac{(t-u)P(t-u+qu)}{P(qu)} \omega(u) du + \int_0^t \int_0^{\infty} \frac{P(x+qu)}{P(qu)} \omega(u) dx du,$$

откуда очевидно, что *средняя длительность цикла* выглядит следующим образом:

$$D(t) = R(t) + V(t). \tag{12}$$

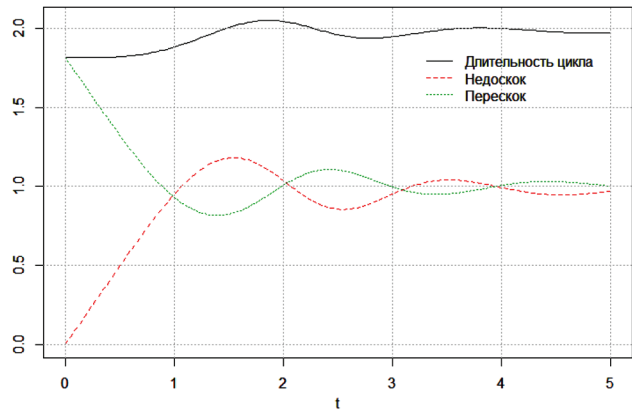


Рисунок 5 – Средние длительность цикла, недоскок и перескок для однородного потока

На рисунке 5 представлены графики средних значений длительности цикла, недоскока и перескока для однородного потока отказов. Коэффициент восстановления $q=0$, а наработки распределены по закону Вейбулла с параметром формы $a=4$ и параметром масштаба $b=2$. В начале времени наблюдается уменьшение перескока и увеличение недоскока, что вполне логично, так как приближается точка отказа. Далее можно заметить, что с течением времени происходит быстрое затухание колебаний графиков перескока и недоскока и их сходимости к асимптотической константе при том, что у данных показателей точки локальных экстремумов практически совпадают.

Графики на рисунках 6-8 показывают, как на данные показатели влияет значение коэффициента восстановления q . Чем больше параметр q , тем хуже восстанавливается рассматриваемая техническая система. Следовательно, очевидно, что для выбранного момента времени при увеличении коэффициента восстановления наблюдается снижение времени, прошедшего с момента последнего восстановления (рисунок 6), оставшегося до следующего отказа времени (рисунок 7) и, соответственно, наработки между отказами, наблюдаемой в момент инспекции t (рисунок 8).

В продолжение этой статьи предполагается исследование этих же показателей надежности в условиях убывающей функции интенсивности. Кроме этого, интересна асимптотика показателей надежности при

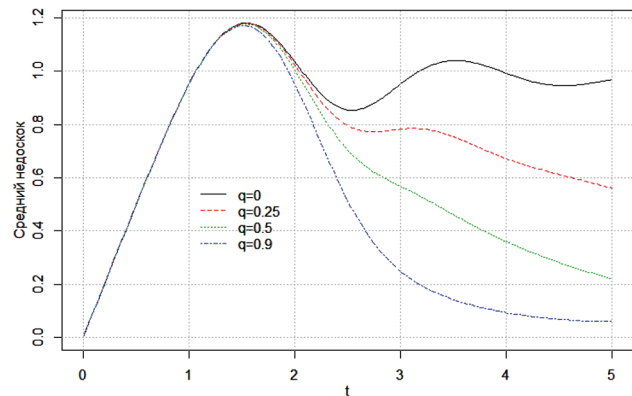


Рисунок 6 – Средний недоскок

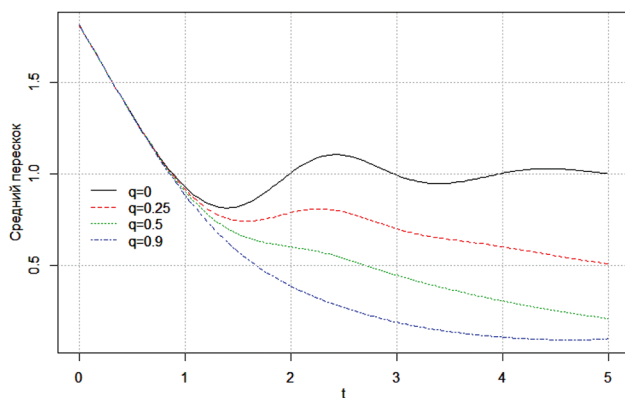


Рисунок 7 – Средний перескок

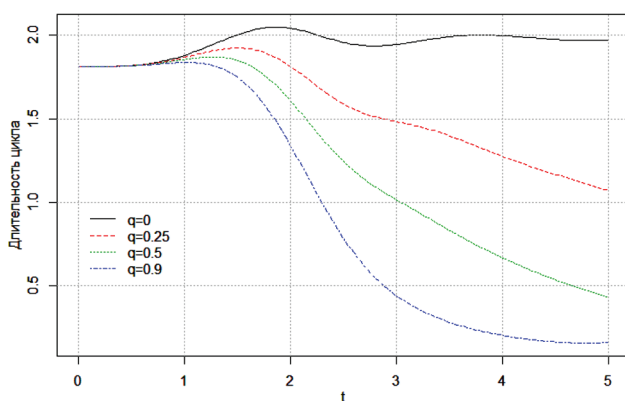


Рисунок 8 – Средняя длительность цикла

$t \rightarrow \infty$. Очевидно, что показатели перескок, недоскок и длительность цикла в модели Кижима асимптотически стремятся к нулю, а не к ненулевой константе, как это есть в рамках модели однородного потока отказов.

Заключение

В данной статье было продолжено проведение оценивания показателей надежности и исследование некоторых свойств процессов восстановления для моделей Кижима-Сумиты. В настоящее время использование этих моделей особенно актуально, так как они позволяют учитывать не только полное, но и частичное восстановление элементов и технических систем. В работе было выведено уравнение для плотности произвольной наработки между отказами, а также интегральные уравнения для математических ожиданий перескока, недоскока и длительности цикла. Также проведены исследования, по которым можно сделать вывод, что в случае возрастающей функции интенсивности с ростом значения коэффициента восстановления наблюдается снижение этих показателей надежности.

Библиографический список

1. Антонов А.В. Теория надежности. Статистические модели [Текст] / А.В. Антонов, М.С Никулин, В.А. Чепурко: Учебное пособие. – М.: НИЦ ИНФРА-М., 2015. – 576 с.

2. Finkelstein M. Failure rate modelling for reliability and risk [Text] / M. Finkelstein. – Verlag. London Limited: Springer, 2008. – 290 p.

3. Daley D.J. An introduction to the theory of point processes: Volume 1: Elementary theory and methods [Text] / D.J. Daley, D. Vere-Jones. – Verlag New York –Berlin. – Heidelberg: Springer, 2003. – 469 p.

4. Чепурко С.В. Модели неоднородных потоков в теории восстановления [Текст] / С.В. Чепурко, В.А. Чепурко: Монография. – Обнинск: ИАТЭ, 2012. – 164 с.

5. Чумаков И.А. Некоторые свойства моделей неполного восстановления Кижима [Текст] / И.А. Чумаков, А.В. Антонов, В.А. Чепурко // Надежность. – 2015. – №3(54). – С. 3-15.

6. Анкудинов А.В. Уравнение восстановления для процессов Кижима-Сумиты [Текст] / А.В. Анкудинов, А.В. Антонов, В.А. Чепурко // Надежность. – 2018. – № 18(2). – С. 3-9.

7. Kijima M. A useful generalization of renewal theory: Counting process governed by non-negative markovian increments [Text] / M.Kijima, N. Sumita // Journal of Applied Probability. –1986. –Vol. 23. – Pp. 71-88.

8. Каминский М. Применение метода Монте-Карло к оценке обобщенного процесса восстановления при анализе данных об отказах в период действия гарантийных обязательств [Текст] / М. Каминский, В. Кривцов // Reliability: Theory & Applications. – 2006 – №1. – С. 32-34.

9. Wibowo W. On approaches for repairable system analysis: Renewal Process, Nonhomogenous Poisson Process, General Renewal Process [Text] / W. Wibowo // Indonesia, Jurnal Industri. – 2010. – Vol.9. – №1. – P. 60-66.

10. Антонов А.В. Оценка показателей надежности систем стареющего типа на примере систем ядерно-энергетической отрасли [Текст] / А.В. Антонов, В.А. Чепурко // Надежность. – 2010. – №1(33). – С. 18-29.

Сведения об авторах

Александр В. Анкудинов – аспирант отделения интеллектуальных кибернетических систем ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Российская Федерация, Обнинск, e-mail: anck93@yandex.ru.

Александр В. Антонов – доктор технических наук, профессор, главный эксперт Международного центра подготовки персонала Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Техническая академия Росатома», Российская Федерация, Обнинск, e-mail: AVAntonov@rosatomtech.ru.

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

Поступила: 06.02.2019

План испытаний с добавлением

Виктор С. Михайлов, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно исследовательский институт химии и механики им. Д.М. Менделеева» ФГУП «ЦНИИХМ», Российская Федерация, Москва



Виктор С. Михайлов

Резюме. На практике часто приходится сталкиваться с задачей определения величин показателей надежности (точечное оценивание). Обычно, в качестве показателя надежности выбирают вероятность безотказной работы (далее – ВБР). Исходя из экономических соображений, для определительных испытаний на надежность высоконадежных и дорогостоящих изделий выставляют минимум изделий, планируя получить безотказные испытания (приемочное число $Q = 0$) или испытания с одним отказом ($Q = 1$), тем самым минимизируя количество испытуемых изделий. Наиболее интересен последний случай. Выбирая конкретные величины приемочного числа и количества испытуемых изделий, испытатель делает предварительную оценку планируемой ВБР, а выбирая $Q = 1$, испытатель минимизирует риски от возникновения маловероятного случайного отказа. Однако с ростом величины Q растет и количество испытуемых изделий, что делает испытания дорогостоящими. Поэтому сокращение количества изделий при испытаниях на надежность является проблемой номер один. **Формулировка плана испытаний с добавлением.** Будем рассматривать биномиальные испытания (первоначальная выборка) с добавлением одного изделия (дополнительная выборка) на испытания при отказе любого из первоначально выставленных испытуемых изделий. Испытания заканчиваются, когда заканчиваются испытания всех выставленных изделий с любым исходом (в первичной и дополнительной выборках). Здесь и далее имеется в виду, что время испытаний одно и то же для всех изделий. Испытания с приемочным числом отказов больше нуля ($Q > 0$), проводимые по схеме испытаний с добавлением, позволяют сократить число испытуемых изделий за счет успешно проведенных испытаний на первоначальной выборке. **Цель работы.** Целью работы является построение и исследование оценок ВБР для плана испытаний с добавлением. **Методы исследования оценок показателей надежности.** В основе поиска эффективных оценок лежит интегральный подход, сформулированный в работах [6, 8-10]. В основе интегрального подхода лежит построение правила выбора эффективной оценки, заданного на сумме значений абсолютных (или относительных) смещений оценок, выбранных из некоторого множества, от параметра закона распределения, где в нашем случае n – количество изделий, первоначально выставленных на испытания. **Критерий выбора эффективной оценки для ВБР.** Критерий выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) на множестве оценок, основан на суммарном квадрате абсолютных (или относительных) смещений математического ожидания оценок $E\hat{\theta}(n, k, m)$ от вероятности отказа p для всех возможных значений p , n . **Выводы.** Проведено построение и исследование оценок ВБР для плана испытаний с добавлением. Для варианта $n > 3$ оценка ВБР $\hat{P}(n, k, m) = 1 - \hat{p}(n, k, m) = 1 - (k+m)/(n+k)$ в сравнении с неявно заданной оценкой $\hat{V}(n, k, m) = 1 - \hat{v}(n, k, m)$ является эффективной по смещению. Испытания с приемочным числом отказов больше нуля ($Q > 0$), проводимые по схеме испытаний с добавлением, позволяют сократить число испытуемых изделий за счет успешно проведенных испытаний на первоначальной выборке. Оценки \hat{p}_2 , \hat{w}_2 и \hat{w}_3 являются несмещенными и, как следствие, эффективными по смещению для вариантов соответственно $n = 2$ и $n = 3$.

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

Формат цитирования: Михайлов В.С. План испытаний с добавлением // Надежность. 2019. №3. С. 12-20. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-12-20

Введение

На практике часто приходится сталкиваться с задачей определения величин показателей надежности (точечное оценивание). Обычно, в качестве показателя надежности выбирают вероятность безотказной работы (ВБР). Исходя из экономических соображений, для определительных испытаний на надежность высоконадлежащих и дорогостоящих изделий выставляют минимум изделий, планируя получить безотказные испытания (приемочное число $Q=0$) или испытания с одним отказом ($Q=1$), тем самым минимизируя количество испытываемых изделий. Наиболее интересен последний случай. Выбирая конкретные величины приемочного числа Q и количества испытываемых изделий, испытатель делает предварительную оценку планируемой ВБР, а выбирая $Q=1$, испытатель минимизирует риски от возникновения маловероятного случайного отказа. Однако с ростом величины Q растет и количество испытываемых изделий, что делает испытания дорогостоящими. Поэтому сокращение количества изделий при испытаниях на надежность является проблемой номер один.

Формулировка плана испытаний с добавлением

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

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

Цель работы

Целью работы является построение и исследование оценок ВБР для плана испытаний с добавлением.

Построение и исследование оценок ВБР для плана испытаний с добавлением

Пусть n – число испытываемых однотипных изделий, первоначально выставленных на испытания, а $R=r$ – число отказавших изделий, включающее k отказов из n первоначально выставленных на испытания изделий и m отказов из k вторично выставленных на испытания изделий, т.е. $r=k+m$. Тогда число испытываемых изделий составит $N=n+k$. Пусть отказы являются независимыми

событиями, тогда вероятность возникновения ровно r отказов за испытания (далее – $P_n(R=r)$) легко выразить посредством производящей функции, для этого воспользуемся свойствами производящей функции [3].

Производящая функция (далее – $\Psi_R(z)$) – математическое ожидание от степенной функции вида z^R , т.е. для плана испытаний с добавлением [3]:

$$\Psi_R(z) = Ez^R = \sum_{i=0}^{2n} z^i P_n(R=i).$$

Для случая, когда первоначальная выборка состоит из одного изделия производящая функция примет вид [3]:

$$\Psi_R(z) = Ez^R = \sum_{i=0}^{2n} z^i P_n(R=i) = q + qpz + p^2 z^2.$$

Тогда для случая, когда первоначальная выборка состоит из n изделий, производящая функция примет вид [3]:

$$\Psi_{n;R}(z) = (q + qpz + p^2 z^2)^n.$$

Вероятность получить ноль отказов за испытания первоначальной выборки объема n [3]:

$$P_n(R=0) = \Psi_{n;R}(z) \Big|_{z=0} = q^n.$$

Математическое ожидание случайной величины R находят из выражения [3]: $ER = \Psi_{n;R}^{(1)}(z=1)$ – первая производная.

А вероятность получить ровно r отказов – из выражения [3]:

$$P_n(R=r) = \Psi_{n;R}^{(r)}(z=0) / r!.$$

Построим первую производную производящей функции:

$$\Psi_{n;R}^{(1)}(z) = n(q + qpz + p^2 z^2)^{n-1} (2p^2 z + pq),$$

откуда непосредственно следует, что среднее число отказов за испытания составит

$$ER = \Psi_{n;R}^{(1)}(z=1) = n(q + qp + p^2)^{n-1} (2p^2 + pq) = np(1+p).$$

Тогда вероятность получить один отказ за испытания вычисляется по формуле:

$$P_n(R=1) = \Psi_{n;R}^{(1)}(z=0) = nq^{n-1} pq = npq^n$$

Построение производных высших порядков имеет громоздкий вид и поэтому не приводятся.

Полученные результаты являются не лучшим вариантом для ведения расчетов, поэтому построим более удобную формулу для вероятности возникновения ровно r отказов за испытания, которая получается из следующей процедуры построения ($n \geq k \geq m; r = k + m \leq 2n$):

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

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

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

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

$$P_n(r=0) = P_n(k=0, m=0) = q^n;$$

$$P_n(r=1) = P_n(k=1, m=0);$$

$$P_n(r=2; r \leq n) = P_n(k=1, m=1) + P_n(k=2, m=0);$$

$$P_n(r=3; r \leq n) = P_n(k=2, m=1) + P_n(k=3, m=0);$$

$$P_n(r=4; r \leq n) = P_n(k=2, m=2) + P_n(k=3, m=1) + P_n(k=4, m=0);$$

$$P_n(r=5; r \leq n) = P_n(k=3, m=2) + P_n(k=4, m=1) + P_n(k=5, m=0);$$

$$P_n(r=6; r \leq n) = P_n(k=3, m=3) + P_n(k=4, m=2) + P_n(k=5, m=1) + P_n(k=6, m=0);$$

$$P_n(r=7; r \leq n) = P_n(k=4, m=3) + P_n(k=5, m=2) + P_n(k=6, m=1) + P_n(k=7, m=0);$$

...

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

...

$$P_n(r=2n) = P_n(k=n, m=n) = p^{2n}.$$

Из логики построения получаем искомую формулу для вероятности возникновения ровно r отказов:

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

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

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

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

которая на всем множестве событий $r=k+m=0, 1, 2, \dots, 2n$ должна быть равна единице. Проверим этот факт.

Вероятностную функцию на всем множестве событий можно представить в виде суммы произведений каждого

члена основного многочлена на многочлен, где многочлены имеют биномиальные коэффициенты, а именно:

$$\begin{aligned} P_n \sum (n, n) &= \sum_{r=0}^{2n} P_n(r) = \sum_{k+m=0}^{2n} P_n(k)P_k(m) = \\ &= \sum_{k+m=0}^{2n} C_n^k p^k q^{n-k} C_k^m p^m q^{k-m} = q^n + C_n^1 p^1 q^{n-1} \sum_{m=0}^1 C_1^m p^m q^{1-m} + \dots + \\ &+ C_n^k p^k q^{n-k} \sum_{m=0}^k C_k^m p^m q^{k-m} + \dots + p^n \sum_{m=0}^n C_n^m p^m q^{n-m} = \\ &= \sum_{k=0}^n C_n^k p^k q^{n-k} = 1, \end{aligned}$$

или сразу представить в виде:

$$P_n \sum (n, n) = \sum_{k=0}^n P_n(k) = \sum_{k=0}^n C_n^k p^k q^{n-k} = 1.$$

Более простым способом можно найти и выражение для ER , так среднее число испытуемых изделий за время испытаний с добавлением состоит из количества первоначально выставленных на испытания изделий и среднего числа отказавших из первоначально выставленных на испытания изделий, т.е. $N=n+np$. Тогда среднее число отказавших изделий за время испытаний с добавлением составит

$$\begin{aligned} E(R, n) &= Np = E(k, n) + E(m, n) = \\ &= np + np * p = (n + np)p = np(1 + p). \end{aligned}$$

Заметим, что именно вероятность $P_n(k, m)$ определяет шансы на исход испытаний (k, m) , поэтому в качестве оценки параметра p следует выбирать оценку, которая доставляет максимум вероятности $P_n(k, m)$.

Решим классическую задачу определения максимума функции

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

относительно переменной p . Для этого прологарифмируем функцию $b(r, p, k, n)$, возьмем производную относительно переменной p , приравняем полученный результат нулю и решим полученное уравнение относительно переменной p . Полученная оценка $\hat{p} = r / (n + k) = r / (n + r - m)$ доставляет максимум функции $b(r, p, k, n)$. Изучим свойства полученной оценки $\hat{p} = r / (n + k)$ и как следствие оценки ВБР

$$\hat{P} = 1 - \hat{p} = 1 - r / (n + k) = (n - m) / (n + k).$$

Пусть $k + m = r > 1$, тогда для различных $k_1 > k_2, m_1 < m_2$ выполняется неравенство

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

т.е. надежность контролируемой партии изделий (ВБР: $\hat{P}(k_1, m_1) = 1 - \hat{p}(k_1, m_1)$) по результатам испытаний выборки, в которой количество отказавших из первоначально

чально выставленных испытуемых изделий k_1 больше, чем в выборке сравниваемой партии изделий k_2 при одном и том же количестве отказов r , всегда будет выше $\hat{P}(k_1, m_1) > \hat{P}(k_2, m_2)$, чем у этой сравниваемой партии изделий. Т.е. при сравнении результатов двух окончательно сформированных выборок (при равенстве в количестве отказов) приоритет в надежности, отдается изделиям, чьи отказы в основном произошли в первоначально выставленной выборке, а не в дополнительной. И, в этом смысле, дополнительная выборка дает шанс на реабилитацию при неудачных первичных испытаниях. И в этом преимущество плана испытаний с добавлением.

Нахождение несмещенных оценок

Определим математическое ожидание оценки $\hat{p}(n; k, m) = r / (n + k)$:

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

Можно доказать, что оценка $E(\hat{p}(n; k, m))$ в общем виде смещенная. Чтобы доказать этот факт достаточно показать это на частом случае.

Определим математическое ожидание оценки $\hat{p}(n=1) = r / (1+k)$:

$$\begin{aligned} n=1: E(\hat{p}(n=1)) &= \sum_{r=0}^2 \frac{r}{1+k} P_1(r) = 0 * P_1(k=0, m=0) + \\ &+ \frac{1}{2} P_1(k=1, m=0) + 1 * P_1(k=1, m=1) = \\ &= \frac{1}{2} p q + p^2 = 0,5(p + p^2). \end{aligned}$$

Следовательно, оценка $\hat{p}(n=1) = r / (1+k)$ – смещенная. Оценка $\hat{p}(n=1)$ представима в виде:

$$\hat{p}(n=1) = \frac{r}{1+k} \equiv \begin{cases} 0, & r=0, k=0, m=0; \\ \frac{1}{2}, & r=1, k=1, m=0; \\ 1, & r=2, k=1, m=1. \end{cases}$$

Приравнявая математическое ожидание неизвестной оценки $\hat{w}_1(n=1; k, m)$ параметру p легко получить несмещенную оценку вероятности отказа \hat{w}_1 для случая $n=1$; p_0, p_1, p_2 – неизвестные вероятности:

$$E(\hat{w}_1) = \sum_{r=0}^2 \frac{r}{1+k} \hat{w}_1 P_1(r) = p_0(1-p) + p_1(p-p^2) + p_2 p^2 = p;$$

$$p^0 : p_0 p^0 = p_0 * 1 = 0 \Rightarrow p_0 = 0; p^1 : p_1 p^1 = p \Rightarrow p_1 = 1;$$

$$p^2 : -p^2 p_1 + p^2 p_2 = 0 \Rightarrow p_2 = p_1 = 1;$$

$$\hat{w}_1 \equiv \begin{cases} 0, & r=0, k=0, m=0; \\ 1, & r=1, k=1, m=0; \\ 1, & r=2, k=1, m=1. \end{cases}$$

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

Определим математическое ожидание оценки $\hat{p}(n=2) = r / (2+k)$

$$\begin{aligned} n=2: E(\hat{p}(n=2)) &= \sum_{r=0}^4 \frac{r}{2+k} P_2(r) = 0 * P_2(k=0, m=0) + \\ &+ (1/3) P_2(k=1, m=0) + (2/3) P_2(k=1, m=1) + \\ &+ (1/2) P_2(k=2, m=0) + (3/4) P_2(k=2, m=1) + 1 * \\ &* P_2(k=2, m=2) = 0 * q^2 + (1/3) 2 p^1 q^2 + (2/3) 2 p^2 q + \\ &+ (1/2) p^2 q^2 + (3/4) 2 q^3 q + 1 * p^4 = 2 p (1-p) (1/3 - (1/3) p) + \\ &+ (2/3) p + (1/4) p - (1/4) p^2 + (3/2) p^3 - (3/2) p^4 + p^4 = \\ &= 2 p (1-p) (1/3 + (7/12) p - (1/4) p^2) + (3/2) p^3 - \\ &- (3/2) p^4 + p^4 = \left(\frac{2}{3}\right) p + \left(\frac{7}{6}\right) p^2 - \left(\frac{1}{2}\right) p^3 - \left(\frac{2}{3}\right) p^2 - \left(\frac{7}{6}\right) p^3 + \\ &+ \left(\frac{1}{2}\right) p^4 + \left(\frac{3}{2}\right) p^3 - \left(\frac{3}{2}\right) p^4 + p^4 = \left(\frac{2}{3}\right) p + \left(\frac{1}{2}\right) p^2 - \left(\frac{1}{6}\right) p^3; \end{aligned}$$

$$p=0,5: E(\hat{p}(n=2)) = 1/3 + 1/8 - 1/(6*8) = 21/48.$$

Следовательно, оценка $\hat{p}(n=2) = r / (2+k)$ – смещенная. Оценка $\hat{p}(n=2)$ представима в виде:

$$\hat{p}(n=2) \equiv \begin{cases} 0, & r=0, k=0, m=0; \\ 1/3, & r=1, k=1, m=0; \\ 2/3, & r=2, k=1, m=1; \\ 1/2, & r=2, k=2, m=0; \\ 3/4, & r=3, k=2, m=1; \\ 1, & r=4, k=2, m=2. \end{cases}$$

Заметим, что для полученных результатов $\hat{p}(r=2, k=1, m=1) = 2/3$ и $\hat{p}(r=2, k=2, m=0) = 1/2$ надежность контролируемой партии изделий, у которой некоторые изделия в выборке отказали только в первоначальном испытании, выше, чем у изделий, чьи отказы возникали при повторном испытании и при одном и том же количестве отказов. Что соответствует свойству оценки $\hat{p} = r / (n+k)$, выражаемому формулой (2).

Легко получить несмещенную оценку (\hat{s}_2) для параметра p :

$$\hat{s}_2 \equiv \begin{cases} 0, & r=0, k=0, m=0; \\ 1/2, & r=1, k=1, m=0; \\ 5/8, & r=2, k=1, m=1; \\ 6/8, & r=2, k=2, m=0; \\ 7/8, & r=3, k=2, m=1; \\ 1, & r=4, k=2, m=2. \end{cases}$$

Для этого следует математическое ожидание предполагаемой несмещенной оценки с неизвестными вероятностями p_{ik} приравнять параметру p и провести необходимые преобразования:

$$E(\hat{p}(n=2)) = \sum_{r=0}^4 \hat{p}(n=2)P_2(r) = [p_{00} = 0; p_{22} = 1] = p_{00}q^2 + p_{10}2pq^2 + p_{11}2p^2q + p_{20}p^2q^2 + p_{21}2p^3q + p^4 = 2p_{10}p - 2p_{10}2p^2 + 2p_{10}p^3 + 2p_{11}p^2 - 2p_{11}p^3 + p_{20}p^2 - 2p_{20}p^3 + p_{20}p^4 + p_{21}2p^3 - p_{21}2p^4 + p_{22}p^4 = 2p_{10}p - 4p_{10}p^2 + 2p_{11}p^2 + p_{20}p^2 + 2p_{10}p^3 - 2p_{11}p^3 - 2p_{20}p^3 + p_{21}2p^3 + p_{20}p^4 - p_{21}2p^4 + p_{22}p^4 = p.$$

Для того чтобы выполнялось это равенство, необходимо, чтобы коэффициенты при различных степенях параметра p равнялись нулю, за исключением первой степени, при которой коэффициент должен быть равен единице, а именно:

$$\begin{aligned} p^1 : 2p_{10}p^1 = p &\Rightarrow p_{10} = 1/2; \\ p^2 : -4p_{10}p^2 + 2p_{11}p^2 + p_{20}p^2 = 0 &\Rightarrow 2p_{11} + p_{20} = 2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2p_{11} = 2 - p_{20}; \\ p^3 : 2p_{10}p^3 - 2p_{11}p^3 - 2p_{20}p^3 + 2p_{21}p^3 = 0 &\Rightarrow 2p_{11} + 2p_{20} - 2p_{21} = \\ = 1 &\Rightarrow 2 - p_{20} + 2p_{20} - p_{20} - 1 = 1 \Rightarrow p_{20} = 6/8 \Rightarrow p_{11} = 5/8; \\ p^4 : p_{20}p^4 - p_{21}2p^4 + p_{22}p^4 = 0 &\Rightarrow [p_{22} = 1] : 2p_{21} - p_{20} = \\ = p_{22} &\Rightarrow 2p_{21} = p_{20} + 1 \Rightarrow p_{21} = 7/8. \end{aligned}$$

Данная неоднородная система линейных уравнений всегда разрешима и имеет бесконечное множество подобных решений (число переменных больше, чем число уравнений):

$$p_{00} = 0; p_{10} = 1/2; p_{11} = 5/8; p_{20} = 6/8; p_{21} = 7/8; p_{22} = 1.$$

Заметим, что вероятности отказов должны удовлетворять нестрогому неравенству $0 \leq p_{ij} \leq 1$. Заметим также, что на практике для двух контролируемых партий изделий и при одном и том же количестве отказов в сформированных выборках для полученных результатов $p_{20} = 6/8$ и $p_{11} = 5/8$ надежность первой контролируемой партии изделий $1 - p_{20} = 1 - 6/8 = 2/8$, у которой некоторые изделия в первоначальной и дополнительной выборках отказали только в первоначальном испытании ($k=2, m=0$), следует считать ниже, чем у изделий второй контролируемой партии $1 - p_{11} = 1 - 5/8 = 3/8$, чьи отказы возникали и при повторном испытании в дополнительной выборке. Такой эффект противоречит свойству (см. формулу (2)) смещенной оценки $\hat{p}(r = k + m, k, m) = r / (n + k)$ и вносит неопределенность при выборе эффективной оценки.

В дальнейшем, чтобы избежать противоречий при поиске новых оценок вероятности отказа, будем исходить из того, что величины оценок для одного и

того же количества отказов не зависят от того в какой выборке (первичной или дополнительной) произошли отказы. Следовательно, этот принцип по поиску новых оценок вероятности отказа $\hat{w}(n; k, m)$ можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{w}(k_{-1} + m_{-1} = r, k_{-1}, m_{-1}) &= \\ = \hat{w}(k_{-2} + m_{-2} = r, k_{-2}, m_{-2}), \end{aligned} \quad (3)$$

т.е. отказываемся от свойства оценки \hat{p} , выражаемого формулой (2).

Аналогично предыдущим рассуждениям продемонстрируем этот способ поиска новых оценок:

$$\hat{w}_2(0) := p_0; \hat{w}_2(1) := p_1; \hat{w}_2(2) := p_2; \hat{w}_2(3) := p_3; \hat{w}_2(4) := p_4$$

$$\begin{aligned} E(\hat{w}_2) = \sum_{r=0}^4 \hat{w}_2(r)P_2(r) = p = p_0q^2 + p_12pq^2 + p_22p^2q + \\ + p_2p^2q^2 + p_32p^3q + p_4p^4 = 2p_1p - 2p_12p^2 + 2p_1p^3 + \\ + 2p_2p^2 - 2p_2p^3 + p_2p^2 - 2p_2p^3 + p_2p^4 + p_32p^3 - p_32p^4 + \\ + p_4p^4 2p_1p - 4p_1p^2 + 2p_2p^2 + p_2p^2 + 2p_1p^3 - 2p_2p^3 - \\ - 2p_2p^3 + p_32p^3 + p_2p^4 - p_32p^4 + p_4p^4. \end{aligned}$$

Для того чтобы выполнялось это равенство, необходимо, чтобы коэффициенты при различных степенях равнялись нулю, за исключением первой степени, при которой коэффициент должен быть равен единице:

$$p^0 : p_0p^0 = p_0 * 1 = 0 \Rightarrow p_0 = 0;$$

$$p^1 : 2p_1 = 1 \Rightarrow p_1 = 1/2;$$

$$p^2 : -4p_1p^2 + 2p_2p^2 + p_2p^2 = 0 \Rightarrow -2 + 3p_2 = 0 \Rightarrow p_2 = 2/3;$$

$$\begin{aligned} p^3 : 2p_1p^3 - 2p_2p^3 - 2p_2p^3 + p_32p^3 = \\ = 0 \Rightarrow 1 - 8/3 + 2p_3 = 0 \Rightarrow p_3 = 5/6; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p^4 : p_2p^4 - p_32p^4 + p_4p^4 = \\ = 0 \Rightarrow 2/3 - 10/6 + p_4 = 0 \Rightarrow p_4 = 1; \end{aligned}$$

$$p_0 = 0; p_1 = 1/2; p_2 = 2/3; p_3 = 5/6; p_4 = 1.$$

Данная неоднородная система линейных уравнений всегда разрешима и имеет единственное решение (число переменных $2 * n$ равно рангу (числу линейно независимых уравнений) [5]), которое и будет принято за оценку $\hat{w}_2!$

Аналогично предыдущему примеру (случай $n=2$), определим математическое ожидание оценки $\hat{p}(n=3) = r / (3 + k)$:

$$n = 3 : E(\hat{p}(n=3)) = \sum_{r=0}^6 \frac{r}{3+k} P_3(r).$$

Произведя последовательно все необходимые манипуляции (не приводятся из-за громоздкости выражений), приходим к выводу, что оценка $\hat{p}(n=3) = \sum_{r=0}^6 \frac{r}{3+k}$ – смещенная. Оценка $\hat{p}(n=3) = \sum_{r=0}^6 \frac{r}{3+k}$ представима в виде:

$$\hat{p}(n=3) = \sum_{r=0}^6 \frac{r}{3+k} \equiv \begin{cases} 0, r=0, k=0, m=0; \\ 1/4, r=1, k=1, m=0; \\ 1/2, r=2, k=1, m=1; \\ 2/5, r=2, k=2, m=0; \\ 3/5, r=3, k=2, m=1; \\ 4/5, r=4, k=2, m=2; \\ 1/2, r=3, k=3, m=0; \\ 2/3, r=4, k=3, m=1; \\ 5/6, r=5, k=3, m=2; \\ 1, r=6, k=3, m=3. \end{cases}$$

Найдем несмещенную оценку вероятности отказа для случая $n=3$ ($\hat{w}_3(r)$), используя принцип, выражаемый формулой (3). Определение величин вероятностей этой оценки проводится через ее математическое ожидание, которое должно равняться оцениваемому параметру p :

$$\hat{w}_3(0) := p_0; \hat{w}_3(1) := p_1; \hat{w}_3(2) := p_2; \hat{w}_3(3) := p_3; \\ \hat{w}_3(4) := p_4; \hat{w}_3(5) := p_5; \hat{w}_3(6) := p_6;$$

$$E(\hat{w}_3(r)) = p = p_0 q^3 + p_1 3 p q^3 + 3 p_2 (p^2 q^2 + p^2 q^3) + \\ + p_3 (6 p^3 q^2 + p^3 q^3) + p_4 (3 p^4 q + 3 p^4 q^2) + p_5 3 p^5 q + \\ + p_6 p^6 = 3 p_1 (p - 3 p^2 + 3 p^3 - p^4) + 3 p_2 (p^2 - 2 p^3 + p^4) + \\ + 3 p_3 (p^2 - 3 p^3 + 3 p^4 - p^5) + 6 p_4 (p^3 - 2 p^4 + p^5) + \\ + p_5 (p^3 - 3 p^4 + 3 p^5 - p^6) + 3 p_4 (p^4 - p^5) + \\ + 3 p_4 (p^4 - 2 p^5 + p^6) + 3 p_5 (p^5 - p^6) + p_6 p^6$$

$$p^0 : p_0 p^0 = p_0 * 1 = 0; p_0 = 0;$$

$$p^1 : 3 p_1 = 1; p_1 = 1/3;$$

$$p^2 : -9 p_1 + 3 p_2 + 3 p_2 = 0 \Rightarrow 6 p_2 = 3 \Rightarrow p_2 = 1/2;$$

$$p^3 : 9 p_1 - 6 p_2 - 9 p_2 + 6 p_3 + p_3 = 0 \Rightarrow 6 p_2 + \\ 9 p_2 - 6 p_3 - p_3 = 3 \Rightarrow p_3 = 9/14;$$

$$p^4 : -3 p_1 + 3 p_2 + 9 p_2 - 12 p_3 - 3 p_3 + 3 p_4 + 3 p_4 = \\ = 0 \Rightarrow 12 p_2 - 15 p_3 + 6 p_4 = 1 \Rightarrow p_4 = 65/84;$$

$$p^5 : -3 p_2 + 6 p_3 + 3 p_3 - 3 p_4 - 6 p_4 + 3 p_5 = 0 \Rightarrow p_5 = 75/84;$$

$$p^6 : -p_3 + 3 p_4 - 3 p_5 + p_6 = 0 \Rightarrow p_6 = 1;$$

$$\hat{w}_3(r) \equiv \begin{cases} 0, r=0; \\ 1/3, r=1; \\ 1/2, r=2; \\ 9/14, r=3; \\ 65/84, r=4; \\ 75/84, r=5; \\ 1, r=6. \end{cases}$$

Аналогичный поиск несмещенных оценок для случаев $n=4$ и $n=5$ к успеху не привел, т.к. полученные результаты величин вероятностей превысили единицу, что не приемлемо. Из этого следует, что для $n>3$ построение несмещенной оценки по правилу $\hat{p}(k_1 + m_1 = r, k_1, m_1) = \hat{p}(k_2 + m_2 = r, k_2, m_2)$ проблематично!

Введем новое понятие, а именно: пусть оценка вероятности отказа (далее – \hat{v}) центрирует вероятностную функцию $P_{n\Sigma}$ относительно предельных границ изменения ее значений. Это означает, что интервалы $[0; \hat{v}]$ и $[\hat{v}; 1]$ значений этих оценок с вероятностью равной 0,5 накрывают оцениваемый параметр p . Такие оценки будем называть центрируемыми. Заметим, что центрируемые оценки для некоторых планов испытаний близки к эффективным оценкам [6, 8]. В нашем случае центрируемая оценка \hat{v} находится из выражения (заменяя p на \hat{v} в формуле (1)):

$$P_{n\Sigma}(k \leq x, m \leq y, \hat{v}) = \sum_{k=0}^x \sum_{m+k \leq x+y, m \leq k, m \leq y} P_n(k, m, \hat{v}) = 0,5.$$

Чтобы решение этого уравнения существовало и было единственным, необходимо проверить монотонность $P_{n\Sigma}$ относительно переменной p [1, 7]. Напомним, что $P_n(k, m) := C_n^k C_k^m p^{k+m} q^{n-m}, r = k + m$.

Беря производную от $P_{n\Sigma}$ по параметру p , получаем:

$$(P_{n\Sigma}(k \leq x, m \leq y, p))'_p = \\ = \sum_{k=0}^x \sum_{m+k \leq x+y, m \leq k, m \leq y} C_n^k C_k^{r-k} (r p^{r-1} q^{n-r+k} - (n-r+k) p^r q^{n-r+k-1})$$

Из-за громоздкости полученного выражения не удается доказать или опровергнуть монотонность $P_{n\Sigma}$. Однако для наиболее интересных для практики случаев $r=0, r=1$ и $r=2$ это удается. Рассмотрим эти случаи:

$$r=0 : (P_{n\Sigma}(n, p, k=0, m=0))'_p = \\ = C_n^0 C_0^{0-0} [(0+0) p^{-1} q^n - n p^0 q^{n-1}] = -n q^{n-1} < 0;$$

$$\begin{aligned}
 r = 1: & (P_{n\Sigma}(n, p, k = 1, m = 0))'_p = \\
 & = C_n^1 C_1^0 [(1+0)p^0 q^n - npq^{n-1}] - C_n^0 C_0^0 nq^{n-1} = \\
 & = nq^n - n^2 pq^{n-1} - nq^{n-1} = nq^{n-1} (1 - p - np - 1) = \\
 & = -pn(n+1)q^{n-1} < 0; \\
 r = 2: & (P_{n\Sigma}(n, p, k = 1, m = 1))'_p = C_n^1 C_1^1 [(1+1)pq^{n-1} - \\
 & - (n-1)p^2 q^{n-2}] + C_n^1 C_1^0 [(1+0)p^0 q^n - npq^{n-1}] - \\
 & - C_n^0 C_0^0 nq^{n-1} = 2npq^{n-1} - n(n-1)p^2 q^{n-2} + nq^n - n^2 pq^{n-1} - \\
 & - nq^{n-1} = npq^{n-2} (2(1-p) - (n-1)p) - pn(n+1)q^{n-1} = \\
 & = npq^{n-2} (2-p-np) - pn(n+1)q^{n-1} = npq^{n-2} (2-n-1) \leq 0 \\
 \\
 r = 2: & (P_{n\Sigma}(n, p, k = 2, m = 0))'_p = C_n^2 C_2^0 [(2+0)pq^n - \\
 & - np^2 q^{n-1}] + C_n^1 C_1^0 [(1+0)p^0 q^n - np^1 q^{n-1}] - C_n^0 C_0^0 nq^{n-1} = \\
 & = n(n-1)pq^n - 0,5n^2(n-1)p^2 q^{n-1} + nq^n - n^2 pq^{n-1} - \\
 & - nq^{n-1} = n(n-1)pq^{n-1} (1-p-0,5np) - pn(n+1)q^{n-1} = \\
 & = npq^{n-2} (0,5np - n) \leq 0.
 \end{aligned}$$

Следовательно, для случаев $r=0, r=1, r=2$ вероятностная функция $P_{n\Sigma}$ монотонно убывает с ростом параметра p , а, следовательно, центрируемая оценка \hat{v} параметра p для плана испытаний с добавлением является единственной.

Из определения центрируемой оценки следует, что она определяет нижнюю (верхнюю) доверительную границу (далее – НДГ (ВДГ)) интервала неизвестного параметра p с доверительной вероятностью $\gamma=0,5$ или уровнем значимости $\alpha=1-\gamma=0,5$. С другой стороны,

любую оценку НДГ (ВДГ) интервала неизвестного параметра p можно трактовать как точечную оценку параметра p с сильным смещением (вниз – для НДГ и вверх – для ВДГ). Односторонние НДГ (далее – \hat{p}_n) и ВДГ (далее – \hat{p}_e) интервала неизвестного параметра p с доверительной вероятностью $\gamma=1-\alpha$ вычисляются соответственно по формулам:

$$P_{n\Sigma}(x, y, \hat{p}_n) = \gamma, P_{n\Sigma}(x, y, \hat{p}_e) = \alpha.$$

Границы центрального доверительного интервала вычисляются по формулам [4]:

$$P_{n\Sigma}(x, y, \hat{p}_n) = 1 - \alpha / 2, P_{n\Sigma}(x, y, \hat{p}_e) = \alpha / 2.$$

В таблицах 1, 2 и 3 приведены соответственно значения НДГ, ВДГ параметра p и значения центрируемой оценки \hat{v} для наиболее реальных для практики объемов испытаний и событий возникновения отказа.

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

Методы исследования оценок показателей надежности

В основе поиска эффективных оценок лежит интегральный подход, сформулированный в работах [6, 8-10]. В основе интегрального подхода лежит построение правила выбора эффективной оценки $\hat{\theta}_0(n; k, m)$, заданного на сумме значений абсолютных (или относительных)

Таблица 1 – Значения НДГ параметра p для различных объемов испытаний (по горизонтали) и событий возникновения отказа (по вертикали) при $\gamma=0,8$

	n	1	2	3	4	5	6	7	8
$k=0$	$m=0$	0,199	0,105	0,071	0,054	0,043	0,036	0,031	0,027
$k=1$	$m=0$	0,445	0,287	0,212	0,168	0,139	0,119	0,104	0,092
$k=1$	$m=1$	1	0,445	0,287	0,212	0,168	0,139	0,119	0,104

Таблица 2 – Значения ВДГ параметра p для различных объемов испытаний (по горизонтали) и событий возникновения отказа (по вертикали) при $\alpha=0,2$

	n	1	2	3	4	5	6	7	8
$k=0$	$m=0$	0,800	0,552	0,415	0,331	0,275	0,235	0,205	0,182
$k=1$	$m=0$	0,894	0,710	0,582	0,488	0,422	0,370	0,330	0,297
$k=1$	$m=1$	1	0,894	0,710	0,582	0,488	0,422	0,370	0,330

Таблица 3 – Значения центрируемой оценки \hat{v} для различных объемов испытаний (по горизонтали) и событий возникновения отказа (по вертикали)

	n	1	2	3	4	5	6	7	8
$k=0$	$m=0$	0,292	0,206	0,159	0,129	0,108	0,094	0,082	0,074
$k=1$	$m=0$	0,707	0,5	0,384	0,313	0,264	0,226	0,201	0,179
$k=1$	$m=1$	1	0,707	0,5	0,384	0,313	0,264	0,226	0,201

Таблица 4 – Результаты подстановки предложенных оценок вероятности отказа в функционалы

 $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ и $D(\hat{\theta}(n; k, m))$

Функционал	$\hat{p}_2(n=2)$	$\hat{w}_2(n=2)$	$\hat{w}_3(n=3)$	$\hat{p}(n>3)$	$\hat{v}(n>3)$
$L(\hat{\theta}(n; k, m))$	$2,6 \cdot 10^{-33}$	$2,6 \cdot 10^{-33}$	$5,1 \cdot 10^{-33}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$
$D(\hat{\theta}(n; k, m))$	0,0687	0,0418	0,0418	0,0187	0,0164

смещений оценок $\hat{\theta}(n; k, m)$, выбранных из некоторого множества, от параметра закона распределения, где в нашем случае n – количество изделий, первоначально выставленных на испытания.

Критерий выбора эффективной оценки для ВБР

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

Для выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) потребуется только понятие абсолютно эффективной оценки по смещению и изменение параметра p в пределах $0 \leq p \leq 1$. Для получения конечного результата в качестве критерия получения эффективной оценки $\hat{\theta}(n; k, m)$ строится функционал (далее – $L(\hat{\theta}(n; k, m))$) на ограниченном множестве $n_1 \leq n_i \leq n_j, i = 1, \dots, j [6, 8-10]$:

$$L(\hat{\theta}(n; k, m)) = \frac{1}{j} \sum_{n_1 \leq n_i \leq n_j} \int_0^1 (E\hat{\theta}(n_i; k, m) - p)^2 dp \quad (4)$$

Оценка $\hat{\theta}_0(n; k, m)$, минимизирующая функционал $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ на заданном множестве оценок, называется эффективной оценкой по смещению на заданном множестве смещенных оценок. Среди оценок, доставляющих примерно один и тот же минимум функционалу $L(\hat{\theta}(n; k, m))$, следует выбрать оценку, которая имеет минимальное отклонение в среднеквадратическом смысле (классическое определение эффективной оценки [1]). Данную оценку будем называть как более эффективную в сравнении с выбранными.

Для выбора оценок, обладающих минимальным отклонением, строится функционал (далее – $D(\hat{\theta}(n; k, m))$), основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных отклонений оценок $\hat{\theta}(n; k, m)$ от параметра p для всех возможных значений $p, n [6, 8-10]$:

$$D(\hat{\theta}(n; k, m)) = \frac{1}{j} \sum_{n_1 \leq n_i \leq n_j} \int_0^1 E(\hat{\theta}(n_i; k, m) - p)^2 dp \quad (5)$$

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

Ограничим объем испытаний $0 \leq n \leq 10$, что для высоконадежных и сложных изделий является пределом затрат. Тогда формула (4) примет вид:

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

А формула (5) примет вид:

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

В таблице 4 приведены результаты подстановки в функционалы $L(\hat{\theta}(n; k, m))$ и $D(\hat{\theta}(n; k, m))$ в соответствии с формулами (4) и (5) следующих оценок вероятности отказа $\hat{\theta}$: $\hat{p}, \hat{p}_2, \hat{w}_2, \hat{w}_3, \hat{v}$. Вычисления проводились с шагом $dp = 10^{-3}$.

Из таблицы 4 следует, что для вариантов $n>3$ оценка \hat{p} обладает минимальным смещением в сравнении с оценкой \hat{v} . Оценки \hat{p}_2, \hat{w}_2 и \hat{w}_3 являются несмещенными и, как следствие, эффективными для вариантов соответственно $n=2$ и $n=3$.

Из таблицы 4 также следует, что оценка \hat{v} имеет небольшое преимущество в сравнении с оценкой \hat{p} в смысле минимального отклонения своих значений от параметра p . Поэтому оценку $\hat{p} = (k + m) / (n + k)$ можно принять в качестве искомой эффективной по смещению оценки среди предложенных.

Заметим, что при вычислениях варьирование шага суммирования приводит к изменению результата функционала, но не меняет сути вещей – результат сравнения оценок не меняется.

Пример. Изделия входят в состав агрегата и применяются по схеме с резервированием. Требуется сделать точечную оценку ВБР изделий по результатам биномиальных испытаний на надежность. При планировании определительных испытаний на надежность испытатель при расчете объема выборки ($n=6$) учел один отказ ($Q=1$), минимизируя риски от возникновения этого маловероятного случайного отказа. При этом прогнозируемое значение ВБР составило $\hat{P} = 1 - 1/n = 5/6 = 0,83$, что соответствует требованиям технического задания (ВБР должно быть не менее 0,83) на изделие. Учитывая, что за время испытаний отказ изделия маловероятен, было принято решение испытания на надежность проводить по схеме испытаний с дополнением с целью сокращения издержек. В процессе испытаний допустимы два исхода: безотказные испытания и испытания с одним отказом (планируемые). В случае безотказных испытаний отпадает необходимость в испытаниях дополнительной выборки. Рассмотрим эти варианты:

1) Безотказные испытания. Безотказные испытания с дополнением:

$$\hat{P} = 1 - \hat{p}(n=5, k=0, m=0) = \\ = 1 - r / (n+k) = 1 - 0 / (5+0) = 1;$$

$$\hat{V} = 1 - \hat{v}(n=5, k=0, m=0) = 1 - 0,108 = 0,892.$$

Односторонняя НДГ ВБР при $n=5, \gamma=1-\alpha=1-0,2=0,8$ составила (см. таблицу 2)

$$\hat{P}_n(n=5, r=0) = 1 - \hat{p}_o(n=5, k=0, m=0) = \\ = 1 - 0,275 = 0,725.$$

Безотказные биномиальные испытания:

$$\hat{P}(n=6, r=0) = 1 - r / n = 1 - 0 / 6 = 1.$$

Односторонняя НДГ ВБР при $n=6, r=0, \gamma=0,8$ (находится решением уравнения, составленное по правилу Клоппера-Пирсона [2]) составила

$$\hat{P}_i(n=6, r=0) = (1-\gamma)^{1/6} = 0,764.$$

2) Испытания с одним отказом. Испытания с дополнением и с одним отказом:

$$\hat{P} = 1 - \hat{p}(n=5, k=1, m=0) = \\ = 1 - r / (n+k) = 1 - 1 / (5+1) = 0,83;$$

$$\hat{V} = 1 - \hat{v}(n=5, k=1, m=0) = 1 - 0,264 = 0,736.$$

Односторонняя НДГ ВБР при $n=5, \gamma=1-\alpha=1-0,2=0,8$ составила (см. таблицу 2)

$$\hat{P}_n(n=5, r=1) = 1 - \hat{p}_o(n=5, k=1, m=0) = \\ = 1 - 0,422 = 0,578.$$

Биномиальные испытания с одним отказом:
 $\hat{P} = 1 - r / n = 1 - 1 / 6 = 0,83.$

Односторонняя НДГ ВБР при $n=6, r=1, \gamma=0,8$ (находится решением уравнения, составленное по правилу Клоппера-Пирсона [2]) составила
 $\hat{P}_n(n=6, r=1) = 0,578.$

Выводы

Проведено построение и исследование оценок ВБР для плана испытаний с добавлением. Для варианта $n > 3$ оценка ВБР $\hat{P}(n, k, m) = 1 - \hat{p}(n, k, m) = 1 - (k+m) / (n+k)$ в сравнении с неявно заданной оценкой $\hat{V}(n, k, m) = 1 - \hat{v}(n, k, m)$ является эффективной по смещению.

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

Оценки $\hat{p}_2, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ являются несмещенными и, как следствие, эффективными по смещению для вариантов соответственно $n=2$ и $n=3$.

Библиографический список

1. Боровков А.А. Математическая статистика [Текст] / А.А. Боровков. – Новосибирск: Наука; Издательство Института математики, 1997. – 772 с.
2. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
3. Крупкина Т.В. Теория вероятностей и математическая статистика. Часть 2. Электронный курс лекций [Текст] / Т.В. Крупкина. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 237 с.
4. Шуленин В.П. Математическая статистика. Часть 1. Параметрическая статистика [Текст] / В.П. Шуленин. – Томск.: Издательство НТЛ, 2012. – 540 с.
5. Кострикин А.И. Введение в алгебру. Часть I. Основы алгебры: учебник для вузов [Текст] / А.И. Кострикин. – М.: МЦНМО, 2004. – 272 с.
6. Михайлов В.С. Неявные оценки для плана испытаний типа НБт [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1(21). – С. 64-71.
7. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 1 [Текст] / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1969. – 607 с.
8. Михайлов В.С. Оценки показателей надежности для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану [Текст] / В.С. Михайлов, Н.К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – №4 (24). – С. 29-39.
9. Михайлов В.С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность. – 2016. – № 4. – С. 40-42.
10. Михайлов В.С. Оценка гамма-процентного срока для биномиального плана испытаний [Текст] / В.С. Михайлов // Надежность. – 2019. – № 2. – С. 18-21.

Сведения об авторе

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

Поступила: 14.04.2019

Автономное вождение. О способах применения принципов безопасности

Хендрик Шебе, TÜV Rheinland InterTraffic GmbH, Кельн, Германия



Хендрик Шебе

Резюме. В статье обсуждаются принципы обеспечения безопасности автономного вождения автомобилей. Прежде всего, мы проводим сравнение между принципами и опытом применения автономных или автоматических систем на железнодорожном и автомобильном транспорте. Автоматические поезда метро эксплуатируются в контролируемой и четко определенной среде, пассажиры и посторонние лица отделены от поездов ограждениями, туннелями и т.д. Автомобиль эксплуатируется в гораздо более сложной среде. Далее мы затрагиваем принципы безопасности. Применение принципов обеспечения безопасности (например, отказоустойчивость или безопасный ресурс) обеспечивает разработку и реализацию безопасной системы, которая будет соответствовать положениям стандартов функциональной безопасности. Различия в ответственности живого водителя и технической системы управления на разных уровнях автоматизации процесса вождения требуют применения принципов обеспечения безопасности. Мы рассматриваем подлечащие применению принципы обеспечения безопасности исходя из общих принципов обеспечения безопасности и анализа соответствующего уровня автоматизации по классификации SAE на основе опыта осуществления ряда проектов, предусматривавших реализацию пяти уровней автоматизации вождения согласно классификации SAE. В зависимости от уровня автоматизации технические системы реализуются на основе принципов отказа без последствий, отказоустойчивости или безопасного ресурса.

Ключевые слова: архитектура безопасности, автономное вождение, автомобили.

Формат цитирования: Шебе Х. Автономное вождение. О способах применения принципов безопасности // Надежность. 2019. №3. С. 21-33. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-21-33

Введение

Средства автономного управления автомобилем [2] набирают популярность. Первые системы-демонстраторы уже находятся в эксплуатации [4, 10, 21]. При этом автоматические поезда метро и системы транспортировки людей успешно работают уже много лет.

В настоящей статье мы сравниваем различные уровни автоматизации согласно классификациям UITP [23] и SAE [22] и их влияние на работу системы в целом. Также рассматриваются резервные ручные режимы вождения.

Для автомобильного транспорта в настоящее время доступно множество систем содействия, способных справиться с рядом конкретных ситуаций. Может создаться впечатление, что такие автомобили действуют самостоятельно.

В большинстве случаев автомобили эксплуатируются в гораздо более сложной среде, чем поезда.

Мы приводим описание различий в процедурах допуска для поездов метро, автомобилей и так называемых автоматически управляемых транспортных средствах (АУТС). Рассмотрены юридические требования допуска автомобилей согласно положениям Конвенции о дорожном движении, а также их влияние на свойства системы и поведение водителя.

Автономное вождение к настоящему времени стало важным предметом исследования; осуществляются первые пилотные проекты. В технологиях обеспечения безопасности применение принципов обеспечения

безопасности, например, отказоустойчивости или безопасного ресурса, представляет собой весьма важный инструмент при разработке и реализации безопасной системы, которая будет соответствовать положениям стандартов функциональной безопасности. Принципы обеспечения безопасности для управляемых транспортных систем, в том числе с нематериальными системами наведения, описаны и применяются.

В более ранних работах принципы обеспечения безопасности были описаны и затем применены к управляемому вождению.

В настоящей статье мы проводим систематическое рассмотрение того, какие принципы обеспечения безопасности необходимо применять на различных уровнях систем автономного вождения по SAE, а также показываем способы построения автономной системы. Работа была проведена отчасти на основе общих принципов обеспечения безопасности, отчасти – путем анализа соответствующих уровней SAE на основе опыта реализации ряда проектов.

Согласно резолюции ООН [24] или SAE [22], средства автономного вождения автомобилей классифицируются по пяти различным уровням:

- 0 – Без автоматизации;
- 1 – Помощь водителю;
- 2 – Частичная автоматизация;
- 3 – Условная автоматизация;
- 4 – Высокая степень автоматизации;
- 5 – Полная автоматизация.

На уровнях с 0 по 2 водитель несет полную ответственность за вождение. Начиная с уровня 3, состояние транспортного средства контролируется оборудованием автоматизированного вождения.

Данное различие в мере ответственности между живым водителем и технической системой управления требуют применения принципов обеспечения безопасности. В настоящей статье мы проводим систематическое рассмотрение того, какие принципы обеспечения безопасности необходимо применять на различных уровнях и показываем способы построения такой системы.

Эта задача решается отчасти на основе общих принципов обеспечения безопасности, отчасти – путем анализа соответствующих уровней.

В качестве отправной точки мы используем абстрактную модель системы и показываем, что существует ряд различных возможностей реализации автономного вождения. К важным выводам можно отнести необходимость наличия схемы разрешения конфликтов, которая обеспечивала бы возможность отмены живым водителем решений автономной системы в целях выполнения юридических требований.

Для каждого из пяти уровней автоматизированного вождения согласно классификации SAE [22] в статье выносятся свои принципы обеспечения безопасности. На уровнях с 0 по 2 водитель несет полную ответственность за вождение, но, начиная с уровня 3, состояние транспортного средства контролируется оборудованием автоматизированного вождения. Для того чтобы обеспечить водителю возможность вмешаться в процесс управления, система должна отвечать соответствующему уровню полноты обеспечения безопасности, а у водителя должно быть достаточно времени для перехвата управления. Последнее в значительной мере зависит от уровня автоматизации и скорости, а также окружающей обстановки.

В зависимости от уровня автоматизации технические системы реализуются на основе принципов отказа без последствий или безопасного ресурса. Есть также исключения – технические системы, реализованные на основе принципа отказоустойчивости, при котором автомобиль всегда можно безопасно остановить, например, при движении с малой скоростью или на технически адаптированном участке.

Мы рассматриваем две основные функции – управление и торможение/ускорение – и их роль применительно к автономному вождению. Кроме того, освещены вопросы обнаружения и реагирования на подвижные и неподвижные препятствия.

Согласно двум основополагающим требованиям к автономным системам, они должны быть разработаны в соответствии с положениями действующих стандартов функциональной безопасности и отвечать требованиям определенного уровня УПБА, т.е. уровень полноты безопасности автомобильный ASIL (или УПБ т.е. уровень полноты безопасности SIL), а технические возможности системы автономного вождения должны быть, по меньшей мере, не хуже аналогичных способностей живого водителя.

Отметим, что Вахенфельд [26] предлагает стохастический подход для демонстрации соответствия автономной системы определенному уровню функциональных возможностей или безопасности. Это, однако, может рассматриваться в качестве дополнительных доводов. В качестве основного доказательства безопасности системы выступает соответствующая архитектура безопасности, реализованная согласно правилам функциональной безопасности (см. ИСО 26262 [17]).

В настоящей статье мы проводим общий обзор существующих технических возможностей и технических решений автоматизированного вождения. Особое внимание уделено возможностям и ограничениям искусственного интеллекта. Мы также приводим общий план дальнейших действий.

Текущее состояние вопроса применительно к метрополитенам, системам транспортировки людей и автомобилям

2.1. Метрополитены и системы транспортировки людей

Во многих городах уже эксплуатируются автоматизированные поезда метро и системы транспортировки людей.

Приведем несколько примеров:

- Линия «Канарси» оператора Brooklyn-Manhattan Transit Corporation Нью-Йоркского метрополитена;
- Линии «Центральная», «Северная», «Джубили» и «Виктория» Лондонского метрополитена, на которых реализовано автоведение;
- В метрополитене Нюрнберга существующая линия U2 и новые линии U3 переоборудованы с реализацией автоведения;
- В метрополитене Барселоны на линиях L9 (самая длинная в Европе линия автономного движения), L10 и L11 реализовано автоведение;
- Группа Rio Tinto получила разрешение на введение автономного управления на своей железорудной линии;
- Система Tren Urbano (Сан-Хуанский метрополитен, Пуэрто-Рико) оборудована комплексом автоматизированного управления Siemens, которая обеспечивает эксплуатацию подвижного состава в полностью автоматическом режиме;
- Система SkyTrain в г. Ванкувере;
- Система Skyline Аэропорта Франкфурта-на-Майне;
- Копенгагенский метрополитен;
- В Миланском метрополитене на красной линии M1 реализовано автоведение;
- В Системе скоростного транспорта Сингапура на всех действующих линиях с 1987 функционируют средства автоведения.

На метрополитенах и системах транспортировки людей реализован принцип разграничения: Автоматизированные поезда отделены от всего прочего движения, они передвигаются в тоннелях, открытые участки пути

огорожены, на платформах пассажиры отделены от поездов автоматическими дверями. Это значительно упростило условия эксплуатации.

Автоматизированная система управления и обеспечения безопасности движения поезда (АСУБДП) используется для предотвращения столкновений и сходов с рельсов. Ее использование также позволяет эксплуатировать поезд с ручным управлением на той же сети.

Нормальным требованием безопасности для АСУБДП является соответствие четвертому уровню полноты безопасности (УПБ 4). При этом предусматривается наличие резервных ручных режимов управления. На борту присутствуют проводники для оказания помощи пассажирам, особенно в случае эвакуации.

Для метрополитенов и систем транспортировки людей UITP [24] установил 5 уровней автоматизации. Это означает, что между ручным и автоматизированным вождением существует еще ряд вариантов. Автоматизация представляет собой поэтапный процесс. UITP [24] установлено пять следующих уровней:

- УА 0: управление поездом по условиям видимости подобно тому, как трамвай передвигается по улице (Полное отсутствие автоматизации);

- УА 1: ручное ведение поезда, при котором машинист управляет началом и прекращением движения, дверьми, а также отвечает за реагирование на чрезвычайные происшествия и иные непредвиденные обстоятельства;

- УА 2: полуавтоматическое ведение поезда (ПАВП), при котором начало и прекращение движения автоматизированы, а машинист управляет дверьми, по необходимости осуществляет ведение поезда и отвечает за реагирование на чрезвычайные происшествия. Многие системы автоведения соответствуют уровню УА 2;

- УА 3: безэкипажное ведение поезда (БЭВП), при котором начало и прекращение движения автоматизированы, при этом проводник управляет дверьми и в крайних случаях осуществляет ведение поезда;

- УА 4: безлюдное ведение поезда (БЛВП), при котором управление началом и прекращением движения, дверьми, а также реагирование на чрезвычайные происшествия полностью автоматизированы при полном отсутствии поезда бригады.

Дополнительно отметим, что автоматические поезда метро и системы транспортировки людей UITP могут рассматриваться в качестве полностью сложившихся транспортных средств. При этом нельзя упускать из виду, что они эксплуатируются в простых и контролируемых условиях.

2.2. Автомобили

Необходимо различать две ситуации:

- а) движение по дороге и
- б) движение по частной территории.

Не останавливаясь на вопросе подробно, отметим лишь необходимость понимать, что при движении по дороге согласно требованиям Конвенции водитель обязан постоянно находиться в автомобиле, что отражено в национальных законодательствах почти всех стран

мира. Правила дорожного движения не распространяются на частные территории. Автомобиль считается самодвижущейся машиной. Тем не менее, в такой эксплуатационной среде также необходимо придерживаться определенных правил безопасности. Упомянутый тип транспортных средств называется автоматически управляемыми транспортными средствами (АУТС).

Общее представление о том, как работает автономное вождение, в значительной мере было определено автомобилями Google [14] и Tesla [9], а также другими системами, появившимися в тот же период. К более простым системам относятся средства автоматизированной парковки, которая осуществляется водителем, находящимся вне автомобиля, при помощи мобильного телефона. Исследования автономного вождения проводились в присутствии водителя в автомобиле в целях испытания или демонстрации. В закрытых зонах или в составе промышленных транспортных систем также применяются автоматически управляемые транспортные средства. Последние в строгом смысле этого слова – не автомобили, а самодвижущиеся машины.

В качестве примера можно рассмотреть автомобиль Google [14]. Он представляет собой двухместное транспортное средство наподобие Smart, по виду которого можно легко судить о том, что оно управляется автономно.

К сожалению, имело место дорожно-транспортное происшествие, и Google заявил, что несет «некоторую долю ответственности» после того, как автомобиль столкнулся с рейсовым автобусом в Маунтин-Вью, шт. Калифорния [14]. Это значит, что столкновение произошло по вине автомобиля Google. В таком случае ответственность лежит на автомобиле и, соответственно, его изготовителе. Однако водителя и его ответственность также нельзя оставлять без внимания.

Еще один пример – автомобиль Tesla, врезавшийся в грузовой полуприцеп. Водитель, положившись на систему автоматизированного вождения, не среагировал на ситуацию и погиб в результате столкновения. Важно, что система вождения автомобиля Tesla оказалась неспособна обнаружить полуприцеп. Встает вопрос о том, кто несет ответственность за ДТП. Безусловно, водитель был должен постоянно наблюдать за поведением автоматической системы, и не известно, был ли он достаточно хорошо проинструктирован. Также необходимо обсудить, имел ли водитель возможность остановить автомобиль или перехватить управление. В данном контексте помимо свойств технической системы необходимо также рассматривать время реакции человека.

SAE [22] и ООН [24] выделяют следующие уровни.

- 0 – Без автоматизации;
- 1 – Помощь водителю;
- 2 – Частичная автоматизация ;
- 3 – Условная автоматизация;
- 4 – Высокая степень автоматизации;
- 5 – Полная автоматизация.

Подробные сведения по уровням приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Обзор уровней автоматизации [22]

Уровень по SAE	Наименование	Словесное определение	Рулевое управление и ускорение/торможение	Контроль органов управления	Резервирование функций вождения	Возможность системы (режимы вождения)
Живой водитель наблюдает дорожную обстановку						
0	Без автоматизации	Непрерывное выполнение живым водителем всех составляющих динамического процесса вождения даже при наличии систем оповещения и вмешательства	Живой водитель	Живой водитель	Живой водитель	нет сведений
1	Помощь водителю	Выполнение системой содействия водителю управления направлением движения или ускорением/торможением в зависимости от текущего режима вождения на основе информации о дорожной обстановке. Предполагается, что живой водитель выполняет все остальные составляющие динамического процесса вождения	Живой водитель и система	Живой водитель	Живой водитель	Некоторые режимы вождения
2	Частичная автоматизация	Выполнение одной или несколькими системами содействия водителю и управления направлением движения и ускорением/торможением в зависимости от текущего режима вождения на основе информации о дорожной обстановке. Предполагается, что живой водитель выполняет все остальные составляющие динамического процесса вождения	Система	Живой водитель	Живой водитель	Некоторые режимы вождения
Автоматизированная система вождения («система») контролирует органы управления автомобиля						
3	Условная автоматизация	Выполнение автоматизированной системой вождения управления всеми составляющими динамического процесса вождения. Предполагается, что живой водитель должным образом отреагирует на требование вмешаться	Система	Система	Живой водитель	Некоторые режимы вождения
4	Высокая степень автоматизации	Выполнение автоматизированной системой вождения управления всеми составляющими динамического процесса вождения, даже если живой водитель должным образом не реагирует на требование вмешаться	Система	Система	Система	Некоторые режимы вождения
5	Полная автоматизация	Непрерывное выполнение автоматизированной системой вождения всех составляющих динамического процесса вождения при любой дорожной обстановке, с которой может справиться живой водитель	Система	Система	Система	Все режимы вождения

Существующие в настоящее время системы преимущественно предназначены для помощи водителю. Система содействия помогает в простых ситуациях, однако ответственность всегда лежит на водителе. Приведем несколько примеров:

- Помощь в соблюдении дистанции;
- Формирование автоколонн;
- Помощь в движении по полосе;
- Шоссе́йный автопилот для грузовиков.

Беглого взгляда достаточно для того, чтобы заметить различия в процедурах допуска:

- Автоматизированные поезда метро оцениваются согласно положениям стандартов EN 50126 [6], EN 50128 [7], EN 50129 [8], а допуск получают согласно местным законодательным актам о метрополитенах, которые в каждой стране свои;

- В странах Европейского Союза автомобили получают Европейское разрешение на эксплуатацию согласно правилам ЕСЕ. В Германии эти задачи возложены на Федеральное управление по вопросам транспортных средств (КВА), в Нидерландах – на Государственную службу дорожного движения (RDW);

- АУТС – не автомобили и не поезда. Они считаются автоматизированными машинами и сертифицируются согласно Директиве 2006/42/ЕС о безопасности машин и оборудования [19] и стандарту МЭК 61508 [16].

Новое законодательство в области омологации автомобилей в Германии разрешает автоматизированное вождение в ряде случаев (отметим, что речь не идет о системах помощи водителю), но предусматривает приоритет водителя над системой.

Это соответствует Конвенции о дорожном движении [3], согласно которой:

- статья 8, 1: «Каждое транспортное средство или состав транспортных средств, которые находятся в движении, обязаны иметь водителя».

- статья 8, 3: «Водитель обязан обладать необходимыми физическими и психическими качествами, и его физическое и умственное состояние должно позволять ему управлять транспортным средством».

- статья 8, 5: «Водитель (погонщик) должен быть всегда в состоянии управлять своим транспортным средством или направлять своих животных».

В настоящее время эти принципы реализованы в рамках соответствующих национальных законодательств.

Исходя из изложенного, мы можем заключить, что опыт эксплуатации и принципы безопасности автоматических метрополитенов неприменимы напрямую к автомобильному транспорту. Это связано с различиями, во-первых, в нормативном регулировании, во-вторых, в вопросах стандартизации, и в-третьих, в эксплуатационной среде. Автоматические метрополитены характерны наличием подконтрольной и четко заданной эксплуатационной среды, которая делает возможным автоматическое управление подвижным составом. Пассажиры отделены от движущихся систем, в частности, при помощи защитных дверей на платформах, которые

ведут непосредственно внутрь состава. В большинстве случаев с автомобилями ситуация иная.

3. Общие принципы безопасности и уровни полноты безопасности

В данном разделе мы приводим краткий обзор основных принципов безопасности (см. Гюлькер и Шебе [15], Гайен и Шебе [11, 12], Грефлинг и Шебе [13]) и уровней полноты обеспечения безопасности.

Отказоустойчивость: Если система имеет состояние защитной остановки, т.е. защитное состояние, в котором автомобиль не работает, а такое состояние устойчиво и достигается достаточно быстро, может быть реализован принцип отказоустойчивости. Это означает, что система приходит в такое состояние в случае неприемлемого отказа. Этот принцип может быть реализован как внутренняя отказоустойчивость, реактивная отказоустойчивость или составная отказоустойчивость.

Безопасный ресурс (многоотказность): Если система не имеет состояния защитной остановки, которое достигается достаточно быстро, необходимо реализовать функцию безопасности. Этого, главным образом, добиваются при помощи резервирования.

Отказ без последствий: Принцип отказа без последствий применяется к функциям, потеря которых приемлема ввиду того, что речь идет либо о вспомогательной, либо резервированной функции. В таком случае отказ функции не должен иметь значимых последствий для безопасного функционирования системы. Это значит, что система с отказом без последствий должна обнаруживать свои отказы и возможные опасные состояния и отключаться, не оказывая небезопасного влияния на другие системы.

Во всех случаях, когда функция может причинить вред, т.е. несет угрозу здоровью и жизни людей, имуществу, окружающей среде, необходимо применение мер функциональной безопасности. Иными словами, риск, обусловленный возможным функциональным отказом, должен быть снижен до приемлемого уровня.

Для этого задаются уровни полноты безопасности. Согласно ИСО 26262 [17] они могут быть УК (QM), от УПБА А до УПБА D, причем УПБА D – самый строгий. Такая система обязательна к применению в отношении автомобилей. Стандарт МЭК 61508 [16], предусматривает уровни полноты безопасности с 1 по 4 и распространяется на самодвижущиеся машины.

На практике это означает, что для всех функций вождения и всех подсистем вождения необходимый уровень безопасности (УПБА или УПБ) определяется при помощи анализа риска.

Уровни полноты обеспечения безопасности (УПБ/УПБА) определены в стандартах функциональной безопасности. МЭК 61508 и EN 50129 определяют уровни от УПБ 1 до УПБ 4. Для автомобильного транспорта стандартом ИСО 26262 [17] установлены уровни УПБ (УПБА) от А до D.

УПБ/УПБА включает в себя два основополагающих требования:

- Максимальная допустимая интенсивность опасных отказов, которую превышать нельзя;
- Меры противодействия систематическим отказам (верификация, отслеживаемость требований, конкретные технические решения).

4. Абстрактная модель системы

В [18] Лотц предложил архитектуру, состоящую из трех уровней: навигационного, маневрового и управляющего. Мы постараемся рассмотреть как можно более простую модель реализации такой архитектуры.

Для систем с автоматическим, частично автоматическим или автономным вождением мы определим следующую очень простую структуру. Система должна иметь не только живого водителя, но и техническую систему вождения, которая выполняет соответствующую функцию.

Очень абстрактно автомобиль имеет в своем составе такие подсистемы вождения, как система рулевого управления, торможения, ускорения и т.д. Они могут представлять собой очень простые техническим средства, например, механическую систему рулевого управления, пневматическую систему торможения и т.д. Вождение осуществляется живым водителем с непосредственным использованием таких подсистем вождения.

Маневровый и навигационный уровни согласно Лотцу [18] в данном случае объединены в одну систему (живой водитель/техническая система вождения).

Если автомобиль управляется технической системой вождения, которая осуществляет соответствующие функции вместо живого водителя, либо содействует ему, то система должна иметь доступ к подсистеме вождения. Это возможно только при использовании контроллера и привода. Это означает, что системы подобного типа должны присутствовать в составе конструкции автомобиля, чтобы обеспечить возможность вождения под управлением технической системы.

В таком случае живой водитель также имеет доступ к подсистеме вождения за счет наличия контроллеров вождения.

Таким образом, существует несколько вариантов управления указанными подсистемами:

а) Водитель имеет прямой доступ к подсистеме вождения, т.е. рулевое колесо механически соединено с осью управления;

б) Водитель взаимодействует с подсистемой вождения при помощи контроллера и привода, который управляет подсистемой электронными средствами. Типичным примером такой системы является электрический стояночный тормоз;

в) Техническая система вождения взаимодействует с подсистемой вождения при помощи контроллера и привода.

Из Рисунка 1 очевидна необходимость наличия средств разрешения конфликтов между командами, поступающими от живого водителя и технической системы вождения.

Разрешение конфликтов может осуществляться на различных уровнях:

а) подсистемы вождения.

В данном случае силы, прикладываемые контроллером и приводом должны быть настолько малы, чтобы водитель мог в любой момент перехватить управление. Однако, водитель будет должен либо отключить контроллер и привод вручную, либо эти системы должны иметь встроенную функцию обнаружения вмешательства водителя и отключаться сами;

б) контроллер и привод вождения.

В данном случае контроллер имеет два ввода с различным приоритетом. Ввод высокого приоритета используется водителем, ввод низкого приоритета используется технической системой вождения. Разрешение конфликтов осуществляется контроллером, который обнаруживает перехват управления живым водителем и отключает входной сигнал от технической системы вождения. Многие контроллеры в современных автомобилях (контроллер тормозной системы, рулевого управления и т.д.) имеет дополнительный ввод для систем содействия водителю, выполняя, таким образом, указанное требование. При таком подходе предполагается, что живой водитель управляет автомобилем электромеханическим способом за счет соответствующих контроллеров;

в) техническая система вождения.

Разрешение конфликтов происходит на уровне живого водителя и технической системы вождения. Если живой водитель перехватывает управление у техниче-

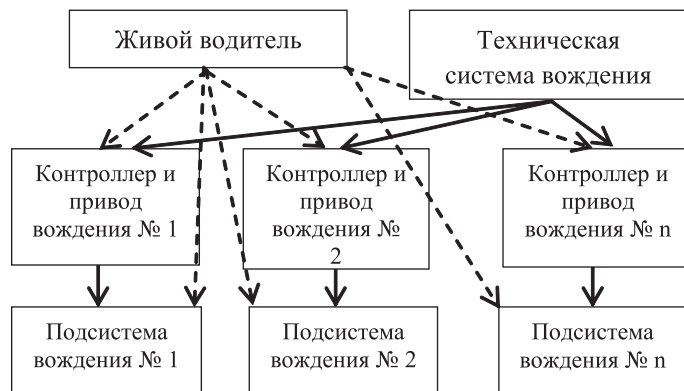


Рисунок 1 – Схема автомобиля с функциями автоматического вождения

ской системы вождения, последняя не вырабатывает собственных сигналов, а лишь передает сигналы живого водителя на контроллер вождения.

Выбор в пользу того или иного подхода зависит от производителя автомобиля. Однако, этот выбор имеет прямое отношение к поставщикам контроллеров и приводов вождения. В своих контроллерах им необходимо реализовывать различные системные архитектуры.

В случае а) они должны обеспечивать обнаружение вмешательства водителя и отключать привод.

В случае б) они должны иметь два входа с различным приоритетом и обеспечивать разрешение конфликтов.

В случае в) необходим лишь один вход и в разрешении конфликтов необходимости нет.

Как видим для реализации решений б) и в) необходимо наличие средств электромеханического управления.

Дальнейшее рассмотрение будет проводиться исходя из требования полностью автономного вождения, при котором живой водитель может в любое время перехватить управление.

5. Анализ уровней

5.1. Уровни 0 и 1

В данном разделе мы проведем анализ уровней (SAE [22]) автоматизации и сделаем выводы относительно вопроса архитектуры безопасности автомобиля.

На уровнях 0-1 за управление движением, ускорение и замедление отвечает живой водитель, он же отслеживает окружающую обстановку, а техническая система оказывает поддержку в некоторых режимах вождения (уровень 1).

Это значит, что водитель осуществляет управление, а техническая система обеспечивает лишь некоторые функции поддержки, например, выдачу предупреждения или реагирование на некоторую ситуацию, если водитель не способен этого сделать (содействие при экстренном торможении). При этом техническая система должна реализовывать принцип отказа без последствий, т.е. при ее отказе поведение автомобиля не должно измениться, либо может измениться таким образом, который не влияет на безопасность движения. Водитель при этом должен быть уведомлен об отказе системы содействия.

5.2. Уровень 2

На уровне автоматизации 2 система берет на себя ответственность в некоторых режимах вождения. Водитель отслеживает работу технической системы и боится ее. То есть все технические системы лишь оказывают поддержку, и

T1) Технически водитель должен иметь возможность вмешаться в процесс вождения, т.е. перехватить управление у технической системы. Иными словами каждый контроллер, отвечающий за ускорение, торможение и управление направлением движения, получающий сигнал от водителя и технической системы вождения, должен иметь в своем составе схему голосования, которая во всех случаях отдает приоритет водителю. Это означает, что для реализации этих функций необходимо

наличие электронной системы управления с УПБА, соответствующим функциям. В большинстве случаев речь идет об УПБА D. Такая система управления должна иметь приоритетный ввод для водителя и еще один неприоритетный ввод для технической системой вождения. Соответствующий контроллер вождения должен обеспечивать обнаружение попытки водителя перехватить управление у технической системы вождения и выполнение соответствующих действий;

T2) Водитель должен иметь в своем распоряжении достаточно времени для обнаружения неправильного поведения технической системы вождения, реагирования и возвращения автомобиля в безопасный режим вождения. Иными словами контроллеры должны ограничивать влияние технической системы вождения, т.е. ограничивать ускорение, торможение и углы поворота или угловую скорость и угловое ускорение и резкие движения таким образом, чтобы у водителя всегда было время отреагировать. Кроме того, водитель должен быть обучен пользованию этой функцией, либо контроллеры должны быть устроены таким образом, чтобы дать любому водителю достаточно времени на реагирование.

Требование T2 влечет за собой требования к системе автономного вождения:

- Торможение: автоматическая система должна осуществлять торможение медленнее, чем человек-водитель, а разница (между скоростями торможения, обеспечиваемыми системой и человеком) также должна обеспечивать возможность реагирования водителем (кривые торможения);

- Рулевое управление: расстояние до опасных объектов (другие автомобили, разделительные линии и т.д.) должна быть достаточно большой для обеспечения возможности реагирования водителя, а угол поворота должен быть ограничен. Вышеупомянутое может быть сопряжено с ограничениями скорости движения;

- Возможно, водителю понадобится особая подготовка.

На рисунке 2 показан пример кривой торможения. Видна зависимость скорости (м/с) от расстояния. Указано две кривых: одна для автоматического торможения (замедление 3 м/с^2), вторая – для торможения водителем (5 м/с^2). При этом время реакции водителя принято как 1,3 с. Начальная скорость составляет 20 м/с.

В приведенном примере водитель способен полностью остановить автомобиль вовремя, если обнаружит, что автоматическая система не в состоянии осуществить торможение. Разумеется, водитель должен реагировать и должен быть способен отреагировать за отведенные 1,3 с.

Для рулевого управления необходимо принять аналогичные требования: У водителя должно быть необходимое время на реагирование. Данное время реагирования зависит от расстояния до обочины или соседней полосы, скорости и реакции системы. Последнее включает в себя максимальные угловые скорости и ускорения, при которых система может оказаться неспособна реагировать на ситуацию соответствующим образом.

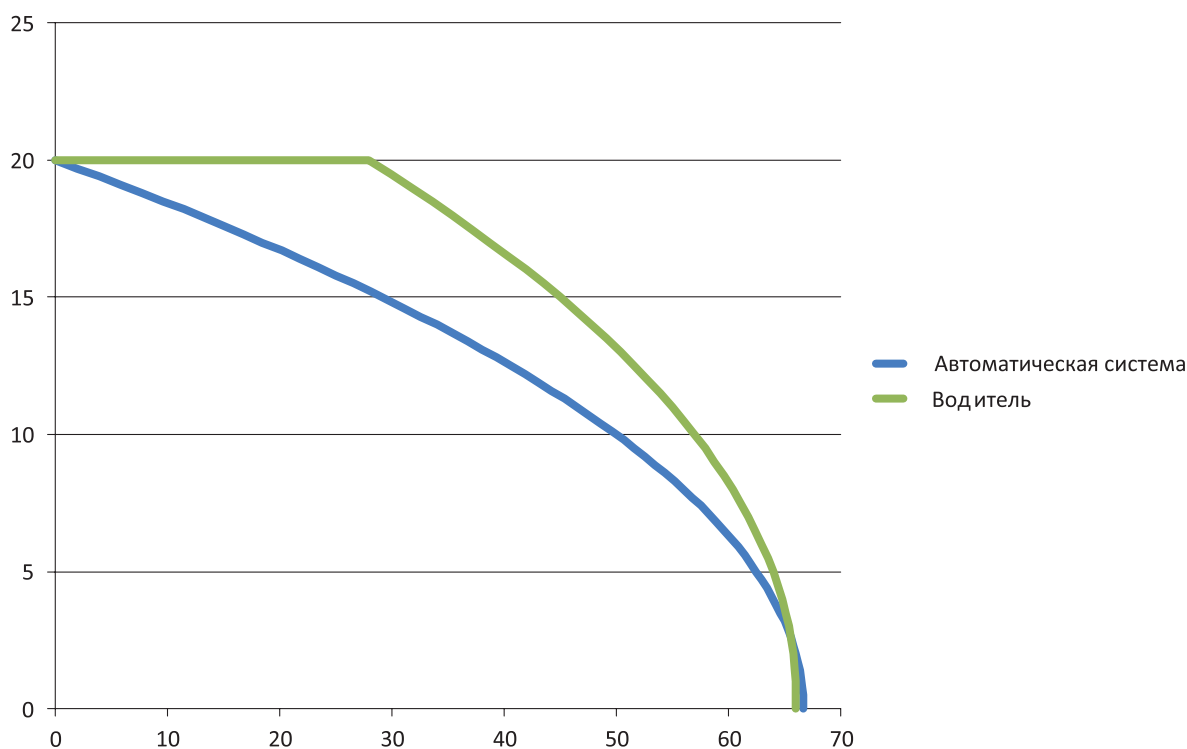


Рисунок 2 – Пример кривой торможения

Существующие технические решения реализованы на основе следующих разработанных технических средств:

- Разнообразные контроллеры или ответственные вычислительные комплексы, сертифицированные по требованиям УПБА D/УПБ 4;
- Существуют также сертифицированные на УПБ «умные датчики»;
- Разнообразные датчики (без УПБ) с перекрестной проверкой ответственным вычислительным комплексом. В качестве примеров таких датчиков можно привести камеры, лазеры, радары, инфракрасные и ультразвуковые сенсоры и т.д.;
- Разнообразие на уровне узлов и агрегатов. Использование предохранительных реле в качестве электрических компонентов, использование проверенных механических систем.

5.3. Уровень 3

Уровень 3 отличается от уровня 2 лишь в одном. Техническая система вождения отвечает за контроль соответствующего оборудования. Это означает, что система должна проводить самодиагностику и контролировать окружающую обстановку для определения того, может ли она продолжать управления, либо передать эту функцию человеку. Важно отметить следующие требования:

T3) Необходимо четко определить процедуру передачи полномочий между человеком и технической системой вождения. Либо техническая система вождения должна продолжать функционирование до принятия человеком управления, либо

T4) Предусмотрен определенный промежуток времени (например, одна секунда), в течение которого чело-

век должен перехватить управление, если техническая система вождения того потребует.

В первом случае (T3) техническая система вождения должна быть с безопасным ресурсом, во втором случае (T4) время задержки при перехвате управления человеком должно быть обеспечено техническими системами: либо свойством безопасного ресурса, либо исходя из дорожной обстановки и скорости движения. Соображения относительно временных показателей изложены в [25] (Фогельполь и др.).

5.4. Уровни 4 и 5

Уровни 4 и 5 еще сложнее. Различия между уровнями 4 и 5 относительно невелики, поскольку распределение обязанностей идентично за тем исключением, что на уровне 4 некоторые режимы вождения исключены, за счет чего возможности технической системы вождения ограничены. При этом, если система активна, она должна быть способна взять на себя полную меру ответственности.

По этой причине техническая система должна непрерывно обеспечивать безопасное вождение, реализуя принцип безопасного ресурса.

Соответствующие требования основаны на так называемом принципе GAMÉ, который изложен, в частности, в EN 50126 [6]: “Все новые рельсовые транспортные системы должны обеспечивать общий уровень риска не хуже аналогичных существующих систем“. В данном случае под рельсовыми транспортными системами мы понимаем только транспортные средства с автономным вождением. Мы проводим сравнение классического и самоуправляемого транспортных средств. Необходимо рассматривать два аспекта:

- а) Технические показатели и
- б) Достаточная защита технической системы (транспортное средство и техническая система вождения) от опасных отказов.

Эти два аспекта рассматриваются по отдельности. С точки зрения технических показателей система вождения должна быть не хуже человека-водителя в соответствующих дорожных ситуациях (см. Маццега и др. [20]). Если это условие нельзя соблюсти для всех дорожных ситуаций, перечень последних должен быть ограничен, и на человека-водителя должна быть возложена ответственность за наиболее сложные из них.

Вопрос безопасности можно решить, как и в любой другой технической системе, путем задания соответствующего уровня безопасности (УПБА или УПБ). Из чего следует, что

T5) Технические показатели системы вождения включают в себя время реагирования, обнаружение и отработку различных ситуаций дорожного движения и пр. При этом штатно функционирующая система должна быть не хуже человека-водителя.

T6) Техническая система вождения должна быть разработана в соответствии с разумно достаточным УПБ/УПБА.

Для уровня 4 необходимо четко определить процедуру передачи полномочий между технической системой вождения и человеком-водителем. Прежде всего, необходимо определить режимы вождения, в которых техническую систему вождения использовать нельзя по причине, например, несоответствия ее показателей поставленной задаче. Передача управления должна осуществляться во время остановки, либо техническая система вождения должна заблаговременно информировать водителя о том, что она намерена передать ему управление и он должен его принять. Если водитель не принимает управление, техническая система вождения все равно должна иметь возможность остановить транспортное средство, если она находится в режиме вождения, при котором автоматическое вождение допустимо и возможно.

В случае передачи водителем управления технической системе вождения ответственность остается на нем до тех пор, пока техническая система вождения не сообщит ему, что она приняла ответственность.

При движении по дороге, открытой для проезда, водитель несет полную ответственность за поведение транспортного средства (см. Конвенцию [3]). В этом случае, даже если техническая система вождения соответствует уровню SAE 5 с необходимым уровнем полноты безопасности, водитель должен иметь возможность вмешаться в процесс вождения. Таким образом, требования а) и б) для уровня SAE 2 должны выполняться при движении по дороге, открытой для проезда.

Действительно автономное вождение, т.е. вождение без вмешательства человека-водителя в действительности реализовано только на уровне SAE 4 (частично) или 5 (полностью). Это так, даже если законодательство требует наличия водителя в транспортном средстве.

6. Реализация принципов безопасности

6.1. Системы содействия

Ясно, что технические системы вождения уровней до 2 должны и могут быть построены по принципу отказа без последствий; и T1, и T2 обязаны выполняться для обеспечения возможности водителя принять управление на себя.

6.2. Применение принципа отказоустойчивости

Прежде всего, необходимо определить, существует ли состояние безопасной остановки, которого можно достичь достаточно быстро. Предположим, что скорость движения транспортного средства ограничена значением v , тормозное замедление составляет a , а время реакции – t , тогда транспортное средство остановится в пределах дистанции

$$s = v \cdot t + v^2 / (2a).$$

Предполагая, что рулевое управление ничем не ограничено, остановка транспортного средства будет безопасным действием в случае отсутствия препятствий в пределах дистанции s . Это пространство можно сделать еще меньше, если принимать во внимание:

- направление поворота рулевого колеса и (физические) ограничения изменения угла его поворота, а также
- физические ограничения изменения направления движения.

В таком случае техническая система вождения и контроллеры могут представлять собой полностью безаварийную систему и останавливать транспортное средство в случае обнаружения отказа.

В зависимости от наличия свободного пространства вокруг определяется скорость движения транспортного средства. Очевидно, что, чем меньше доступно свободного пространства, тем медленнее должно двигаться транспортное средство. Контроллеры вождения необходимо разработать с учетом требований соответствующих УПБ/УПБА, которые зависят от скорости движения.

6.2. Применение принципа безопасного ресурса

В таком случае, если необходимо обеспечить более высокую скорость движения транспортного средства, техническая система вождения и контроллеры должны реализовывать принцип безопасного ресурса по крайней мере во время движения.

Контроллеры вождения необходимо разработать с учетом требований соответствующего УПБ. Для тормозной системы (АБС/ЭСКУ) – это, в основном, УПБА D, для системы рулевого управления – УПБА В – УПБА D в зависимости от функции контроллера. При таких условиях большинство транспортных средств могут эксплуатироваться на скоростях до 250 км/ч.

Реализация принципов безопасности различается применительно к дорожным транспортным средствам и самодвижущимся машинам. В первом случае мы не можем предположить, что окружающая обстановка находится под контролем. Во втором случае этого добиться можно, поскольку техническая система вождения эксплуатируется на частной территории. В последнем

случае гораздо проще обеспечить наличие достаточного свободного пространства.

Ввиду этого обстоятельства ясно, что не все функции и не всегда обязаны быть реализованы с учетом максимально высокого УПБ/УПБА. Это во многом зависит от скорости движения и свойств среды. Если скорость ограничена физически или иным образом, допустимо применение более низкого УПБ или УПБА. В любом случае исходить нужно из анализа рисков, проводимого согласно требованиям ИСО 26262 [17] или МЭК 61508 [16].

Ниже указаны функции, которые необходимо учитывать в первую очередь:

- Управление.

Порядок реализации данной функции, включая аспект рулевого управления, описан в работе [1] (Бауман, Шебе и Вис). Принцип безопасного ресурса необходимо реализовать прежде всего применительно к управлению ведущим мостом, а в составе технической системы вождения необходимо использовать безопасный вычислительный комплекс, который будет отвечать за контроль угла поворота управляемых колес. Еще одна важная функция – определение местоположения, которое можно осуществить при помощи дифференциальной GPS, картографических материалов, а также ультразвуковых датчиков, радаров, лазеров или камер, либо физических меток вдоль полосы движения. Безопасный вычислительный комплекс определит действительное местоположение и сравнит его с предполагаемым исходя из предпринятых действий по управлению, а затем скорректирует поведение или остановит транспортное средство;

- Торможение и ускорение.

Предполагая, что транспортное средство движется по желаемой траектории, оно должно начать, продолжить и завершить движение. Следовательно, транспортное средство должно реагировать на соответствующие команды. Важно ограничить скорость движения, например, в кривых или на узких участках дороги и обеспечить возможность экстренной остановки в случае отказа составных частей системы. Для выполнения данной функции системе необходимо иметь информацию о текущем местоположении.

За счет двух указанных функций транспортное средство сможет лишь двигаться без учета окружающей обстановки. Любые изменения в окружающей среде могут привести к столкновениям с участием автомобиля, покидающего свою полосу;

- Реагирование на непредусмотренные события (препятствия).

Транспортное средство должно обладать способностью обнаруживать препятствия. Препятствием мы называем объект, находящийся в пределах (запланированной) или рядом с (запланированной) траекторией движения транспортного средства. Необходимо различать неподвижные и движущиеся препятствия. Изначально в качестве единственной стратегии рассматривается остановка транспортного средства перед препятствием. Вариант объезда препятствия будет рассмотрен далее применительно к случаям движущихся препятствий.

а) Неподвижное препятствие: для обнаружения препятствий техническая система вождения должна иметь в своем составе образ окружающей среды, с которым она сравнивает окружающую обстановку для выявления расхождений. Это требует наличия ряда алгоритмов обнаружения и классификации объектов. Отметим, что термины «обнаружение» и «образ» не означают, что техническая система вождения использует какие бы то ни было оптические средства. Могут использоваться как оптические средства, так и иные системы или их сочетания.

На первом этапе происходит как таковое обнаружение препятствий. Это возможно только на определенном расстоянии и занимает некоторое время. В зависимости от производительности системы скорость движения транспортного средства может быть ограничена ввиду необходимости обеспечения остановки перед препятствием.

На втором этапе техническая система вождения осуществляет классификацию препятствий как небольших. Отметим, что такая классификация может осуществляться неявно, если техническая система вождения не обнаруживает небольшие препятствия. Такая классификация присутствует всегда ввиду ограниченности возможностей системы.

Если препятствие достаточно невелико и невысоко, транспортное средство может принять решение продолжать движение.

б) Движущиеся препятствия: Движущиеся препятствия необходимо отслеживать, а их перемещение – прогнозировать на основе текущего положения и скорости. Нужно также принимать во внимание, способен ли объект ускориться и менять направление движения. Последние факторы в значительной мере зависят от природы объекта. К примеру, характеристики ускорения мотоцикла и пешехода различаются. Точное прогнозирование требует от технической системы вождения классификации движущихся объектов по подвижности. Соответственно, для каждого объекта различных групп необходимо прогнозировать будущее местоположение, и техническая система вождения должна задавать движение транспортного средства таким образом, чтобы избежать столкновения. Результатом может быть решение об остановке или дальнейшем пребывании в неподвижном положении.

В зависимости от качества работы алгоритмов группирования и прогнозирования техническая система вождения будет вести себя более или менее сдержанно. При использовании более качественных алгоритмов техническая система вождения будет останавливать транспортное средство реже. Напомним, что указанные алгоритмы и процесс торможения в ситуациях малопродвинутой траектории движения препятствия должны обеспечивать результаты не хуже, чем человек-водитель. Это включает стратегии объезда препятствий.

в) Неподвижные препятствия, которые могут прийти в движение представляют собой сочетание указанных выше случаев а) и б). Это значит, что техническая система вождения обязана не только отслеживать движущиеся препятствия, но также быть способна классифицировать неподвижные препятствия и выносить суждение относи-

тельно того, могут ли они двигаться и с какой скоростью и в каком направлении. Наиболее безопасной стратегией, безусловно, было бы остановиться на безопасном расстоянии от любого неизвестного объекта.

Если должного реагирования со стороны транспортного средства во всех дорожных ситуациях обеспечить невозможно, перечень последних должен быть ограничен, и на человека-водителя должна быть возложена ответственность за наиболее сложные из них. Таким образом, складывается ситуация уровня SAE 4. В качестве примера можно привести стратегию, при которой техническая система вождения берет на себя управление при движении по шоссе, а человек-водитель – при движении в городе.

7. Проблемы

Вопрос автономного вождения сопряжен с рядом проблем. Мы рассмотрим лишь часть из них и постараемся описать возможные технические решения.

а) Предположим, что автономное транспортное средство не в состоянии предотвратить происшествие и должно сделать выбор, например, между материальным ущербом, экологическим ущербом и причинением вреда здоровью, либо, что еще хуже, причинением травмы или гибели пожилому человеку или ребенку, другому водителю, собственным пассажирам и др. [5].

Этот вопрос неизбежно возникает при обсуждении передачи управления от человека-водителя технической системе вождения. Соответствующая этическая проблема в рамках данного раздела решена быть не может. Очевидно, что техническое решение данной проблемы потребует механизмов распознавания людей, предметов и животных, а также различных категорий людей. Это (если это вообще возможно) потребует применения достаточно сложных алгоритмов.

Наиболее простым решением была бы реализация принципа вождения по визуальным показателям. Это означает, что автономное транспортное средство будет двигаться только с такой скоростью, при которой оно сможет остановиться перед любым препятствием, которое появляется на дороге. Соответствующие требования включают следующее:

- Обнаружение препятствий больше определенного размера,
- Прогнозирование передвижения объектов (наиболее сложная часть),
- Снижение скорости при необходимости остановки транспортного средства перед таким препятствием.

На основании подобного подхода «безопасность прежде всего» объект определенного (небольшого) размера в будущем может быть проигнорирован в целях повышения производительности и исключения остановки транспортного средства перед упавшим листом или пластиковым пакетом;

б) Дополнительные сведения.

Транспортное средство может также использовать дополнительную информацию, получаемую от ин-

фраструктуры, что может способствовать повышению безопасности.

Рассмотрим следующий пример. Транспортное средство использует информацию, полученную с уличных камер, и способно «заглянуть за угол». Таким образом оно может, например, обнаружить ребенка, внезапно выбежавшего из дома, на что человек-водитель не способен;

в) Целевые показатели безопасности.

Поскольку целевым показателем безопасности системы автономного вождения всегда является поведение человека-водителя, техническая система вождения должна удовлетворять данному важному требованию. Однако, если предположить, что в будущем автономными системами будет установлен новый целевой показатель безопасности, то возникает вопрос: Имеет ли водитель право отключить автоматическую систему и понизить уровень безопасности? Это будет в некоторой мере равносильно отключению системы интервального регулирования машинистом поезда. Этот простой пример показывает, что переход к автономному вождению будет бесповоротным, и возврата к ручному управлению не будет.

8. Возможные дальнейшие шаги

Исходя из текущей ситуации можно предположить, в каком направлении пойдет развитие автотранспорта:

- Может быть реализована функция удержания на полосе движения, например, с использованием дифференциальной GPS в сочетании с регулярно обновляемыми качественными картографическими материалами. Все места проведения дорожных работ и временно закрытые участки должны быть отмечены на карте.
- Принудительная остановка перед запрещающим сигналом светофора посредством беспроводной передачи информации на транспортные средства. При этом водитель по-прежнему обязан отслеживать действия потенциальных нарушителей, например, велосипедистов, даже, если горит зеленый сигнал.
- Обеспечение соблюдения ограничений скорости, при котором максимально допустимое значение скорости движения передается по беспроводной связи от вещающего знака, либо знак считывается камерой, также для этих целей могут применяться картографические материалы.
- Обработка простых дорожных ситуаций, например, следование полосе движения на автотрассе без осуществления обгонов.
- Автономные транспортные средства на отдельных территориях и участках сети.

Дальнейшее развитие может предполагать следующее:

• Дорога или полоса могут быть отделены двойным ограждением, образуя контролируемую среду, в которой транспортное средство может перемещаться в автоматическом режиме. При этом функции рулевого управления, торможения, вождения будут реализованы в соответствии с УПБА D;

• Транспортные средства движутся на очень коротком расстоянии друг от друга, образуя автоколонны;

- В определенных местах организован въезд и выезд с автодорожной сети. В таких местах водитель будет принимать на себя управление и вести транспортное средство вручную до места назначения;

- Функции, связанные со всей необходимой информацией, включая картографические материалы, местоположение, ограничения скорости, связь с другими автоматизированными транспортными средствами, будут реализованы на основе бортовых, а не инфраструктурных средств;

- Инфраструктура будет относительно недорогой и будет состоять из дороги и ограждения. По сравнению с железнодорожным транспортом такая инфраструктура более гибкая, не требует наличия светофоров, стрелок, балласта и шпал.

Во всех указанных случаях используемые технические системы должны иметь безопасный ресурс с уровнем безопасности до УПБА D/УПБ 4.

Система с безопасным ресурсом — это система, которая в отличие от безаварийной системы не выключается в случае отказа, и в которой функция обеспечения безопасности выполняется даже в случае одного, а иногда нескольких отказов.

В контексте путей дальнейшего развития также необходимо рассматривать возможные проблемы, которые необходимо решить для того, чтобы автоматическое или автономное автодорожное транспортное средство могло сравниться с автомобилем под управлением человека. Прежде всего такая система обязана отличать людей и животных от неподвижных объектов. Она также не должна путать высокие транспортные средства и мосты. Проблему также представляет то, что в некоторых случаях намерения человека или животного неизвестны: будет ли человек или животное переходить дорогу? Характерным примером может служить ребенок с мячом на тротуаре, роняющий мяч, который катится на проезжую часть. Таких случаев много, и они требуют интеллектуальных решений, которые скорее всего будут реализованы с применением искусственного интеллекта.

Исходя из этого, предполагаем, что автономное вождение будет реализовано на основе искусственного интеллекта. Требования согласно УПБ 4/УПБА D должны будут неукоснительно выполняться на уровне программного и аппаратного обеспечения. С другой стороны, алгоритмы искусственного интеллекта громоздки и сложны. При этом если, например, потребуется продемонстрировать выполнение требования «Алгоритм обязан отличать людей от прочих объектов», можно представить себе сложность выполнения такой задачи. И это лишь одно требование. Комплекс требований к программному обеспечению будет должен принимать во внимание множество дорожных ситуаций. Если алгоритм обладает свойством самообучения, необходимо обеспечить необходимый объем обучения в установленные сроки, что должно быть доказано применительно к требованиям стандартов МЭК 61508 [16] и (или) ИСО 26262 [17]. В качестве альтернативы можно прибегнуть к доказавшему свою состоятельность на практике критерию $3 \cdot 10^9$ часов реальной наработки (см. МЭК 61508 [16], Часть 7,

Приложение D). Из расчета 600 часов вождения в год это будет эквивалентно подконтрольной эксплуатации 5 млн транспортных средств в течение целого года. Такая эксплуатация предполагает наличие подготовленных водителей, способных перехватить управление, а также регистрацию всех событий. Число транспортных средств можно сократить за счет увеличения числа часов эксплуатации в год до, например, 6 тыс., для чего процесс вождения должен быть посменным. Тем не менее, все равно потребуется 500 тыс. транспортных средств. Кроме того, любое изменение в программном обеспечении требует повторного процесса согласования.

Напрашивается вывод о том, что технические решения, применяемые в ответственном программном обеспечении, должны быть относительно простыми и не должны предполагать прогнозирования намерений. Решения на основе искусственного интеллекта найдут применение в составе систем содействия водителю.

9. Выводы

В настоящей статье мы рассмотрели некоторые вопросы, связанные с автоматическим (или автономным) управлением железнодорожным подвижным составом и автомобилями. Выяснилось, что автомобили эксплуатируются в гораздо более сложной среде, чем поезда. Поэтому опыт эксплуатации, например, автоматических поездов метро здесь напрямую неприменим.

В статье предлагается несколько идей для построения архитектуры обеспечения безопасности системы автономного вождения на основе известных принципов и общих требований обеспечения безопасности. Мы проанализировали уровни SAE и их смысл с точки зрения архитектуры безопасности.

Приведено описание возможных принципов реализации и обсуждены конкретные проблемы автономного вождения. Так, реализацию систем автономного вождения рекомендуется проводить согласно принципам проектирования, изложенным в главе 6. Важно понимать архитектуру безопасности автомобиля и решить, идет ли речь лишь о системе содействия (система с отказом без последствий), либо требуется реализация принципа отказоустойчивости или безопасного ресурса. Эти положения должны лежать в основе оценки безопасности автомобилей с автономным вождением.

Большинство существующих систем относятся либо к категории систем содействия, либо приспособлены для работы в условной дорожной обстановке.

Есть все основания ожидать, что первые безопасные решения в области автономного вождения будут предназначены для эксплуатации в упрощенных условиях, прежде всего там, где эксплуатационная среда контролируется или даже специально адаптирована к задачам автономного вождения. В качестве примера можно привести автоматически управляемые транспортные средства, которые осуществляют движение лишь в рамках полностью адаптированной среды, но не на дорогах общего пользования.

Библиографический список

1. **Bouwman, R.** Application of safety principles – for a guidance system in public transport [Text] / R. Bouwman, H. Schäbe, H. Vis // Proceedings of ESREL 2009, Reliability, Risk and Safety. – 2009. – Vol. 3. – P. 2275-2278.
2. **Breitinger, M.** Kabinett erlaubt teilautomatisiertes Fahren [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-04/autonomes-fahren-gesetztentwurf-verkehrsrecht-alexander-dobrindt> (дата обращения 19.10.2017).
3. Конвенция о дорожном движении от 08.11.1968, Европейское дополнительное соглашение от 01.05.1971 и Протокол от 01.03.1973 [Текст].
4. The Mercedes-Benz Future Bus The future of mobility [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.daimler.com/innovation/autonomous-driving/future-bus.html> (дата обращения 19.10.2017).
5. Ethik-kommission Automatisiertes und Vernetztes Fahren (нем. Комиссия по этике в области автоматизированного и дистанционного вождения), Отчет, Июнь 2017 г. [Электронный ресурс] – URL: www.bmvd.de.
6. EN 50126 Транспорт железнодорожный – спецификация и демонстрация Надежности, Доступности, Пригодности для обслуживания и Безопасности (RAMS) [Текст] – 1999.
7. EN 50129 Транспорт железнодорожный – Коммуникация, системы СЦБ и обрабатывающие системы – Программное обеспечение для железнодорожных систем управления и систем защиты [Текст] – 2011.
8. EN 50129 Железные дороги. Системы связи сигнализации и обработки данных. Электронные сигнализационные системы безопасности [Текст] – 2003.
9. Todesfall im selbstfahrenden E-Auto US-Verkehrsaufsicht prüft Teslas «Autopilot» [Электронный ресурс]. Focus. – 2016. – URL: www.focus.de/auto/elektroauto/todesfall-im-selbstfahrenden-auto-us-verkehrsaufsicht-prueft-teslas-autopilot_id_5687341.html (дата обращения 01.07.2016).
10. www.frog.nl [Электронный ресурс] (дата обращения 19.10.2017).
11. **Gayen, J.-T.** (Miss-) Konzeptionen von Sicherheitssprinzipien [Text] / J.-T. Gayen, H. Schäbe // Signal + Draht. – 2008. – Vol. 7+8. – P. 11-18.
12. **Gayen, J.-T.** (Mis-) conceptions of safety principles [Text] / J.-T. Gayen, H. Schäbe // ESREL 2008, Proceedings Safety, Reliability and Risk analysis. – 2008. – Vol. 2. – P. 1283-1291.
13. **Gräfling, S.** The agri-motive safety performance integrity level – or how do you call it? [Text] / S. Gräfling, H. Schäbe // Proceedings of ESREL 2012/PSAM 11. – 2012. – P. 10.
14. Google self-driving car hits public bus near Mountain View headquarters [Электронный ресурс]. – URL: www.mercurynews.com/2016/02/29/google-self-driving-car-hits-public-bus-near-mountain-view-headquarters (дата обращения 19.10.2017).
15. **Gülker, J.** Physical Principles of Safety, Safety and Reliability for Managing Risk [Text] / J. Gülker, H. Schäbe // Proceedings of ESREL 2006. – 2006. – P. 1045-1050.
16. **МЭК 61508.** Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Части 1 – 7 [Текст] – 2010.
17. **ИСО 26262.** Дорожные транспортные средства. Функциональная безопасность Части 1-10 [Текст] – 2014.
18. **Lotz, G.O.** Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung mit Fahrereinbindung: диссертация: 2017 [Text] / Lotz G.O.; [место защиты: Дармштадтский технический университет].
19. Директива № 2006/42/ЕС Европейского парламента и Европейского совета от 17 мая 2006 г. о технике, вносящая поправки в Директиву № 95/16/ЕС (исправленная версия) [Текст].
20. **Mazzega, J.** Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen [Text] / J. Mazzega, F. Köster, K. Lemmer, T. Form // Automobiltechnische Zeitschrift. – 2016. – Vol. 10. – P. 48-52.
21. Weltpremiere: Daimler Buses präsentiert autonom fahrenden Stadtbus [Электронный ресурс]. – URL: www.nahverkehrs-praxis.de/news/nahverkehrspraxis-top-news/article/weltpremiere-daimler-buses-praesentiert-autonom-fahrenden-stadtbus (дата обращения 19.10.2017).
22. Классификация и определение терминов в области систем автоматизации вождения автомобильных транспортных средств. SAE J3016 [Текст]. – 2016.
23. A global bid for automation: UITP Observatory of Automated Metros confirms sustained growth rates for the coming years [Электронный ресурс] (дата обращения 19.10.2017).
24. Сводная резолюция о конструкции транспортных средств (СР.3), Пересмотр 6. Организация Объединенных Наций, Экономическая комиссия для Европы, Комитет по внутреннему транспорту, Всемирный форум для согласования правил в области транспортных средств [Текст] (дата обращения 11.07.2017).
25. **Vogelpohl, T.** Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung. Forschungsbericht Nr. 39 [Text] / T. Vogelpohl, M. Vollrath, M. Kühn, T. Hummel, T. Gehlert // Германский союз страховщиков. – Август 2016. – ISBN 978-3-939163-67-1.
26. **Wachenfeld, H.K.** How Stochastic can Help to Introduce Automated Driving: диссертация: 2016 [Text] / Wachenfeld H.K.; [место защиты: Дармштадтский технический университет].

Сведения об авторе

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

Поступила 18.03.2019

Прогрессирующее повреждение структурных элементов трубопроводных систем и оценка эффективности мероприятий по их защите

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



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Целью работы является оценка влияния защиты транспортных узлов на стойкость трубопроводных систем к развитию повреждений по механизму прогрессирующей блокировки узлов, а также анализ эффективности используемых защитных мероприятий. Повреждение точечного элемента системы, связанное с одновременным переходом в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов называется блокировкой. Процесс последовательной блокировки узлов транспортной системы в случайном порядке рассматривается как прогрессирующее повреждение сетевой структуры. Развитие прогрессирующего повреждения является опасным сценарием развития аварии и сопровождается отключением от источника сначала некоторых, а затем и всех потребителей целевого продукта. Способность системы противостоять развитию прогрессирующих повреждений оценивается при помощи показателя стойкости, представляющего собой среднюю долю повреждаемых узлов, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта. **Методы исследований.** Показатель стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов устанавливался с использованием метода имитационного компьютерного моделирования. Использование показателя стойкости при сравнительном анализе свойств сетевых структур возможно только в том случае, если анализируемые системы являются сопоставимыми. Условием сопоставимости систем с защищенными точечными элементами является наличие одинакового числа отключаемых узлов-потребителей и повреждаемых узлов. Если в составе анализируемых систем присутствуют защитные периферийные кластеры, представляющие собой взаимосвязанную совокупность защищенных точечных элементов, то для сопоставимости таких систем необходимо совпадение: – количества периферийных кластеров с двумя и более узлами-потребителями, при равном числе таких узлов в составе каждой из систем; – наиболее вероятной последовательности отключения от источника, как отдельных потребителей, так и периферийных кластеров с равным количеством потребителей продукта.

Результаты. Повысить стойкость системы к развитию прогрессирующей блокировки можно с использованием организационно-технических мероприятий по защите транспортных узлов. Установлено, что наибольшая эффективность защиты отдельных точечных элементов достигается при защите узла-потребителя расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта. Показано, что синтез периферийного кластера для защиты транспортной системы следует производить путем включения в его состав потребителей, расположенных на минимальном удалении от узла-источника.

Выводы. Развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки узлов является опасным сценарием повреждения трубопроводной системы. Повысить стойкость к повреждениям сетевой структуры можно с использованием мероприятий по защите узлов транспортной системы. Наибольшая эффективность защиты отдельных точечных элементов достигается при защите узла-потребителя расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта. Синтез периферийного кластера для защиты транспортной системы от прогрессирующего повреждения следует осуществлять путем включения в его состав потребителей, расположенных на минимальном удалении от узла-источника продукта.

Ключевые слова: система, трубопровод, узел, повреждение, защита, стойкость.

Формат цитирования: Тарарычкин И.А. Прогрессирующее повреждение структурных элементов трубопроводных систем и оценка эффективности мероприятий по их защите // Надежность. 2019. №3. С. 34-39. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-34-39

Системы трубопроводного транспорта находят применение в различных сферах деятельности и отраслях промышленного производства при доставке потребителям энергоносителей, сырья, материалов, готовой продукции. В своем составе такие сложные инженерные объекты могут иметь большее число структурных элементов, взаимодействующих между собой и обеспечивающих воспроизведение функционального эффекта, в том числе и при наличии повреждающих воздействий [1-3]. Эксплуатация таких потенциально опасных технических систем связана с возможностью перехода в состояние неработоспособности отдельных структурных элементов как под воздействием внутренних процессов, так и в результате взаимодействия с внешней средой [4-7].

Из-за наличия избыточных связей в сети переход одного или нескольких структурных элементов в состояние неработоспособности обычно удается компенсировать за счет оперативного перераспределения транспортных потоков.

Если же при развитии аварийной ситуации процесс повреждения сети будет продолжен, то это приведет сначала к отключению от источника некоторых, а затем и всех потребителей целевого продукта.

В этих условиях за короткий промежуток времени в состояние неработоспособности может перейти некоторое количество линейных, и точечных элементов [8–11]. Повреждение линейного элемента (трубопровода) означает невозможность дальнейшего прохождения через него транспортных потоков. Если же происходит повреждение точечного элемента структуры, то прохождение через соответствующий узел любых транспортных потоков также будет прекращено.

Тогда блокировка отдельного узла системы может рассматриваться как результат одновременного перехода в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов.

Если повреждение сетевой структуры происходит путем последовательной блокировки отдельных узлов системы в случайном порядке, то такой сценарий развития аварийной ситуации называется прогрессирующей блокировкой.

Прогрессирующая блокировка сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей системы и может привести к отключению от источника всех потребителей целевого продукта.

Повысить способность системы противостоять развитию аварии по механизму прогрессирующей блокировки можно путем защиты отдельных точечных элементов. При этом под защитой транспортного узла понимается комплекс мероприятий, обеспечивающих невозможность перехода в состояние неработоспособности всех сходящихся в него трубопроводов.

Очевидно, что защита узлов является эффективным инструментом повышения стойкости всей системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки, однако в литературных источниках отсутствуют рекомендации по реализации защитных мероприятий и выбору оптимальных схем защиты.

Целью настоящей работы является оценка влияния защиты транспортных узлов на стойкость трубопроводных систем к развитию повреждений по механизму прогрессирующей блокировки узлов, а также анализ эффективности используемых защитных мероприятий.

Влияние защиты отдельных узлов системы на ее стойкость к развитию прогрессирующих повреждений

Рассмотрим структурную схему трубопроводной системы, показанную на рисунке 1. В ее составе имеется узел-источник А, а также потребители В, С, D, E, F.

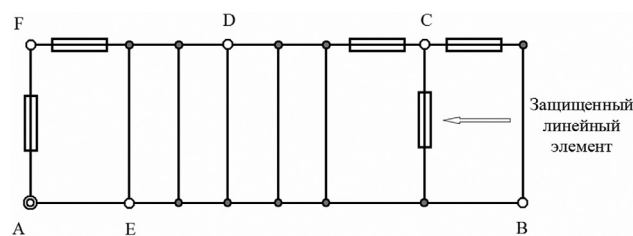


Рис. 1 – Структурная схема трубопроводной системы с защищенными транспортными узлами

Узлы-потребители С и F являются защищенными, поскольку в каждый из них сходятся только защищенные линейные элементы. Узел F соединен с источником, защищенным транспортным путем AF и по этой причине не может быть от него отключен, т.е. является неотключаемым. Защищенный узел С считается отключаемым, несмотря на наличие защиты, поскольку при развитии процесса прогрессирующей блокировки он может быть отключен от источника.

При изучении процесса прогрессирующей блокировки узлов используются следующие обозначения:

U_0 – общее количество потребителей продукта, отключение которых от источника возможно при развитии прогрессирующей блокировки;

Q_0 – доля от общего числа отключаемых потребителей, отключенных от источника продукта в данный момент системного времени;

R_y – общее количество повреждаемых, то есть не защищенных транспортных узлов, блокировка которых оказывается возможной;

r_x – текущее количество заблокированных узлов, при развитии процесса прогрессирующего повреждения;

Y – степень повреждения незащищенной части сетевой структуры, наблюдаемая в текущий момент системного времени ($Y = r_x / R_y$).

Зависимость $Q_0(Y)$ представляет собой диаграмму повреждения структуры и имеет вид ступенчатой функции. Так, для сетевого объекта, показанного на рисунке 1 диаграмма повреждения представлена на рисунке 2.

Значения $M[Y_B], \dots, M[Y_E]$ представляют собой математические ожидания степеней повреждения, при достижении которых происходит последовательное отключение от источника потребителей В, ... Е [12].

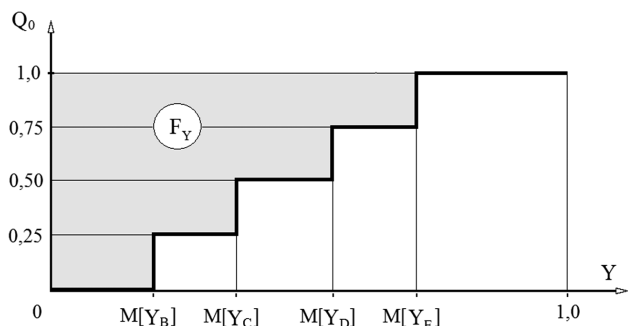


Рис. 2 – Диаграмма повреждения сетевой структуры

Показателем стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов является площадь F_Y ступенчатой фигуры, показанной на рисунке 2:

$$F_Y = \{M[Y_B] + M[Y_C] + M[Y_D] + M[Y_E]\} / U_0$$

Таким образом, показатель стойкости представляет собой среднюю долю повреждаемых узлов системы, блокировка которых в случайном порядке приводит к отключению от источника всех отключаемых потребителей целевого продукта.

Поскольку трубопроводные транспортные системы могут быть различного уровня сложности и содержать разное количество структурных элементов, то корректное сравнение значений их показателей стойкости возможно только в том случае, если соответствующие зависимости $Q_0(Y)$ имеют подобный вид.

Обеспечить совмещение диаграмм повреждения систем с защищенными точечными элементами принципиально возможно только при соблюдении определенных условий. Предположим, анализируемые сетевые структуры имеют одинаковое количество:

- узлов-потребителей, отключение которых от источника возможно в результате развития процесса блокировки;
- повреждаемых узлов, т.е. узлов способных перейти в состояние неработоспособности из-за отсутствия соответствующей защиты.

В этом случае рассматриваемые системы являются сопоставимыми, а сравнение значений их показателей стойкости оказывается корректным.

Если же совокупность защищенных узлов системы оказывается взаимосвязанной, то такой сетевой фрагмент рассматривается как защитный кластер [13]. Кластер называется центральным, если в его составе присутствует узел-источник, в противном случае он считается периферийным.

Наличие защитных кластеров оказывает существенное влияние на развитие процесса прогрессирующей блокировки. Например, если в составе периферийного кластера имеется несколько потребителей продукта, то в некоторый момент системного времени все они будут отключены от источника продукта совместно.

По этой причине кроме приведенного перечня необходимых условий сопоставимости, нужно указать и достаточные условия, выполнение которых позволяет

корректно сравнивать расчетные значения F_Y при наличии в системе защитных кластеров.

Итак, при наличии периферийных кластеров сетевые структуры оказываются сопоставимыми, если они удовлетворяют дополнительному перечню условий и характеризуются:

- одинаковым числом периферийных кластеров с двумя и более узлами-потребителями и совпадающим количеством таких узлов в каждом из них;
- одинаковой последовательностью отключения от источника, как отдельных потребителей, так и периферийных кластеров, с равным количеством потребителей продукта.

Таким образом, перечисленные необходимые и достаточные условия сопоставимости свойств различных сетевых структур позволяют установить возможность корректного сравнения значений их показателей стойкости.

Анализ эффективности защитных мероприятий, реализуемых в отношении отдельных узлов транспортных систем, выполнялся с учетом результатов имитационного компьютерного моделирования [14]. При этом оценивалось влияние на стойкость системы как удаленности защищаемого транспортного узла от источника, так и его функциональное назначение.

В общем случае, в составе транспортной системы возможно наличие следующих разновидностей точечных элементов:

- узел-источник целевого продукта;
- узлы-потребители;
- распределительные транспортные узлы.

Перечисленные элементы имеют разное функциональное назначение, и можно предположить, что их защита влияет на стойкость систем к прогрессирующим повреждениям в различной степени. Кроме того, стойкость сетевого объекта к повреждениям зависит и от удаленности защищаемого узла от источника целевого продукта. При этом удаленность от источника определяется как минимальное число переходов, которые необходимо совершить вдоль имеющейся сети, чтобы совместить анализируемый узел с действующим источником.

Изучение влияния перечисленных факторов на развитие процесса прогрессирующей блокировки узлов выполнялась с использованием системы, структурная схема которой показана на рисунке 3.

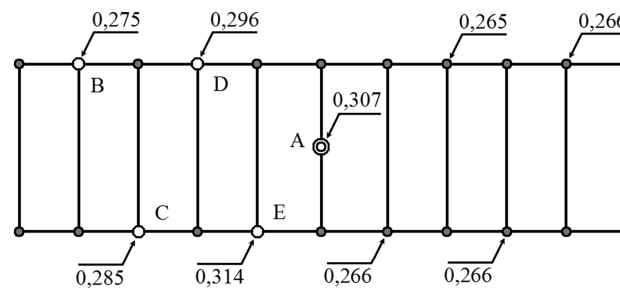


Рис. 3 – Структурная схема, используемая для оценки влияния защиты отдельных узлов транспортной системы на ее стойкость к развитию процесса прогрессирующей блокировки

Выбор указанной схемы связан с наличием у нее следующих структурных особенностей:

- узлы сетевого объекта слева и справа от источника продукта расположены симметрично;
- каждому узлу-потребителю, расположенному в левой части можно поставить в соответствие распределительный узел в правой части находящийся на том же удалении от источника продукта;
- все узлы-потребители расположены на разном удалении от источника целевого продукта.

При моделировании процесса прогрессирующего повреждения, в составе каждой из расчетных схем допускалось наличие только одного защищенного узла. Вследствие этого при реализации каждой вычислительной процедуры количество повреждаемых узлов в системе принималось 22, а количество отключаемых потребителей 4.

Расчетные значения F_{γ} в этих условиях являются сопоставимыми и позволяют оценить не только влияние принадлежности защищаемого узла к той или иной разновидности, но и удаленность этого узла от источника на стойкость сетевого объекта к прогрессирующим повреждениям.

Установленные значения F_{γ} для наглядности приведены на рисунке 3 рядом со стрелками, указывающими на защищаемый точечный элемент системы. Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее:

- наибольший положительный эффект имеет место при защите узлов-потребителей расположенных на минимальном удалении от источника продукта;
- по мере удаления защищаемого потребителя от источника эффективность защитных мероприятий непрерывно снижается;
- эффективность защиты распределительных узлов ниже по сравнению с защитой узлов-потребителей расположенных на одинаковом удалении от источника продукта;
- защита удаленных от источника распределительных узлов практически не сопровождается изменением значений показателя стойкости.

Таким образом, оценивая результаты защиты отдельных точечных элементов транспортной системы необходимо отметить, что наиболее предпочтительным является вариант защиты узла-потребителя, расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта.

По мере удаления защищаемого потребителя от источника, эффективность защитных мероприятий снижается, что следует учитывать при разработке и принятии проектных решений. Кроме того, в качестве эффективной меры следует рекомендовать и защиту узла-источника целевого продукта, если выполнение такого рода процедуры возможно.

Защитный периферийный кластер и его влияние на стойкость сетевых структур к повреждениям

Наличие в составе транспортной системы периферийного кластера оказывает существенное влияние на её стойкость к развитию процесса прогрессирующей

блокировки узлов. В этой связи представляет интерес поиск такой конфигурации кластера, при которой возможно достижение наибольшего положительного эффекта с учетом существующих ресурсных ограничений. В первом приближении можно считать, что затраты связанные с защитой транспортных узлов пропорциональны количеству защищаемых линейных элементов. Тогда синтез защитного кластера следует рассматривать как оптимизационную процедуру, связанную с поиском решений обеспечивающих достижение требуемого уровня защиты при минимальном числе защищаемых линейных элементов [15].

Сложность поставленной задачи заключается в том, что для получения достоверной информации относительно свойств сетевых объектов с различными вариантами конфигурации периферийного кластера требуется выполнить предварительную оценку сопоставимости свойств этих структур.

Прежде всего, сравниваемые объекты должны иметь одинаковое число отключаемых потребителей, а также равное количество повреждаемых узлов. Кроме того периферийные кластеры систем должны содержать одинаковое количество потребителей целевого продукта.

Перечисленные условия являются необходимыми для корректного сравнения свойств сетевых структур. Условие же достаточности связано с достижением подобного вида диаграмм повреждения сопоставимых объектов. Для этого у сравниваемых структур должна совпадать наиболее вероятная последовательность отключения потребителей от источника.

Указанное достаточное условие при наличии в системе периферийных кластеров различной конфигурации обеспечить, как правило, не удастся. В этом случае вместо поиска конкретных значений F_{γ} основное внимание следует сосредоточить на анализе общих закономерностей и динамики развития повреждения при наличии в системе защитного кластера с несколькими потребителями целевого продукта. Отметим, что если в составе периферийного кластера имеется несколько потребителей, то все они отключаются от источника продукта одновременно.

Пусть в системе с 6-ю отключаемыми потребителями, имеется периферийный кластер, в состав которого входят 3 потребителя продукта. В зависимости от принятой конфигурации защитного кластера диаграммы повреждения могут быть разного вида. Предположим, кластер находится на небольшом удалении от источника, и совместное отключение 3-х потребителей из его состава происходит в последнюю очередь. Диаграмма повреждения такой системы будет иметь вид, показанный на рисунке 4а. Если же кластер с тремя потребителями отключается в первую очередь, то соответствующая диаграмма повреждения имеет вид, показанный на рисунке 4б.

Поскольку F_{γ} представляет собой площадь ступенчатой фигуры на диаграмме повреждения, то следует предположить, что вариант повреждения объекта в соответствии со схемой, показанной на рисунке 4а оказывается наиболее предпочтительным. Именно в этом случае создаются объективные условия для достижения наибольших значений F_{γ} .

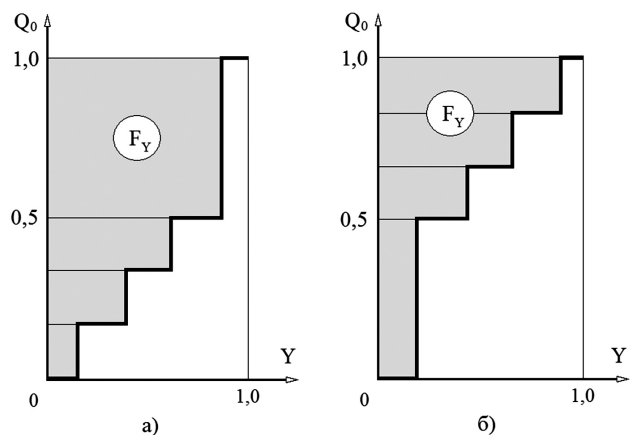


Рис. 4 – Диаграммы повреждения сетевых структур с совместным отключением от источника потребителей из состава периферийного кластера в последнюю (а) и в первую очередь (б)

Это означает, что при формировании периферийного кластера следует рекомендовать включение в его состав преимущественно тех потребителей, которые наименее удалены от источника целевого продукта.

Проверим это положение на конкретном примере. Рассмотрим структурную схему трубопроводной системы, показанную на рисунке 5а. В составе защитного кластера K1 имеется 4 потребителя, которые при развитии процесса прогрессирующей блокировки узлов будут отключены от источника совместно и в первую очередь.

Вид диаграммы повреждения для этого случая показан на рисунке 6а. Если же в состав периферийного кластера включить 4 потребителя, которые в меньшей степени удалены от источника продукта (рисунок 5б), то диаграмма повреждения такой системы будет иметь вид, показанный на рисунке 6б.

Необходимые условия сопоставимости структур SIT1 и SIT2 в этом случае выполняются. Установленные для них значения F_Y можно сравнивать с оговоркой о невозможности полного совмещения соответствующих диаграмм повреждения.

Результаты определения характеристик стойкости структур с условным обозначением SIT1 и SIT2 приведены в табл. 1.

Видно, что высказанное предположение относительно ожидаемых свойств объектов подтверждается в полной мере. Это означает, что при принятии проектных решений связанных с формированием периферийного кластера целесообразно включать в его состав, прежде всего наи-

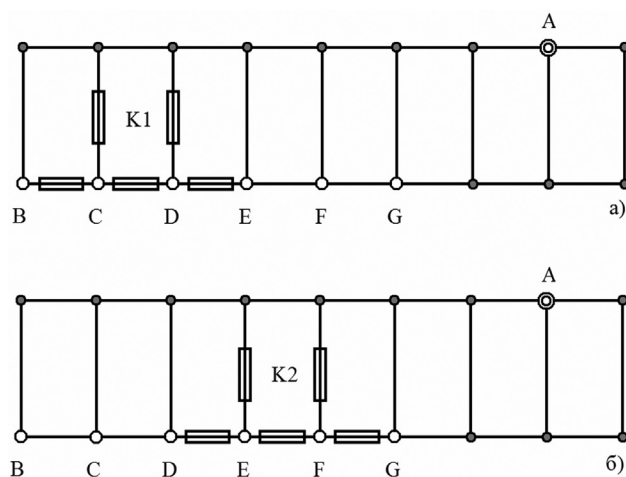


Рис. 5 – Структурные схемы SIT1 (а) и SIT2 (б) с периферийным кластером, расположенным на большем и меньшем удалении от источника целевого продукта А

более удаленные от источника потребители целевого продукта.

Вопрос о целесообразности включения в состав периферийного кластера распределительных узлов также имеет прикладное значение и должен быть подробно рассмотрен. Так, на рисунке 7 показаны структурные схемы SIT3 и SIT4, в составе которых имеются кластеры K3 и K4 отличающиеся от кластера K2 системы SIT2 наличием дополнительных распределительных узлов. Увеличение количества узлов в составе кластеров K3

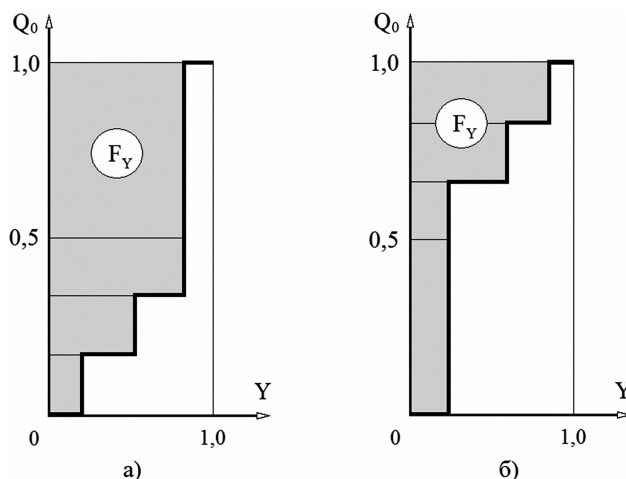


Рис. 6 – Вид диаграмм повреждения сетевых структур SIT1 (а) и SIT2 (б)

Таблица 1. Характеристики сетевых структур удовлетворяющих необходимым условиям сопоставимости

Обозначение сетевой структуры	Количество повреждаемых узлов	Количество отключаемых узлов-потребителей в составе		Расчетное значение F_Y
		системы	периферийного кластера	
SIT1	16	6	4	0,265
SIT2	16	6	4	0,296
SIT3	16	6	4	0,342
SIT4	16	6	4	0,401

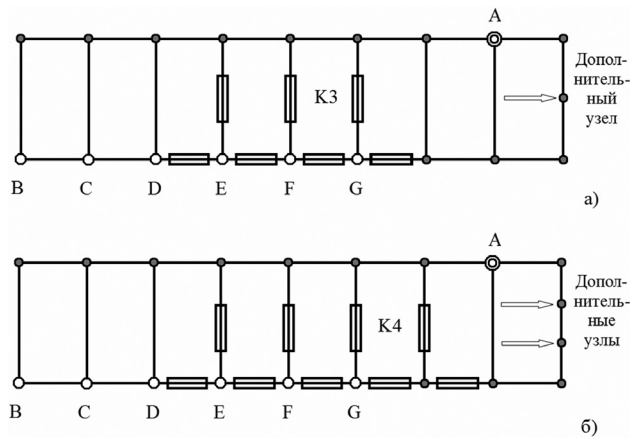


Рис. 7 – Структурные схемы SIT3 (а) и SIT4 (б) с дополнительными распределительными узлами и защитными кластерами К3 и К4

и К4 требует включения в состав системы новых повреждаемых точечных элементов для соблюдения необходимых условий сопоставимости.

По этой причине общее количество точечных элементов в составе структуры SIT3 составляет 19 (рисунок 7а), а в составе SIT4 таких элементов 20 (рисунок 7б).

Результаты определения значений F_y для перечисленных сетевых объектов приведены в табл. 1 и позволяют заключить, что включение в состав периферийного кластера дополнительных точечных элементов целесообразно только в том случае, если это сопровождается уменьшением его удаленности от источника целевого продукта.

Выводы

1. Развитие аварийной ситуации по механизму прогрессирующей блокировки узлов является опасным сценарием повреждения трубопроводной системы. Повысить стойкость к повреждениям сетевой структуры можно с использованием мероприятий по защите узлов транспортной системы. Наибольшая эффективность защиты отдельных точечных элементов достигается при защите узла-потребителя расположенного на минимальном удалении от источника целевого продукта.

2. Синтез периферийного кластера для защиты транспортной системы от прогрессирующего повреждения следует осуществлять путем включения в его состав потребителей, расположенных на минимальном удалении от узла-источника продукта.

Библиографический список

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

3. Черкесов Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности (часть 2) [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 26-34.

4. Shashi Menon E. Pipeline Planning and Construction Field Manual [Text] / E. Shashi Menon. – 2011, Gulf Professional Publishing, USA. – 552 p.

5. Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook [Text] / Edited by R. Winston. – 2015, John Wiley & Sons, Inc. – 816 p.

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

7. Keith Escoe A. Piping and Pipeline Assessment Guide [Text] / A. Keith Escoe. – 2006, Elsevier Inc. – 555 p.

8. Sabet 1, Seyyed Ali. Seismic Behavior Of Buried Pipelines Subjected To Normal Fault Motion [Text] / S.A. Sabet 1, S.M. Reza Nayyeri // Advances in Science and Technology Research Journal. – Vol. 10. – No. 30. – June 2016. – P. 84–88.

9. Vazouras P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacement [Text] / P. Vazouras, S. Karamanson // Journal of Soil Dynamics and Earth-quake Engineering. – 2010. – № 30(11). – P. 1361–1376.

10. Lele S.P. Advanced continuum modeling to determine pipeline strain demand due to ice-gouging [Text] / S.P. Lele, J.M. Hamilton, M. Panico, H. Arslan // Journal of International Society of Offshore and Polar Engineers. – 2013. – № 23(1). – P. 22–28.

11. Ramesh Singh. Pipeline Integrity Handbook Risk Management and Evaluation [Text] / S. Ramesh. – 2014, Elsevier Inc., 308 p.

12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов [Текст] / В.Е. Гмурман. 10 изд. – М.: Высш. шк., 2004. – 479 с.

13. Снарский А.А. Моделирование сложных сетей: Учеб. Пособие [Текст] / А.А. Снарский, Д.В. Ландэ. – К.: Ижнинринг, 2015. – 212 с.

14. 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.

15. Тарарычкин И.А. Стратегии защиты объектов трубопроводного транспорта от структурных повреждений при развитии аварийных ситуаций [Текст] / И.А. Тарарычкин // Безопасность труда в промышленности, 2018. № 2. с. 52-57.

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 08.12.2018

Методика определения зон (не)допустимых значений факторов для уменьшения риска схода с рельсов вагонов грузового поезда по причине излома боковой рамы¹

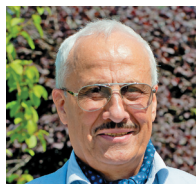
Игорь Б. Шубинский, АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва

Алексей М. Замышляев, АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва

Алексей Н. Игнатов, Московский авиационный институт, Российская Федерация, Москва

Андрей И. Кибзун, Московский авиационный институт, Российская Федерация, Москва

Евгений О. Новожилов, АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва



Игорь Б.
Шубинский



Алексей М.
Замышляев



Алексей Н.
Игнатов



Андрей И. Кибзун



Евгений О.
Новожилов

Резюме. Цель. По данным протоколов расследования крушений/сходов с рельсов вагонов грузовых поездов в 2013-2016 гг. на сети железных дорог Российской Федерации при поездной работе сходы и крушения наиболее часто происходят по причине неисправности подвижного состава, и около трети этих сходов произошло вследствие излома боковой рамы тележки вагона. Причем среднее количество сошедших единиц подвижного состава равно 4,16 в случае сходов с рельсов по причине излома боковой рамы против 1,73 в случае сходов с рельсов из-за прочих неисправностей подвижного состава. Ранее была разработана методика, позволяющая принять решение о выбраковке определенной партии боковых рам. В то же время боковые рамы из партий, не подлежащих выбраковке, с течением времени могут изломаться. В этой связи актуальной представляется разработка методики, на основании которой можно было бы своевременно отцепить вагон в капитальный/деповской ремонт для предотвращения излома боковой рамы. Для этой цели стоит рассмотреть факторные модели оценки опасности возникновения излома. В качестве таких факторов могут выступать количество километров от последнего пункта технического обслуживания (ПТО), а также количество километров и количество дней до следующего планируемого капитального/деповского ремонта. А в качестве количественной характеристики опасности излома боковой рамы можно использовать вероятность излома боковой рамы. Однако оценка вероятности, например, в форме частоты, излома боковой рамы возможна только при наличии наблюдений, когда излом или критический дефект боковой рамы не происходил, которые не ведутся. Поэтому следует разработать индекс опасности излома боковой рамы. Так как управление частотой появления вагона на ПТО сложноосуществимо, то индекс опасности должен зависеть только от количества дней и километров до ремонта. На основе построенного индекса надо построить зоны (не)допустимых значений факторов с целью принятия решения об отцепке вагона в ремонт, если у осмотрщика вагонов на ПТО возникают сомнения в целесообразности отцепки. **Методы.** В работе использовались методы математического программирования. **Результаты. Выводы.** Был построен индекс влияния, который характеризует опасность излома боковой рамы вагона грузового поезда в зависимости от оставшегося количества дней и километров до планового ремонта вагона. На основе данного индекса были предложены две методики построения зон (не)допустимых значений факторов. Первая методика строилась на основе значений индекса влияния. Вторая строилась на основе фиксации некоторых параметров зон (не)допустимых значений факторов и выборе среди всех зон наилучших с точки зрения наименьшей опасности излома боковой рамы. Данный выбор был осуществлен путем решения задач смешанного целочисленного программирования с квадратичным ограничением.

Ключевые слова: риск, сход с рельсов, излом боковой рамы, индекс влияния, индекс опасности

Формат цитирования: Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Новожилов Е.О. Методика определения зон (не)допустимых значений факторов для уменьшения риска схода с рельсов вагонов грузового поезда по причине излома боковой рамы // Надежность. 2019. №3. С. 40-46. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-40-46

¹ Результаты работы получены при поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-03050 офи_м_РЖД

Введение

Движение грузовых поездов по железнодорожной сети сопряжено с риском возникновения различных неблагоприятных событий: возгорания поездного локомотива, отцепки вагона в пути следования, столкновения между автотранспортом и поездом на железнодорожном переезде, сходом поезда с рельсов. Согласно [1] риск возникновения указанных и прочих транспортных происшествий, представляет собой функционал вероятности и ущерба. Для принятия управленческих решений по поддержанию уровня риска на допустимом уровне строится матрица риска, принципы построения которой описаны в [2].

Среди указанных транспортных происшествий и прочих как в России, так и на Западе наиболее активно исследуются сходы поездов с рельсов. Данный вид происшествий отличается тяжелыми последствиями от возникновения и происходит относительно часто. В [3] для оценки количества вагонов в сходе использовались метод максимального правдоподобия и квантильная регрессия. В [4] исследовалась задача об оценке количества вагонов в сходе в зависимости от номера первой (от головы поезда) подвижной единицы, сошедшей с рельсов. В [5] исследовалось влияние стрелочного перевода и геометрических особенностей пути на количество подвижных единиц в сходе. Отметим, что для оценки ущерба достаточно исследования протоколов транспортных происшествий, в то время как для оценки вероятности необходимо также исследовать случаи, когда транспортные происшествия не происходили. Поэтому построение факторных моделей, связывающих вероятность транспортного происшествия и значения различных факторов, крайне затруднительно. В связи с этим, как правило, рассматриваются упрощенные модели, не учитывающие, например, геометрию пути в месте схода поезда: в [6] вероятность схода с рельсов зависела от класса пути, длины состава и количества пройденных им километров, в [7] исследовалось среднее количество транспортных происшествий, зависящее от пройденного количества километров пути поездами и вагонами. Альтернативой указанным выше интегральным способам оценки вероятности для уменьшения частоты схода подвижных единиц с рельсов является построение индексов влияния [8], которые строятся на основе частоты появления факторов в случае возникновения транспортного происшествия.

Изломы боковой рамы тележки среди всех сходов/крушений вагонов грузовых поездов по причине неисправности подвижного состава приводят к наибольшим ущербам. Исследование проблемы излома боковой рамы, как правило, связано с изучением конструктивных особенностей боковой рамы и их влияния на излом [9-11]. В то же время необходимо отметить [12], где предложены границы для допустимой частоты изломов боковых рам и частоты появления дефектов, требующих ремонта. Однако данная методика направлена на выявление

партии боковых рам, признаваемой бракованной, а не на предупреждение излома конкретной боковой рамы, что является предметом настоящей статьи. Поскольку полностью исключить изломы боковых рам невозможно, то необходимо минимизировать количество изломов. С этой целью логичным представляется построение оценки вероятности излома боковой рамы конкретного вагона конкретного поезда. Однако напрямую построение оценки вероятности излома боковой рамы, например, при помощи логистической или пробит-регрессии невозможно, так как статистика, когда излом боковой рамы не происходил, не ведется. В то же время аналогично [5] можно построить индекс опасности излома боковой рамы, основываясь только на данных, когда излом происходил.

Для построения индекса опасности надо выделить факторы, влияющие на частоту исследуемого транспортного происшествия, которыми можно управлять. Можно выделить три фактора: количество километров, пройденных поездом от последнего пункта технического обслуживания (ПТО), количество километров, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта, количество дней, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта. Очевидно, что с ростом расстояния от последнего ПТО и уменьшения количества дней и километров до планового ремонта растет вероятность возникновения дефекта в раме. Однако изменение частоты проведения ПТО вряд ли возможно. В то же время на ПТО возможность отправить вагон на внеплановый ремонт всегда имеет место. Поэтому далее в работе рассматриваются в качестве факторов только количество километров, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта, количество дней, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта.

В связи с вышесказанным в настоящей работе строится индекс опасности излома боковой рамы, зависящий от количества пройденных километров от последнего ПТО поездом и количеством дней от последнего деповского ремонта/момента изготовления вагона. На основании данного индекса строится матрица рисков для предупреждения излома боковой рамы.

Построение индекса опасности излома боковой рамы

Пусть имеется M протоколов деповского ремонта, выявившего необходимость в ремонте боковой рамы, в которых отражены:

d_i – количество километров, пройденных поездом от последнего ПТО, км;

s_i – количество километров, пройденных поездом после последнего деповского/капитального ремонта/постройки вагона, км;

t_i – количество дней после последнего деповского/капитального ремонта/постройки вагона;

y_i – год выпуска боковой рамы.

Поскольку качество литья у одного производителя боковых рам может варьироваться от года к году, то выделим среди общего количества протоколов протоколы по боковым рамам одного производителя одного и того же года литья и будем далее рассматривать их, предварительно перенумеровав. Пусть их общее количество равно m . Поскольку управление пробегом до очередного ПТО сложноосуществимо, в дальнейшем этот фактор рассматриваться не будет. Так как у вагонов различных типов с рамами одного производителя количество километров до очередного ремонта может быть различным, то будем рассматривать новую величину $\hat{s} = f(s)$, характеризующую оставшееся количество километров до планового ремонта и вычисляемую согласно [13]. Аналогичным образом введем величину $\hat{t} = g(t)$, характеризующую оставшееся количество дней до планового ремонта и также вычисляемую согласно [13].

Для точной оценки риска возникновения дефекта боковой рамы и последующего излома требуется оценить $P(\hat{s}, \hat{t})$ – вероятность того, что некоторой боковой раме потребуется ремонт, при оставшемся до ремонта количестве дней \hat{t} и количестве километров \hat{s} . Для оценки функции $P(\hat{s}, \hat{t})$ необходимо иметь наблюдения, когда дефект в раме отсутствовал, т.е. нужно знать, в какой именно момент времени в боковой раме возник дефект. Однако такие наблюдения не ведутся. В этой связи классическую оценку вероятности в виде частоты, логистическую или пробит-регрессию построить невозможно. С похожей проблемой столкнулись авторы [8], предложив использование индексов влияния, позволяющих выявить факторы, приводящие к транспортным происшествиям, и строящихся только на основе протоколов транспортных происшествий. Аналогичным способом, предложенным в [8], построим эвристическую функцию

$$I(\hat{s}, \hat{t}) = \frac{\sum_{i=1}^m \chi_{[\hat{s}, +\infty] \times [0, +\infty] \cup [0, +\infty] \times [\hat{t}, +\infty]}(s_i, t_i)}{N}, \quad (1)$$

где

$$\chi_A(z) = \begin{cases} 1, & z \in A, \\ 0, & z \notin A, \end{cases}$$

а N – общее количество боковых рам некоторого года выпуска некоторого производителя, эксплуатирующихся в течение года, являющуюся заменой функции $P(\hat{s}, \hat{t})$, которая служит для анализа и уменьшения риска изломов боковых рам. Функция $I(\hat{s}, \hat{t})$ характеризует опасность возникновения дефекта и, как следствие, излома конкретной боковой рамы конкретного вагона и зависит от количества километров \hat{s} и количества дней \hat{t} , оставшихся до ремонта вагона. Функция $I(\hat{s}, \hat{t})$ вычисляется как отношение количества случаев, когда был обнаружен дефект у рам с меньшим количеством дней до ремонта, чем \hat{t} , или меньшим количеством километров до ремонта, чем \hat{s} , к общему числу боковых рам некоторого года выпуска некоторого производителя,

эксплуатирующихся в течение года. Такой выбор данной функции $I(\hat{s}, \hat{t})$ вызван тем, что если в прошлом было зафиксировано много отказов/изломов боковой рамы с меньшим количеством дней до ремонта, чем \hat{t} , или меньшим количеством километров до ремонта, чем \hat{s} , то опасность излома боковой рамы высока.

Опишем свойства функции $I(\hat{s}, \hat{t})$:

(i) функция $I(\hat{s}, \hat{t})$ монотонно не возрастает по каждому из своих параметров;

(ii) $I(+\infty, +\infty) = 0$;

(iii) $\forall \hat{s} \geq 0 \quad \forall \hat{t} \geq 0 \quad I(\hat{s}, 0) = I(0, \hat{t}) = \max_{\hat{s} \geq 0, \hat{t} \geq 0} I(\hat{s}, \hat{t}) = m/N$.

Прокомментируем указанные свойства. Свойство (i) гарантирует то, что с уменьшением количества дней или километров до ремонта опасность возникновения дефекта не уменьшится. Отметим, что и функция $P(\hat{s}, \hat{t})$ монотонно не возрастает по каждому из своих параметров, поскольку физические свойства боковой рамы не улучшаются с ростом пробега. Свойство (ii) гарантирует, что после ремонта опасность будет равна нулю (ремонт предполагается полностью устраняющим дефекты). Свойство (iii) гарантирует, что максимальное значение индекса опасности достигается на максимально возможной дистанции или максимально возможном количестве дней без ремонта.

Нахождение зон (не)допустимых значений факторов

Согласно [1] матрица риска это инструмент, позволяющий ранжировать и отражать риски путем определения уровней частот и тяжести последствий. По сути, матрица риска – это функция, определенная на пространстве, составленном из вероятности транспортного происшествия, и ущерба, позволяющая принимать управленческие решения по снижению риска транспортного происшествия. Указанная функция имеет четыре значения и таким образом делит пространство вероятности и ущерба на четыре связанные области: зона не принимаемого в расчет риска, зона допустимого риска, зона нежелательного риска, зона критического риска. Каждая из этих зон характеризует необходимость принятия мер для уменьшения риска происшествия. Границы этих зон могут быть как гладкими [1], так и негладкими [14]. При этом, как правило, такая матрица применяется для стратегического планирования и управления, в то время как для оперативного управления недостаточно только частоты происшествий и удельного ущерба за год от некоторого происшествия. В этой связи актуально построение зон (не)допустимых значений факторов, влияющих на частоту и ущерб от транспортных происшествий, как это было сделано в [14]. Введем обозначения:

D_1 – зона не принимаемого в расчет риска;

D_2 – зона допустимого риска;

D_3 – зона нежелательного риска;

D_4 – зона критического риска.

Вначале построим эти зоны только на основе индекса опасности (1)

$$D_1 = \{(\hat{s}, \hat{t}) : 0 \leq I(\hat{s}, \hat{t}) < i_1\};$$

$$D_2 = \{(\hat{s}, \hat{t}) : i_1 \leq I(\hat{s}, \hat{t}) < i_2\};$$

$$D_3 = \{(\hat{s}, \hat{t}) : i_2 \leq I(\hat{s}, \hat{t}) < i_3\};$$

$$D_4 = \{(\hat{s}, \hat{t}) : i_3 \leq I(\hat{s}, \hat{t})\},$$

где $i_1 < i_2 < i_3$ – некоторые числа. Эти числа можно задавать из экономических соображений. Пусть c_1 – средняя стоимость ремонта деповского/капитального ремонта, c_2 – средний убыток от простаивания вагона в ремонте, а c_3 – средний ущерб при сходе вагонов/крушении грузового поезда по причине излома боковой рамы. Очевидно, что если для некоторой точки (\hat{s}, \hat{t}) риск излома боковой рамы превышает стоимость ремонта и ущерба от простаивания вагона, то эта точка должна попадать в зону нежелательного или критического риска. В этой связи можно положить $i_1 = \frac{1}{2} \frac{c_1 + c_2}{c_3}$, $i_2 = \frac{c_1 + c_2}{c_3}$, $i_3 = \frac{3}{2} \frac{c_1 + c_2}{c_3}$.

Отметим, что другим подходом к определению зон (не)допустимых значений факторов является фиксация некоторых параметров зон (например, площади) и поиск на плоскости $\hat{t}O\hat{s}$ наилучших таких зон. Для этого будем строить зоны (не)допустимых значений факторов в виде, указанном на рис. 1.

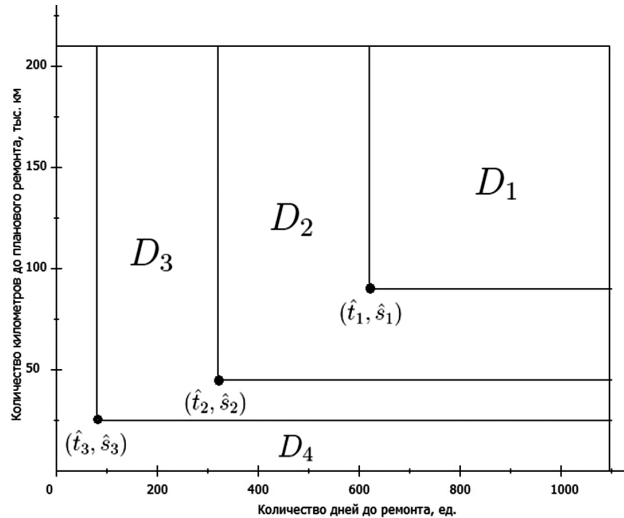


Рисунок 1 – Специальный вид диаграммы зон (не)допустимых значений факторов.

Причем

$$D_1 = (\hat{s}^1, 210000] \times (\hat{t}^1, 1095],$$

$$D_2 = (\hat{s}^2, 210000] \times (\hat{t}^2, 1095] \cap D_1,$$

$$D_3 = (\hat{s}^3, 210000] \times (\hat{t}^3, 1095] \cap D_1 \cap D_2,$$

$$D_4 = [0, 210000] \times [0, 1095] \cap D_1 \cap D_2 \cap D_3,$$

где величины $\hat{s}^1 \geq \hat{s}^2 \geq \hat{s}^3$, $\hat{t}^1 \geq \hat{t}^2 \geq \hat{t}^3$ подлежат определению.

Для определения \hat{s}^j, \hat{t}^j , а по сути границ множеств D_j , отметим, что существует бесконечно много множеств D_j

одинаковой площади. При этом каждое такое множество характеризуется определенным значением максимума индекса опасности на нем. В этой связи будем искать такие множества D_j , чтобы

$$S_{D_1} \geq s_1, S_{D_1 \cup D_2} \geq s_2, S_{D_1 \cup D_2 \cup D_3} \geq s_3,$$

где $s_1 < s_2 < s_3$ – некоторые наперед заданные параметры. Данные параметры могут быть заданы, например, из геометрических ограничений: $s_1 = \frac{1}{4} S$, $s_2 = \frac{2}{4} S$, $s_3 = \frac{3}{4} S$, где

$S = S_{D_1 \cup D_2 \cup D_3 \cup D_4}$. При этом на оптимальных множествах D_j максимальное значение индекса опасности должно быть наименьшим среди всех остальных множеств такой же площади. Учитывая вышесказанное, задача по поиску параметров \hat{s}^1, \hat{t}^1 принимает вид

$$\max_{\hat{s}^1 < \hat{s} \leq 210000, \hat{t}^1 < \hat{t} \leq 1095} I(\hat{s}, \hat{t}) \rightarrow \min_{\hat{s}^1 \geq 0, \hat{t}^1 \geq 0} \quad (2)$$

с ограничением

$$(210000 - \hat{s}^1)(1095 - \hat{t}^1) \geq s^1. \quad (3)$$

Задача (2) при ограничении (3) является задачей нелинейного программирования, что затрудняет поиск ее решения. Поэтому путем введения целочисленных $\delta_i \in \{0, 1\}$ переменных упростим эту задачу, $i = \overline{1, M}$. Переменная δ_i равна нулю, если в i -м протоколе среди m рассматриваемых зафиксировано, что $\hat{s}^1 \geq \hat{s}_i$ и $\hat{t}^1 \geq \hat{t}_i$, и единице в обратном случае. С использованием переменных δ_i заключаем, что задача (2) при ограничении (3) сводится к задаче

$$\sum_{i=1}^m \delta_i \rightarrow \min_{210000 \geq \hat{s}^1 \geq 0, 1095 \geq \hat{t}^1 \geq 0, \delta_i \in \{0, 1\}} \quad (4)$$

при ограничениях

$$(1 - \delta_i) \hat{s}_i \leq \hat{s}^1, i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$(1 - \delta_i) \hat{t}_i \leq \hat{t}^1, i = \overline{1, m} \quad (6)$$

и ограничении (3). Пусть \hat{s}_i^* и \hat{t}_i^* – точки, задающие границу множества D_1 , полученные при решении задачи (4) при ограничениях (3), (5)-(6). Тогда аналогичным образом для нахождения границ множества D_2 нужно решить задачу

$$\sum_{i=1}^m \gamma_i \rightarrow \min_{\hat{s}_1^* \geq \hat{s}^2 \geq 0, \hat{t}_1^* \geq \hat{t}^2 \geq 0, \gamma_i \in \{0, 1\}} \quad (7)$$

при ограничениях

$$(1 - \gamma_i) \hat{s}_i \leq \hat{s}^2, i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

$$(1 - \gamma_i) \hat{t}_i \leq \hat{t}^2, i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

$$(210000 - \hat{s}^2)(1095 - \hat{t}^2) \geq s^2. \quad (10)$$

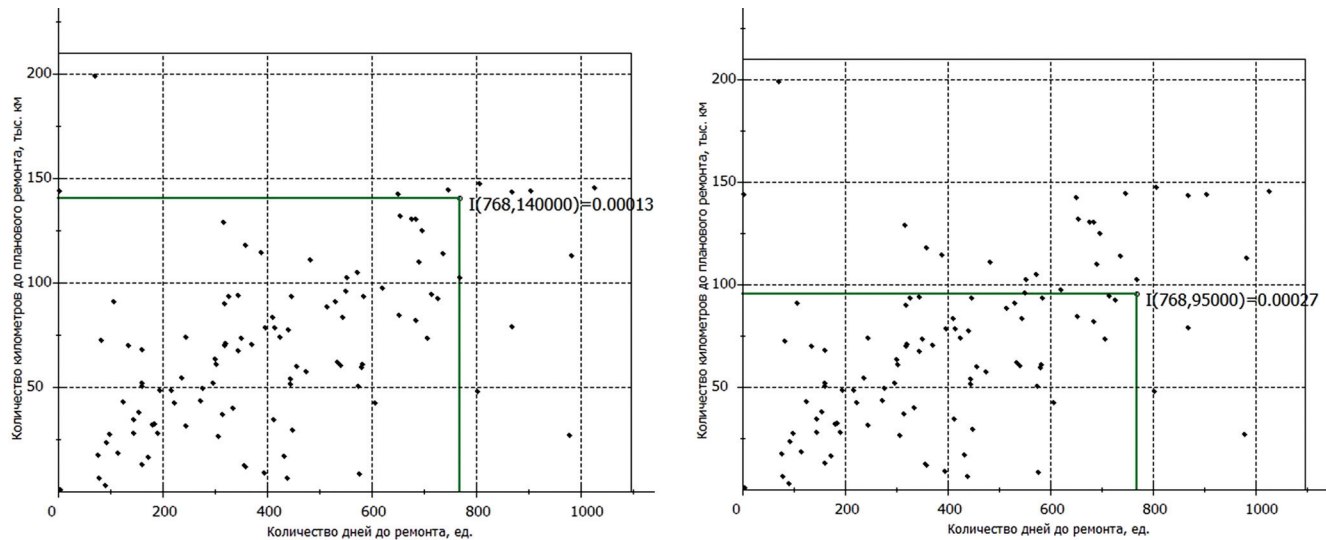


Рисунок 2 – Значения индекса опасности $I(\hat{s}, \hat{t})$ при $N=100000$.

Пусть s_2^* и t_2^* – точки, задающие границу множества D_2 , полученные при решении задачи (7) при ограничениях (8)-(10). Для нахождения границы множества D_3 нужно решить задачу

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \rightarrow \min_{s_2^* \geq \hat{s}^3, t_2^* \geq \hat{t}^3, \alpha_i \in \{0,1\}} \quad (11)$$

при ограничениях

$$(1 - \alpha_i) \hat{s}_i \leq \hat{s}^3, i = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$(1 - \alpha_i) \hat{t}_i \leq \hat{t}^3, i = \overline{1, m}, \quad (13)$$

$$(210000 - \hat{s}^3)(1095 - \hat{t}^3) \geq s^3. \quad (14)$$

Пусть t_3^* , s_3^* – решение задачи (11) при ограничениях (12)-(14).

Задача(4) при ограничениях (3), (5)-(6), задача (7) при ограничениях (8)-(10), задача (11) при ограничениях (12)-(14) являются задачами смешанного целочисленного программирования с квадратичными ограничениями и могут быть решены при помощи пакета Opti Toolbox в среде Matlab. Отметим, что для поиска границ множеств D_j можно руководствоваться не площадью соответствующих множеств, а, например, длиной одной из границ этого множества.

Таблица 1. Данные о количестве километров до ремонта

Кол-во км до рем.	143548	665	198865	17278	6051	72373	2501	23317	27410	90631	18460	42994
Кол-во дней до рем.	2	4	71	77	79	83	90	92	98	106	114	125
Кол-во км до рем.	69673	34066	27656	37715	50458	67534	12714	51974	16367	31546	32384	27573
Кол-во дней до рем.	135	144	144	154	160	160	161	161	172	180	184	191
Кол-во км до рем.	48288	48072	42490	54148	31241	73995	43001	49288	51872	63043	60743	26186
Кол-во дней до рем.	195	216	222	236	245	245	272	276	297	300	303	306
Кол-во км до рем.	36612	128533	69670	89674	70884	93159	93423	39596	93873	67490	73325	12043
Кол-во дней до рем.	314	317	318	318	320	327	327	335	344	345	351	356
Кол-во км до рем.	117655	11877	70430	114233	8977	78327	83145	34292	78273	73877	16865	6496
Кол-во дней до рем.	358	359	370	389	394	396	410	412	414	425	432	438
Кол-во км до рем.	77204	51497	53710	93079	29083	59903	57380	110608	88367	90629	61746	60260
Кол-во дней до рем.	441	444	445	447	449	456	475	483	515	530	535	541
Кол-во км до рем.	83401	95796	102241	104506	50167	8145	59087	60796	93256	42433	97020	142347
Кол-во дней до рем.	545	551	553	573	574	577	581	583	585	606	620	650
Кол-во км до рем.	84005	131848	130384	81517	130416	109896	124811	73301	94070	92140	113741	144321
Кол-во дней до рем.	652	654	676	684	685	691	697	707	715	726	736	747
Кол-во км до рем.	102477	47759	147077	78562	143361	143654	26937	112502	145128			
Кол-во дней до рем.	768	803	806	869	869	904	979	983	1026			

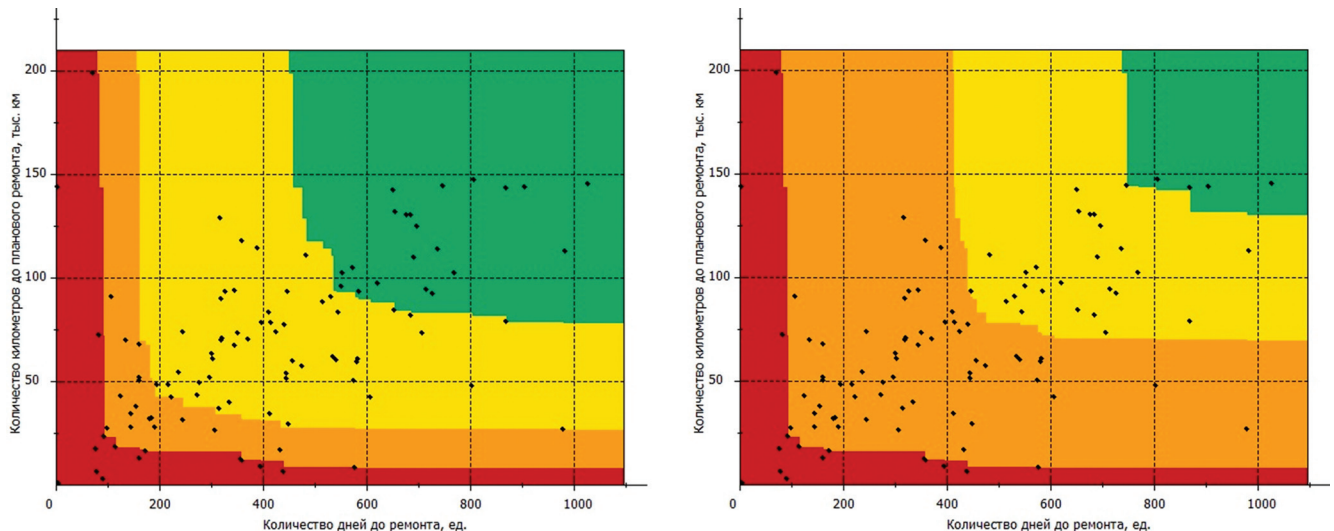


Рисунок 3 – Диаграмма (не)допустимых значений факторов при $i_1=0,0004, i_2=0,0009, i_3=0,001$ (слева) и $i_1=0,0001, i_2=0,0005, i_3=0,001$ (справа)

Пример

Пусть по итогам некоторого года зафиксировано 105 случаев, когда был обнаружен дефект в боковой раме, а $N=100000$. В таблице 1 приведем данные о количестве дней до планового ремонта и количестве километров до планового ремонта в этих случаях.

На основе представленных в табл. 1 данных построим значения индекса опасности в некоторых точках плоскости $\hat{i}O\hat{s}$ (рис. 2).

Теперь построим зоны (не)допустимых значений факторов для различных значений параметров i_1, i_2, i_3 (рис. 3).

Как следует из рис. 3, изменение значений параметров i_1, i_2, i_3 существенно влияет на зоны (не)допустимых значений факторов излома боковой рамы.

Задав $s_1 = 5 \cdot 10^7, s_2 = 1,25 \cdot 10^8, s_3 = 1,75 \cdot 10^8$, получаем $t_1^* = 620,27, s_1^* = 104561,9, t_2^* = 297, s_2^* = 51974, t_3^* = 114, s_3^* = 27410$ и следующую зону (не)допустимых значений факторов, влияющих на излом боковой рамы (рис. 4).

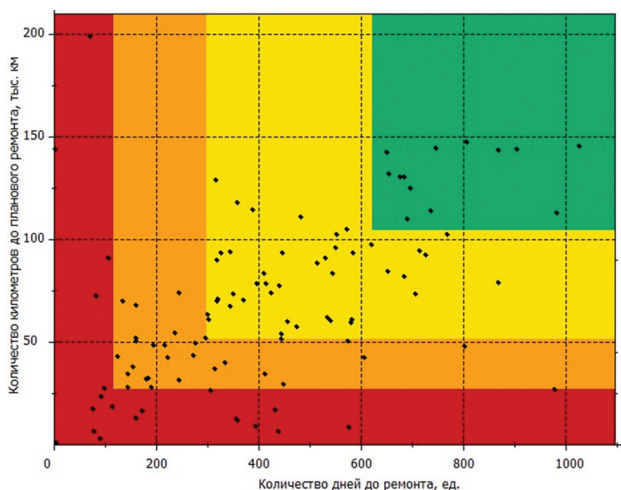


Рисунок 4 – Диаграмма (не)допустимых значений факторов, построенная на основе решения задач оптимизации

Заключение

В настоящей работе была рассмотрена задача по определению зон (не)допустимых значений факторов, влияющих на излом боковой рамы тележки вагона грузового поезда. Для этой цели был построен индекс опасности, зависящий от количества дней и километров до следующего планового деповского/капитального ремонта. На основе этого индекса были предложены две методики определения зон (не)допустимых значений факторов. Первая целиком основывалась на значениях индекса опасности. Поскольку абсолютное значение индекса опасности не является прямой оценкой вероятности излома боковой рамы, была предложена вторая методика, в которой фиксировалась площадь определенной зоны (не)допустимых значений и среди всех множеств одинаковой площади выбиралось такое, у которого значение максимума индекса опасности на нем было бы наименьшим.

Библиографический список

1. ГОСТ 33433-2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте [Текст]. – Введ. 2016–09–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 39 с.
2. Новожилов Е.О. Принципы построения матрицы рисков [Текст] / Е.О. Новожилов // Надежность. – 2015. – № 3. – С. 73-86.
3. Liu X. Analysis of U.S. freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression [Text] / X. Liu, M.R. Saat, X. Qin, C.P.L. Barkan // Accident Analysis and Prevention. – 2013. – Vol. 59. – P. 87-93.
4. Bagheri M. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist [Text] / M. Bagheri, F. Saccomanno, S. Chenouri, L.P. Fu // Accident Analysis and Prevention. – 2011. – Vol. 43. – P. 613–620.

5. **Замышляев А.М.** Построение функциональной зависимости между рядом распределения количества вагонов в сходе и различными факторами движения [Текст] / А.М. Замышляев, А.Н. Игнатов, А.И. Кибзун, Е.О. Новожилов // Надежность. 2018. №1. С. 53-60.

6. **Anderson R.T.** Derailment probability analysis and modeling of mainline freight trains [Text] / R.T. Anderson, C.P.L. Barkan // Proceedings of the 8th International Heavy Haul Conference, International Heavy Haul Association, Rio de Janeiro. – 2005. – P. 491-497.

7. **Schafer D.H.** Effect of Train Length on Railroad Accidents and a Quantitative Analysis of Factors Affecting Broken Rails. MS thesis [Text] / D.H. Schafer. – University of Illinois at Urbana–Champaign, 2006.

8. **Замышляев А.М.** Статистическая оценка опасности возникновения происшествий на железнодорожном транспорте [Текст] / А.М. Замышляев, Ю.С. Кан, А.И. Кибзун, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2012. – № 2. – С. 104-117.

9. **Лукин В.В.** Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов [Текст] / В.В. Лукин, А.О. Бельский // Известия Транссиба. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 7-12.

10. **Галиев И.И.** Причины нарушения безопасности движения грузовых вагонов в эксплуатации [Текст] / И.И. Галиев и др. // Известия Транссиба. – 2013. – Т. 15. – № 3. – С. 133-141.

11. **Kim J.S.** Durability evaluation of a composite bogie frame with bow-shaped side beams [Text] / J.S. Kim, K.W. Shin, H.J. Yoon, W.G. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – Vol. 26. – No. 2. – P. 531-536.

12. Методика отнесения грузовых вагонов к категории со сниженным уровнем эксплуатационной безопасности по показателям надежности и функциональной безопасности литых деталей тележек (рам боковых). Согласовано Комиссией Совета по железнодорожному транспорту по вопросам безопасности движения на железнодорожном транспорте. Протокол № 1 от «6-7» июня 2013 года. Согласовано Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных

специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций. Протокол № 55 от «19-21» февраля 2013 года.

13. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении. Утверждено протоколом пятьдесят седьмого заседания Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества 16-17 октября 2012 г.

14. **Кибзун А.И.** Методика организации профилактики транспортного происшествия [Текст] / А.И. Кибзун, А.Н. Игнатов // Труды второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2013». – 2013. – С. 177-179.

Сведения об авторах

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

Алексей М. Замышляев – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: A.Zamyshlaev@vniias.ru

Алексей Н. Игнатов – кандидат физико-математических наук, Московский Авиационный институт, Москва, Российская Федерация, тел. +7 (906) 059 50 00, e-mail: alexei.ignatov1@gmail.com

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

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

Поступила: 22.02.2019

О надежности оценок инвестиционных рисков

Андрей И. Долганов, ООО «Сев. Р. Девелопмент», Российская Федерация, Москва



Андрей И.
Долганов

Резюме. В данной статье рассматривается вопрос надежности оценок инвестиционных рисков на основе вероятностных реализаций специально составленных сценариев. Для расчета вероятностей реализации сценариев использовались логико-вероятностные методы. Под надежностью оценок рисков понимается вероятность успешной реализацией проекта, выполнение всех договорных обязательств: строительство с требуемым архитектурно-строительным проектом, качеством, в заданные договором сроки и в рамках утвержденного бюджета. Для оценки инвестиционных рисков были выделены восемь сценариев главной группы. В свою очередь, реализация сценариев рисков главной группы зависела от реализации разного количества сценариев рисков каждой подгруппы, входящей в главную группу. Например, первый сценарий главной группы состоял из риска неточного расчета окупаемости проекта и риска недооценки бюджета строительства. Второй – риска недооценки бюджета строительства и риска при выборе основной технологической схемы и основных технологических параметров, и т.д. Риски каждой подгруппы могли быть получены путем экспертных оценок или при достаточности статистических данных по фактическим распределениям. Для решения поставленной задачи на ЭВМ была разработана математическая модель. Математическая модель позволяла также определять такие факторы надежности, как «вес», «значимость», и «вклад» каждого риска в успех инвестиционного проекта (структуру надежности оценки инвестиционных рисков). Анализ результатов расчета позволил определить вероятность успешной реализации проекта (надежность), наиболее важные, значимые и имеющие наибольший вклад в успешную реализацию инвестиционных проектов, риски. Были также определены риски, оказывающие наименьшее влияние на успешную реализацию инвестиционного проекта.

Ключевые слова: вероятность, инвестиции, модель, надежность, риски, система, сценарии.

Формат цитирования: Долганов А.И. О надежности оценок инвестиционных рисков // Надежность. 2019. № 3. С. 47-52. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-47-52

В данной статье рассматривается вопрос надежности оценок инвестиционных рисков на основе вероятностных реализаций специальных сценариев. Для расчета вероятностей реализации сценариев использовались логико-вероятностные методы.

Под надежностью оценок рисков понимается вероятность успешной реализацией проекта, выполнение всех договорных обязательств: строительство с требуемым архитектурно-строительным проектом качеством, в заданные договором сроки и в рамках утвержденного бюджета.

Для решения задачи выделим следующие риски, составляющие главную группу, состоящую из восьми сценариев (таблица 8).

1. Q_1 – влияние ошибок проектирования, включая ошибки проектно-сметной документации (ПСД), незавершенность рабочей документации (РД);

2. Q_2 – влияние строительных ошибок, определяющих качество строительно-монтажных работ, возможность производственных аварий и т.п.;

3. Q_3 – влияние ошибок инвестиционного менеджмента, определяющих сроки реализации проекта, возможность срывов контрактов и т.п.;

4. Q_4 – влияние неблагоприятных экономических колебаний, включая экономические санкции, резкие колебания валютного курса, изменение других рыночных показателей;

5. Q_5 – влияние нестабильного политического положения в стране, ухудшение социального фона (забастовки, экология и т.п.);

6. Q_6 – влияние катаклизмов (землетрясения, наводнения и т.п.);

7. Q_7 – влияние финансовых рисков.

В свою очередь, реализация рисков каждой группы зависит от реализации сценариев подгрупп рисков, входящих в указанные группы. Так, первую подгруппу рисков, учитывающих влияние ошибок проектирования, включая ошибки ПСД, незавершенность РД, составляют:

1.1. Q_{1-1} – риск неточного расчета окупаемости проекта;

1.2. Q_{2-1} – риск недооценки бюджета строительства;

1.3. Q_{3-1} – риск при выборе основной технологической схемы и основных технологических параметров;

1.4. Q_{4-1} – риск, вызванный ошибками разработки разделов «АР» и «КР»;

1.5. Q_{5-1} – риск, вызванный ошибками разработки заказных спецификаций и смет;

1.6. Q_{6-1} – риск, вызванный срывами сроков разработки РД;

1.7. Q_{7-1} – риск принятия предвзятых проектных решений;

1.8. Q_{8-1} – риск использования материалов, не имеющих аналогов;

1.9. Q_{9-1} – риск недооценки сроков строительства.

Сценарии для рисков первой подгруппы представлены в таблице 1.

Таблица 1

	Q_{1-1}	Q_{2-1}	Q_{3-1}	Q_{4-1}	Q_{5-1}	Q_{6-1}	Q_{7-1}	Q_{8-1}	Q_{9-1}
K_{1-1}	1	1	0	0	0	0	0	0	0
K_{2-1}	0	1	1	0	0	0	0	0	0
K_{3-1}	0	0	0	1	1	0	0	0	0
K_{4-1}	0	0	0	0	1	1	0	0	0
K_{5-1}	0	0	0	1	0	0	1	0	0
K_{6-1}	0	0	0	1	0	0	0	1	0
K_{7-1}	0	0	0	1	0	0	0	0	1

Так, первый сценарий состоит из риска неточного расчета окупаемости проекта и риска недооценки бюджета строительства. Второй – риска недооценки бюджета строительства и риска при выборе основной технологической схемы и основных технологических параметров. И т.д.

Таким образом, вероятность влияния ошибок проектирования, включая ошибки ПСД, незавершенность РД, Q_1 , определяется реализацией сценариев или K_{1-1} , или K_{2-1} , или K_{3-1} , или K_{4-1} , или K_{5-1} , или K_{6-1} , или K_{7-1} .

Вторую подгруппу рисков, учитывающих влияние строительных ошибок, определяющих качество СМР, возможность производственных аварий и т.п., составляют:

2.1. Q_{1-2} – риск неисполнения обязательств подрядными организациями и поставщиками оборудования;

2.2. Q_{2-2} – риск несоблюдения технологического регламента при производстве СМР;

2.3. Q_{3-2} – риск использования материалов, не соответствующих проектным решениям;

2.4. Q_{4-2} – риск увеличения сроков строительства по вине генподрядчика;

2.5. Q_{5-2} – риск недостижения технических показателей проекта;

2.6. Q_{6-2} – риск несвоевременного ввода объекта в эксплуатацию;

2.7. Q_{7-2} – риск неполучения пакета разрешительной документации.

Сценарии для рисков второй подгруппы представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Q_{1-2}	Q_{2-2}	Q_{3-2}	Q_{4-2}	Q_{5-2}	Q_{6-2}	Q_{7-2}
K_{1-2}	1	1	0	0	0	0	0
K_{2-2}	0	1	1	0	0	0	0
K_{3-2}	0	1	0	1	0	0	0
K_{4-2}	1	0	0	0	1	0	0
K_{5-2}	0	0	0	0	1	1	0
K_{6-2}	1	1	1	0	0	0	1

Третью подгруппу рисков, учитывающих влияние ошибок инвестиционного менеджмента, определяю-

щих сроки реализации проекта, возможность срывов контрактов и т.п., составляют:

3.1. Q_{1-3} – риск ошибки в правильности выбранной стратегии;

3.2. Q_{2-3} – риск ошибки прогнозирования;

3.3. Q_{3-3} – риск организационных ошибок;

3.4. Q_{4-3} – риски ошибок контроля и регулирования.

Сценарии для рисков третьей подгруппы представлены в таблице 3.

Таблица 3

	Q_{1-3}	Q_{2-3}	Q_{3-3}	Q_{4-3}
K_{1-3}	1	1	0	0
K_{2-3}	1	0	1	0
K_{3-3}	0	0	1	1

Четвертую подгруппу рисков, учитывающих влияние неблагоприятных экономических колебаний, включая экономические санкции, резкие колебания валютного курса, изменение других рыночных показателей, составляют:

4.1. Q_{1-4} – риск международных экономических санкций;

4.2. Q_{2-4} – риск, вызванный резкими колебания валютного курса;

4.3. Q_{3-4} – риск неправильной оценки конъюнктуры рынка: увеличение конкуренции и др.;

4.4. Q_{4-4} – риск неправильной оценки емкости рынка;

4.5. Q_{5-4} – риск неправильной оценки доли рынка.

Сценарии для рисков четвертой подгруппы представлены в таблице 4.

Таблица 4

	Q_{1-4}	Q_{2-4}	Q_{3-4}	Q_{4-4}	Q_{5-4}
K_{1-4}	1	0	0	0	0
K_{2-4}	0	1	0	0	0
K_{3-4}	0	0	1	0	0
K_{4-4}	0	0	0	1	0
K_{5-4}	0	0	0	0	1

Пятую подгруппу рисков, учитывающих влияние нестабильного политического положения в стране, ухудшение социального фона (забастовки, экология и т.п.), составляют:

5.1. Q_{1-5} – риск ухудшения социального фона;

5.2. Q_{2-5} – риск забастовок с политическими лозунгами;

5.3. Q_{3-5} – риск экологических протестов;

5.4. Q_{4-5} – риск демонстраций с политическими лозунгами.

Сценарии для рисков пятой подгруппы представлены в таблице 5.

Таблица 5

	Q_{1-5}	Q_{2-5}	Q_{3-5}	Q_{4-5}
K_{1-5}	1	1	0	0
K_{2-5}	1	0	1	0
K_{3-5}	1	0	0	1

Шестую подгруппу рисков, учитывающих влияние катаклизмов (землетрясения, наводнения и т.п.), составляют:

6.1. Q_{1-6} – риск землетрясения выше расчетного;

6.2. Q_{2-6} – риск недостаточности конструктивных мероприятий при землетрясении не выше расчетного;

6.3. Q_{3-6} – риск наводнений;

6.4. Q_{4-6} – риск оползней, вызванных фоновыми землетрясениями или наводнениями.

Сценарии для рисков шестой подгруппы представлены в таблице 6.

Таблица 6

	Q_{1-6}	Q_{2-6}	Q_{3-6}	Q_{4-6}
K_{1-6}	1	1	0	0
K_{2-6}	1	0	1	0
K_{3-6}	1	0	0	1

Седьмую подгруппу рисков, учитывающих влияние финансовых рисков, составляют:

7.1. Q_{1-7} – риск невозможности получения банковского кредита;

7.2. Q_{2-7} – риск изменения ставки по банковскому кредиту;

7.3. Q_{3-7} – риск нехватки собственных оборотных средств у компании инвестора;

7.4. Q_{4-7} – риск финансовых потерь в результате изменения курса валют, которое может произойти в период между заключением контракта и фактическим проведением расчетов по нему;

7.5. Q_{5-7} – инфляционный риск означает возможность обесценения реальной стоимости капитала (в форме финансовых активов предприятия), а также ожидаемых доходов от осуществления финансовых операций в условиях инфляции;

7.6. Q_{6-7} – налоговый риск характеризуется: вероятностью введения новых видов налогов и сборов на осуществление отдельных аспектов хозяйственной деятельности, возможностью увеличения уровня ставок действующих налогов и сборов, изменением сроков и условий осуществления отдельных налогов, вероятностью отмены действующих налоговых льгот в сфере хозяйственной деятельности предприятия;

7.7. Q_{7-7} – структурный риск определяется неэффективным финансированием текущих затрат предприятия,

что вызывает высокий удельный вес постоянных издержек в общей их сумме.

Сценарии для рисков седьмой подгруппы представлены в таблице 7.

Таблица 7

	Q_{1-7}	Q_{2-7}	Q_{3-7}	Q_{4-7}	Q_{5-7}	Q_{6-7}	Q_{7-7}
K_{1-7}	1	1	0	0	0	0	0
K_{2-7}	0	1	1	0	0	0	0
K_{3-7}	0	0	1	1	0	0	0
K_{4-7}	0	0	0	1	1	0	0
K_{5-7}	0	0	0	0	1	1	0
K_{6-7}	0	0	0	0	0	1	1

В таблицах 1-7 обозначено: Q_i – вероятность наступления i -го риска; K_i – сценарии из логических конъюнкций.

Убытки компании («неудача» инвестирования) связаны с реализацией сценариев рисков, представленных в таблице 8: или (Q_1 и Q_3), или (Q_1 и Q_6), или (Q_2 и Q_3), или (Q_2 и Q_5 , и Q_6), или (Q_1 и Q_3 , и Q_4), или (Q_1 и Q_3 , и Q_5), или (Q_3 и Q_4 , и Q_5 , и Q_6), или (Q_7).

Таблица 8

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
K_1	1	0	1	0	0	0	0
K_2	1	0	0	0	0	1	0
K_3	0	1	1	0	0	0	0
K_4	0	1	0	0	1	1	0
K_5	1	0	1	1	0	0	0
K_6	1	0	1	0	1	0	0
K_7	0	0	1	1	1	1	0
K_8	0	0	0	0	0	0	1

Исходными данными для $Q_i, i = 1, \dots, 7$ являются вероятности, определенные с использованием сценариев таблиц 1-7.

В таблице 9 для рассматриваемого примера приведены исходные данные. Риски Q_{i-j} (вероятности реализаций i рисков j -й группы) в рассматриваемом примере получены путем экспертных оценок. При достаточности статистических данных вероятности Q_{i-j} следует определять по фактическим распределениям.

В таблице 9 обозначено: Q_i – вероятность реализации i -го риска; R_i – наоборот, вероятность нереализации i -го риска, то есть $R_{i-j} = 1 - Q_{i-j}$.

Запишем вероятность успешной реализации инвестиционного проекта:

$$R_c = 1 - Q_c, \quad (1)$$

где

$$Q_c = \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \\ K_7 \\ K_8 \end{matrix} = \begin{matrix} Q_1 Q_3 \\ Q_1 Q_6 \\ Q_2 Q_3 \\ Q_2 Q_5 Q_6 \\ Q_1 Q_3 Q_4 \\ Q_1 Q_3 Q_5 \\ Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 \\ Q_7 \end{matrix}. \quad (1')$$

Таким образом, каждый сценарий представляет собой многокритериальную величину. Для решения задачи учета всех рисков следует описать реализации возможных «неудачных» сценариев, то есть, необходимо уяснить, каким образом может возникнуть ущерб. В таблице 8 приведено описание сценариев модели (1').

Для решения задачи (1) на ЭВМ была разработана математическая модель. Вероятность успешной реализации проекта с учетом указанных выше вероятностей составила 0,93742. Следовательно, вероятность «неудачи» или убытков составляет 6,258%. Математическая модель позволяет определить «вес» (2), а также «значимость» (3) и «вклад» (4) каждого риска в успех инвестиционного проекта. Результаты расчетов представлены в таблице 10.

$$g_{Q_i} = \frac{G\{\Delta_{Q_i, y}(Q_1, \dots, Q_n)\}}{2^n} = \sum_{j=1}^l 2^{-(r_j-1)} - \sum_{j=1}^k 2^{-(r_j-1)}, \quad (2)$$

где $f = 1, \dots, k; j = 1, \dots, l; r_j, r_{j-}$ – ранги элементарных конъюнкций; k, l – число конъюнкций, содержащих Q_i^f, Q_i ($Q_i^f = R_i$) и не содержащих i -й аргумент; n – число независимых переменных исходной функции.

«Вес» булевой разности (2) характеризует важность риска Q_i для надежности инвестиций. «Вес» элемента характеризует также относительное число таких критических состояний, в которых отказ определенного сценария приводит к отказу всей модели (и, наоборот, его восстановление приводит к восстановлению), среди всех состояний модели с $Q_i = 1$. Критерий «вес» риска g_{Q_i} характеризует местоположение данного риска Q_i в модели (системы) $y(Q_1, \dots, Q_n)$.

«Значимость» риска Q_i есть частная производная математической модели $Q_c(1')$ по вероятности риска Q_i , то есть

$$\zeta_{Q_i} = \frac{\partial P\{y(Q_1, \dots, Q_n) = 1\}}{\partial P\{Q_i = 1\}} = \frac{\partial Q_c}{\partial Q_i}. \quad (3)$$

Критерий «значимость» характеризует скорость изменения надежности инвестиций. «Значимость» есть условная вероятность при условии реализации риска Q_i . Кроме того, критерий «значимость» позволяет определять риски, обеспечивающие максимальное приращение надежности выбранной модели.

Таблица 9

R_{1-1}	R_{2-1}	R_{3-1}	R_{4-1}	R_{5-1}	R_{6-1}	R_{7-1}	R_{8-1}	R_{9-1}
0,850	0,850	0,850	0,800	0,750	0,250	0,900	0,900	0,750
Q_{1-1}	Q_{2-1}	Q_{3-1}	Q_{4-1}	Q_{5-1}	Q_{6-1}	Q_{7-1}	Q_{8-1}	Q_{9-1}
0,150	0,150	0,150	0,200	0,250	0,750	0,100	0,100	0,250
R_{1-2}	R_{2-2}	R_{3-2}	R_{4-2}	R_{5-2}	R_{6-2}	R_{7-2}	-	-
0,900	0,900	0,900	0,850	0,850	0,850	0,990	-	-
Q_{1-2}	Q_{2-2}	Q_{3-2}	Q_{4-2}	Q_{5-2}	Q_{6-2}	Q_{7-2}	-	-
0,100	0,100	0,100	0,150	0,150	0,150	0,010	-	-
R_{1-3}	R_{2-3}	R_{3-3}	R_{4-3}	-	-	-	-	-
0,950	0,900	0,900	0,800	-	-	-	-	-
Q_{1-3}	Q_{2-3}	Q_{3-3}	Q_{4-3}	-	-	-	-	-
0,050	0,100	0,100	0,200	-	-	-	-	-
R_{1-4}	R_{2-4}	R_{3-4}	R_{4-4}	R_{5-4}	-	-	-	-
0,850	0,850	0,950	0,950	0,850	-	-	-	-
Q_{1-4}	Q_{2-4}	Q_{3-4}	Q_{4-4}	Q_{5-4}	-	-	-	-
0,150	0,150	0,050	0,050	0,150	-	-	-	-
R_{1-5}	R_{2-5}	R_{3-5}	R_{4-5}	-	-	-	-	-
0,650	0,750	0,950	0,800	-	-	-	-	-
Q_{1-5}	Q_{2-5}	Q_{3-5}	Q_{4-5}	-	-	-	-	-
0,350	0,250	0,050	0,200	-	-	-	-	-
R_{1-6}	R_{2-6}	R_{3-6}	R_{4-6}	-	-	-	-	-
0,950	0,950	0,990	0,850	-	-	-	-	-
Q_{1-6}	Q_{2-6}	Q_{3-6}	Q_{4-6}	-	-	-	-	-
0,050	0,050	0,010	0,150	-	-	-	-	-
R_{1-2}	R_{2-2}	R_{3-2}	R_{4-2}	R_{5-2}	R_{6-2}	R_{7-2}	-	-
0,950	0,977	0,990	0,750	0,850	0,950	0,900	-	-
Q_{1-2}	Q_{2-2}	Q_{3-2}	Q_{4-2}	Q_{5-2}	Q_{6-2}	Q_{7-2}	-	-
0,050	0,023	0,010	0,250	0,150	0,050	0,100	-	-

«Вклад» элемента Q_i в системе (сценариях рисков) y (Q_1, \dots, Q_n) есть произведение риска Q_i на его «значимость», то есть

$$B_{x_i} = Q_i \frac{\partial Q_c}{\partial Q_i} = Q_i \frac{Q_c - Q_{c0}^{(i)}}{Q_i} = Q_c - Q_{c0}^{(i)}. \quad (4)$$

Критерий «вклад» характеризует приращение надежности после восстановления сценария с риском Q_i .

Понятие «удельного вклада» более универсальная характеристика, чем просто «вклад». «Удельный вклад» риска Q_i в системе (сценарии) y (Q_1, \dots, Q_n) есть нормированный «вклад» этого риска, то есть

$$b_{Q_i} = B_{Q_i} / \sum_{i=1}^n B_{Q_i}. \quad (5)$$

Результаты расчетов в виде дифференциальных характеристик рисков $g_{Q_i}, \xi_{Q_i}, b_{Q_i}$, представленных в табл.

Таблица 10

g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
0,203	0,141	0,234	0,016	0,047	0,172	0,453
ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6	ξ_7
0,03445	0,02019	0,31606	0,00003	0,00050	0,27474	0,98754
B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
0,00998	0,00130	0,00901	0,00001	0,00008	0,00276	0,05011
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
0,136	0,018	0,123	0,000	0,001	0,038	0,684

це 10, позволяют наглядно увидеть распределение роли всех главных рисков на заданной структуре надежности при решении самых разнообразных задач.

В таблице 11 приведены относительные значения параметров риска $p_i (i = 1, \dots, 7)$, которые получали:

$$p_i = p_i / p_{max} \quad (6)$$

Таблица 11

g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
0,45	0,31	0,52	0,03	0,10	0,38	1,00
ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6	ξ_7
0,03	0,02	0,32	0,00	0,00	0,28	1,00
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
0,20	0,03	0,18	0,00	0,00	0,05	1,00

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие *выводы*.

Вероятность успешной реализации проекта (надежность) при сценариях, указанных в таблице 8, составила 93,7%. Следовательно, вероятность «неудачи» составляет 6,3%.

Наиболее важными, значимыми и имеющие наибольший вклад в инвестиционных рисках являются Q_2 и Q_3 соответственно - влияние финансовых и управленческих рисков.

На вероятность реализации рассматриваемого инвестиционного проекта *наименьшее* влияние оказывают Q_4 – влияние неблагоприятных экономических колебаний и Q_5 – влияние нестабильного политического положения в стране.

Библиографический список

1. Долганов А.И. Надежность стержневых железобетонных конструкций [Текст] / А.И. Долганов. – Магадан: ОАО «МАОБТИ», 2001. – 209 с.
2. Долганов А.И. Оптимизация мостовых железобетонных балок по критерию надежности [Текст] / А.И. Долганов // Проблемы оптимального проектиро-

вания сооружений: Сб. докладов II Всероссийского семинара: Новосибирск: НГАСУ, 1998.

3. Долганов А.И. Проблемы оптимального проектирования сооружений [Текст] / А.И. Долганов, Э.Р. Даниелов // Сб. докладов III-го Всерос. семинара: В 2-х томах. – Новосибирск: НГАСУ, 2000. – Т. 1.

4. Долганов А.И. Оптимизация железобетонных конструкций с учетом критериев надежности и минимальной стоимости [Текст] / А.И. Долганов. – Магадан: Изд-во Северного международного университета, 2002. – 164 с.

5. Долганов А.И. Оценка надежности монолитных многоэтажных зданий [Текст] / А.И. Долганов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №8. – С. 50-51.

6. Долганов А.И. О надежности сооружений массового строительства [Текст] / А.И. Долганов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №11. – С. 66-68.

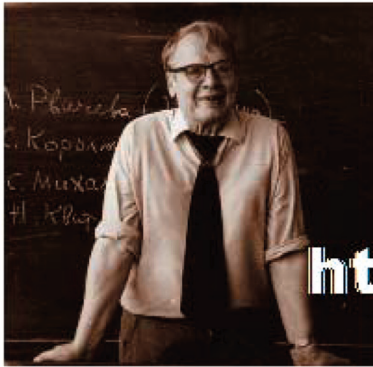
7. Долганов А.И. Об обеспеченности ледовой нагрузки в Финском заливе [Текст] / А.И. Долганов // Материалы 9-й Международной научно-практической конференции: Научный Совет РАН, Федеральное агентство научных организаций, МЧС России, Российский фонд фундаментальных исследований. – М.: Российский университет дружбы народов, 2015. – Т. 2, с. 100-106.

8. Долганов А.И. О назначении уровня надежности [Текст] / А.И. Долганов, А.В. Сахаров // Надежность. – 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 18-21.

Сведения об авторе

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

Поступила: 17.01.2019



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

Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» (“Reliability: Theory & Applications”).

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.



Вступайте в Форум
Гнеденко!

Добро

пожаловать!

В наших рядах уже более

500 специалистов

из **44** стран мира.

Для вступления в
Форум присылайте
фото и краткое резюме
по адресу:

к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

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

