

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

Шебе Хендрик – доктор физико-математических наук, главный эксперт по надежности, эксплуатационной готовности, 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 ОАО «НИИАС» (Москва, Россия)

Технический редактор:

Новожилов Евгений Олегович – кандидат технических наук, начальник отдела системного анализа Отделения управления рисками сложных технических систем ОАО «НИИАС» (Москва, Россия)

Председатель редакционного совета:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, Генеральный директор ОАО «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 проблем безопасности (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

Бочков Константин Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе УО «Белорусский государственный университет транспорта» (Гомель, Белоруссия)

Гапанович Валентин Александрович – кандидат технических наук, старший вице-президент ОАО «РЖД», главный инженер (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 (Санкт-Петербург, Россия)

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

Лецкий Эдуард Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (Москва, Россия)

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

Папик Любича Р. – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надёжностью (DQM), (Приевор, Сербия)

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

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

Язов Юрий Константинович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального автономного учреждения «Государственный научно-исследовательский испытательный институт Федеральной службы по техническому и экспортному контролю» (Воронеж, 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»
Директор

Калинина И.В.
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 08.07.2016
Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60x90/8, Бумага глянец

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

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ» (ОАО «НИИАС») И ООО «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ТЕХНОЛОГИИ»

СОДЕРЖАНИЕ

Структурная надежность. Теория и практика

Антонов А.В., Чепурко В.А., Чеховин В.Е., Украинцев В.Ф. К вопросу планирования объема испытаний образцов новой техники	3
Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н, Трахтомиров А.В. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем	8
Волков А.Н. Модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения	18
Володарский В.А., Орленко А.И. К вопросу оптимизации технического содержания контактной сети	23

Живучесть. Теория и практика

Черкесов Г.Н., Недосекин А.А. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности (часть 2)	26
Зарубский В.Г. Особенности организации процесса функционального диагностирования управляющего компьютера повышенной живучести.....	35

Функциональная безопасность. Теория и практика

Шубинский И.Б, Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кан Ю.С., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Оценка рисков, связанных с проездом запрещающего сигнала светофора маневровым составом или пассажирским поездом	39
--	----

Функциональная надежность. Теория и практика

Похабов Ю.П., Валишевский О.К. Генезис надежности уникальных высокоответственных систем	47
--	----

Стандартизация

Нетес В.А. Новый международный терминологический стандарт по надежности.....	54
---	----

Сообщения

Польянов В.В., Митрохин В.Е. Имитационная модель электромагнитной совместимости смежных сооружений инфраструктуры на участках тяжеловесного движения поездов	59
Некролог	63
Гнеденко форум.....	64

Информация по книгам И.Б.Шубинского:

- «Структурная надежность информационных систем». Методы анализа.....	66
- «Функциональная надежность информационных систем». Методы анализа.....	66
- «Надежные отказоустойчивые информационные системы». Методы синтеза.....	67

К вопросу планирования объема испытаний образцов новой техники

Александр В. Антонов, кафедра автоматизированных систем, Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Обнинск, Россия, e-mail: antonov@iate.obninsk.ru

Валерий А. Чепурко, кафедра автоматизированных систем, Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ), Обнинск, Россия, e-mail: chepurko@iate.obninsk.ru

Владимир Е. Чехович, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), Обнинск, Россия, e-mail: 89158916216@rambler.ru

Владимир Ф. Украинцев, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), Обнинск, Россия, e-mail: ukraintsev@mail.ru



Александр В.
Антонов



Валерий А.
Чепурко



Владимир Е.
Чехович



Владимир Ф.
Украинцев

Резюме. Цель. В статье рассматриваются вопросы планирования объема испытаний высоконадежных объектов. В процессе разработки и изготовления новых образцов техники возникает задача определения их характеристик надежности. Это обусловлено тем, что существуют требования о необходимости представления указанных характеристик в паспортах и технических описаниях на поставляемую на рынок продукцию. Наиболее объективным способом определения характеристик надежности изделий является проведение натурных испытаний. Но при изготовлении сложных, дорогостоящих объектов нет возможности поставить на испытания партию готовой продукции большого объема. Таким образом, возникает задача определения времени проведения натурных испытаний и объема изделий, подлежащих испытаниям, при условии задания требований к точности получаемых в результате испытаний оценок характеристик надежности объектов. Планирование объема осуществляется на основании требований изготовителя о необходимости подтвердить значение нижней оценки вероятности безотказной работы с заданной доверительной вероятностью. В работе решаются две задачи. Первая задача исследования состоит в определении объема испытаний партии готовой продукции N_0 для момента времени t_0 , для которого выполнялось бы требование заказчика о достижении значения нижней доверительной границы вероятности безотказной работы, заданной с доверительной вероятностью $1 - \alpha$. Данная задача решена с помощью непараметрического подхода. Вторая задача состоит в определении необходимого объема испытаний N_{t1} оборудования данного типа для момента времени, отличного от момента первоначальных исследований $t_1 \neq t_0$. При этом решается вопрос: как соотносятся N_{t0} и N_{t1} ? Объем испытаний N_{t1} определяется на основе задания доверительных границ, обеспечивающих ту же точность показателей, что и в точке t_0 . Данная задача решается с помощью непараметрического подхода. При решении второй задачи используется параметризация распределения наработки до отказа. Исследуется три распределения наработки: экспоненциальный закон распределения, распределение Вейбулла и распределение с линейной функцией интенсивности. Рассмотренные виды законов распределения позволяют исследовать поведение объектов, имеющих убывающую, постоянную и возрастающую функцию интенсивности отказов. **Методы.** В работе получены формулы расчета объема испытаний для разных длительностей проведения эксперимента. Исследован вопрос зависимости объема от длительности эксперимента и от реального уровня вероятности безотказной работы. Планирование объема и соответствующие исследования проведены для различных моделей поведения интенсивности отказов изделия. **Выводы.** Полученные результаты, позволяют обоснованно подходить к планированию объема испытаний высоконадежных объектов. Результаты исследования показали, что чем больше длительность эксперимента, тем меньше изделий требуется поставить на испытания. Зависимость нелинейная, обусловлена параметризацией функции интенсивности отказа. Аналогичная зависимость получилась и для вероятности безотказной работы: чем выше вероятность безотказной работы изделия, тем меньше объектов требуется испытывать.

Ключевые слова: планирование объема испытаний, длительность эксперимента, вероятность безотказной работы, интенсивность отказа, нижняя оценка вероятности безотказной работы, уровень доверительной вероятности.

Формат цитирования: Антонов А.В., Чепурко В.А., Чехович В.Е., Украинцев В.Ф. К вопросу планирования объема испытаний образцов новой техники // Надежность. 2016. №3. С. 3-7. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-3-7

Введение

В процессе разработки и изготовления новых образцов техники возникает задача определения их характеристик надежности. Это обусловлено тем, что существуют требования о необходимости предоставления данных характеристик в паспортах и технических описаниях на поставляемую на рынок продукцию. Наиболее объективным способом определения характеристик надежности изделий является проведение натурных испытаний. Но следует отметить, что при изготовлении сложных, дорогостоящих объектов нет возможности поставить на испытания партию готовой продукции большого объема. Таким образом, возникает задача определения времени проведения натурных испытаний и объема изделий, подлежащих испытаниям, при условии задания требований к точности получаемых в результате испытаний оценок характеристик надежности объектов.

Прежде, чем приступить к постановке задачи, необходимо рассмотреть поведение показателей, на основании которых будет осуществляться постановка. В качестве определяемого показателя будем рассматривать вероятность безотказной работы (ВБР) – $P(t)$. Точность непараметрической оценки данного показателя характеризуется дисперсией, которая вычисляется по формуле:

$$D(\hat{P}(T)) = \frac{P(t)(1-P(t))}{N},$$

где N – объем испытаний, в ходе которых оценивается показатель ВБР. Таким образом, получаем, что величина дисперсии зависит от объема испытаний и значения ВБР. Чем выше значение ВБР, тем меньше дисперсия. Максимальное значение дисперсия имеет при уровне ВБР равном 0,5. Далее, если оценка меньше 0,5, дисперсия опять начинает уменьшаться.

Дисперсия оценки показателя ВБР связана с другой характеристикой точности – нижней доверительной оценкой ВБР, рассчитываемой с заданной доверительной вероятностью $1 - \alpha$. Поскольку стоит задача оценки характеристик надежности объектов, подразумевается, что у исследователя нет априорной информации о данных показателях. Изготовитель продукции ожидает, что поставляемое на рынок оборудование должно быть высоконадежным. Он ставит задачу перед исследователями о назначении времени проведения испытаний и объема испытаний, проведение которых позволит гарантировать некий уровень надежности оборудования. Постановку задачи можно осуществить из следующих соображений. Изготовитель формулирует некоторые требования к нижней доверительной оценке ВБР (P_0), которую необходимо обеспечить с заданной доверительной вероятностью $1 - \alpha$, т.е.

$$\Pr(P(t_0) \geq P_0) = 1 - \alpha.$$

Данное значение будет являться нижним критическим значением. Первоначальное значение нижней

доверительной границы ВБР оценивается методами расчета структурной надежности [1,2]. Будем определять необходимое количество объектов N_0 , подлежащих испытаниям, основываясь на этом значении нижней доверительной оценки ВБР. Полученный в ходе решения задачи требуемый объем испытаний N_0 будет гарантировать достижение заданных границ ВБР – $[P_0, 1]$ с доверительной вероятностью $1 - \alpha$.

Если в процессе испытаний окажется, что надежность объекта выше, чем предполагал заказчик – $P_0^* \geq P_0$, то отсюда следует, что на основании заданного объема N_0 оцениваемый показатель надежности получен с более высокой точностью – P_0^* . В этом случае для достижения результата с заданной точностью P_0 , требуется меньшее количество испытаний N_0^* .

Постановка задачи

Таким образом, после ознакомления с данными рассуждениями можно поставить первую задачу исследования. Определить объем испытаний партии готовой продукции N_0 такой, что для любого значения $P_0^* \geq P_0$, заданного с доверительной вероятностью $1 - \alpha$, будет выполняться соотношение для требуемого объема испытаний $N_0^* \leq N_0$.

При решении задачи будем предполагать, что функция интенсивности отказов задается одной из формул [1]:

$$\lambda(t) = \lambda; \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \lambda_1 + \lambda_2 t; \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \lambda_1 t^{\lambda_2}. \quad (3)$$

Выражение (1) (интенсивность постоянна) характерно для экспоненциального распределения наработки до отказа, формула (2) – для функции распределения с линейной интенсивностью отказов и функция (3) – для закона распределения Вейбулла.

Для упрощения расчетов приведем рассматриваемую модель к виду:

$$\lambda(t) = \lambda g(t), \quad (4)$$

где $g(t)=1$ соответствует экспоненциальному распределению,

$$g(t)=a+bt \text{ – распределению с линейной функцией интенсивности отказов,} \quad (5)$$

$$g(t)=t^a \text{ – распределению Вейбулла.} \quad (6)$$

Функция интенсивности $g(t)$ должна удовлетворять двум основным требованиям:

$$g(t) \geq 0,$$

$$G(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau \rightarrow \infty \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

При этом будем предполагать, что коэффициенты a , b в (5), (6) известны, неизвестным и оцениваемым по выборке является параметр λ .

Планирование объема испытаний в непараметрической постановке

Перейдем теперь к решению задачи. Решим задачу в непараметрической постановке. Известно [5], что для любого t число неотказавших до момента времени t изделий распределено согласно биномиальному закону

$$N\hat{P}(t) = \mu_N(t) \sim \text{Bin}(N, P(t)(1 - P(t)))$$

$$\Pr(\hat{P}(t) \geq \underline{P}) = \sum_{i=k}^N C_N^i P^i(t) (1 - P(t))^{N-i} = I_{P(t)}(k, N - k + 1),$$

где $I_x(a, b)$ – неполная бета-функция, $k = \lceil N\underline{P} \rceil$ – округленное к большему выражение $N\underline{P}$. Найти точное аналитическое решение уравнения

$$I_{P(t)}(k, N - k + 1) = 1 - \alpha$$

невозможно, поскольку оно содержит две неизвестных величины N и $P(t)$. Рассмотрим приближенные способы решения задачи.

Если воспользоваться центральной предельной теоремой, то для оценки ВБР получим в пределе нормальный закон:

$$\hat{P}(t) \sim \text{Norm}\left(P(t); \frac{P(t)(1 - P(t))}{N}\right). \quad (7)$$

Это позволяет построить одностороннее доверительное множество:

$$\Pr(\hat{P}(t) \geq \underline{P}) = 1 - \Phi\left(\frac{\underline{P} - P(t)}{\sqrt{P(t)(1 - P(t))}} \sqrt{N}\right) = \alpha,$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-u^2/2) du$ – функция распределения стандартного нормального закона – $\text{Norm}(0; 1)$.

Отсюда оценка необходимого количества испытаний, которая гарантировала бы выполнение заданных требований, определяется по формуле

$$N_{t_0} = \frac{P_0 \cdot (1 - P_0) \cdot u_{1-\alpha}^2}{(\underline{P}_0 - P_0)^2}, \quad (8)$$

где $u_{1-\alpha}$ – квантиль стандартного нормального распределения $\text{Norm}(0; 1)$ уровня $1 - \alpha$.

В выражении (8) неопределенной является величина P_0 . Оценим ее из следующих соображений. Ранее было отмечено, что распределение ВБР можно аппроксимировать нормальным законом (7). Следовательно, в качестве приближенной оценки для P_0 можно предложить точку, находящуюся в середине интервала $[\underline{P}_0, 1]$. Таким образом

$$P_0 = (1 + \underline{P}_0)/2.$$

И, окончательно, можно записать

$$N_{t_0} = \frac{(1 - \underline{P}_0)(1 + \underline{P}_0) u_{1-\alpha}^2}{(1 - \underline{P}_0)^2} = \frac{(1 + \underline{P}_0) u_{1-\alpha}^2}{1 - \underline{P}_0}.$$

Поскольку при планировании объема испытаний значение ВБР в точке t_0 неизвестно, проведем исследования зависимости требуемого объема изделий, подлежащих испытаниям, от значения P_0 . При проведении расчетов принимались следующие значения параметров моделей: $\underline{P}_0 = 0,93$; $\alpha_0 = 0,1$; $t_0 = 360$; $t = 540$; $k = 0,004$. Расчеты проводились для линейной модели интенсивности (2). График изменения требуемого объема наблюдений в зависимости от оценки ВБР приведен на рисунке 1. На основании результатов, изображенных на графике, можно сделать следующий вывод: чем выше надежность изделия, тем меньше изделий требуется поставить на испытания для подтверждения значения ВБР. Причем зависимость имеет ярко выраженный нелинейный характер.

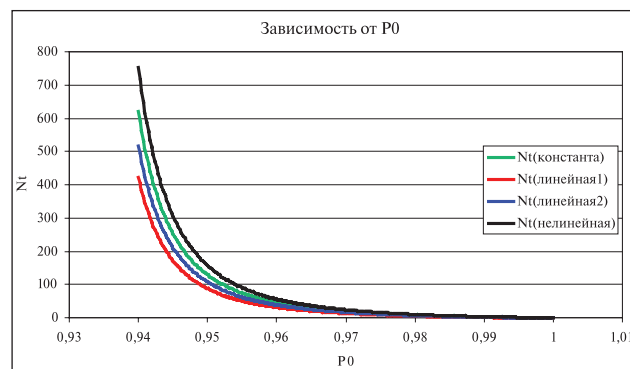


Рис. 1. Зависимости объема испытаний от P_0 .

Семипараметрический метод планирования объема испытаний в точке $t_1 \neq t_0$

Решим теперь другую задачу. Определим необходимый объем испытаний оборудования данного типа для другого момента времени $t_1 \neq t_0$. Обозначим требуемый объем испытаний N_{t_1} . При этом ответим на вопрос: как соотносятся N_{t_0} и N_{t_1} ? Объем испытаний N_{t_1} будем определять на основе задания доверительных границ, обеспечивающих ту же точность показателей, что и в точке t_0 .

Оценка числа N_t испытаний в произвольный момент времени t определяется по формуле, аналогичной (8)

$$N_t = \frac{P(t) \cdot (1 - P(t)) \cdot u_{1-\alpha}^2}{(\underline{P}(t) - P(t))^2}. \quad (9)$$

Заметим, что в (9) значение величины $\underline{P}(t)$ и $P(t)$ неизвестны. Определим их. Воспользуемся тем, что $\underline{P}(t)$

должна принадлежать той же кривой нижней границы ВБР, оцениваемой согласно модели (4):

$$\underline{P}_0 = \exp(-\bar{\lambda} \cdot G(t_0)) \text{ и } \underline{P}(t) = \exp(-\bar{\lambda} \cdot G(t)).$$

Прологарифмировав оба уравнения, избавляясь от $\bar{\lambda}$, получаем соотношение для нижних доверительных границ ВБР:

$$\frac{\ln P_0}{\ln P(t)} = \frac{G(t_0)}{G(t)} \text{ или } \underline{P}(t) = \underline{P}_0^{G(t)/G(t_0)}.$$

Точно такое же соотношение будем иметь для оценок ВБР

$$P(t) = P_0^{G(t)/G(t_0)}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (9) и поделив на (8) получим:

$$\frac{N_t}{N_{t_0}} = \frac{P_0^{G(t)/G(t_0)} \cdot \left(1 - P_0^{G(t)/G(t_0)}\right)}{P_0 \cdot (1 - P_0)} \cdot \left(\frac{P_0 - P_0}{P_0^{G(t)/G(t_0)} - P_0^{G(t)/G(t_0)}} \right)^2,$$

откуда получаем оценку для требуемого объема испытаний в произвольный момент времени t :

$$N_t = \frac{P_0^{G(t)/G(t_0)} \cdot \left(1 - P_0^{G(t)/G(t_0)}\right) \cdot u_{1-\alpha}^2}{\left(\frac{P_0^{G(t)/G(t_0)} - P_0^{G(t)/G(t_0)}}{P_0} \right)^2}. \quad (11)$$

Если $\lambda G(t)$ мало, то из (11) будем иметь

$$N_t = \frac{\lambda \cdot u_{1-\alpha}^2}{(\lambda - \bar{\lambda})^2} \cdot \frac{1}{G(t)} + o(\lambda G(t)).$$

Поскольку $\lambda = -\frac{\ln P_0}{G(t_0)}$ и $\bar{\lambda} = -\frac{\ln \underline{P}_0}{G(t_0)}$, то асимптотически получаем результат

$$N_t = \left[\left(\frac{\ln P_0}{\ln P_0 - \ln \underline{P}_0} \right)^2 \frac{u_{1-\alpha}^2}{1 - P_0} \right] \cdot \frac{G(t_0)}{G(t)}.$$

Данную формулу можно привести к виду

$$\frac{N_{t_1}}{N_{t_0}} = \frac{G(t_0)}{G(t_1)} \text{ или } N_t \cdot G(t) = \text{const}.$$

Проведем исследования полученных результатов. Выполним расчет необходимого объема испытаний

в зависимости от длительности проведения эксперимента.

На рисунке 2 изображено изменение объема испытаний в зависимости от длительности эксперимента в относительной шкале времени t/t_0 . Входные параметры модели в ходе расчетов принимались на уровне: $P_0=0,999$; $\underline{P}_0=0,97$; $\alpha_0 = 0,1$; $t_0=360$.

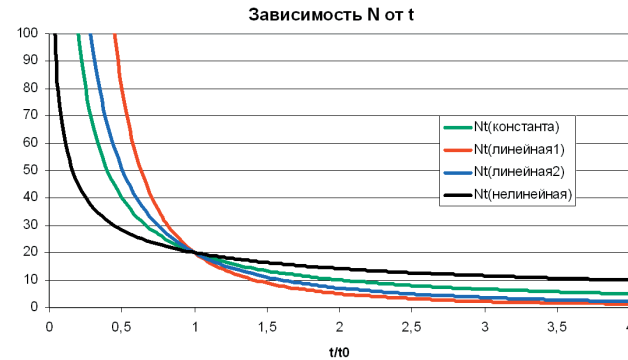


Рис. 2. Зависимость объема испытаний от длительности эксперимента

Зеленый график соответствует случаю $g(t)=1$ или $\lambda(t)=\lambda$ (интенсивность константа). Красная линия $g(t)=t$ или $\lambda(t)=\lambda t$ (интенсивность линейно возрастает). Синий график $g(t)=1+kt$ или $\lambda(t)=\lambda(1+kt)$ (интенсивность линейно возрастает от точки $(0, \lambda)$), при этом $k = 0,004$. При увеличении углового коэффициента k зависимость объема наблюдений быстро сходится к графику для линейной интенсивности отказов. Черный график соответствует случаю $g(t) = 1/\sqrt{t}$ (интенсивность убывает согласно закону $\lambda(t) = \lambda/\sqrt{t}$). Результаты, изображенные на рисунке 2, можно проиллюстрировать расчетами. Рассмотрим экспоненциальный закон распределения наработки до отказа ($G(t)=t$). Для этой модели, если при $t_0=20$ час нам необходимо провести $N_{t_0}=100$ испытаний, то для $t_1=200$ час получим объем испытаний $N_{t_1} = N_{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_1} = 100 \cdot \frac{20}{200} = 10$. Для линейно возрастающей интенсивности отказов $\lambda(t)=\lambda t$, соответственно $G(t)=t^2$ будем иметь результат: если для $t_0=20$ час нам будет необходимо $N_{t_0}=100$ испытаний, то для $t_1=200$ час количество испытаний

$$N_{t_1} = N_{t_0} \cdot \frac{t_0^2}{t_1^2} = 100 \cdot \frac{20^2}{200^2} = 1.$$

Исследования, выполненные для параметрической модели линейной функции интенсивности показали, что увеличение вероятности P_0 в точке t_0 при остальных неизменных входных параметрах модели приводит к значительному снижению необходимого объема испытаний N_t (см. рисунок 3). При расчетах входные параметры принимали значения: $P_0=0,99$; $\alpha_0 = 0,1$; $t_0=360$; $k=0,004$. В результате проведенных расчетов подтвержден ранее полученный результат: чем надежнее изделие, тем меньше требуется объектов N_p , которые ставят на испытания.

Заключение

Получены результаты, позволяющие обоснованно подходить к планированию объема испытаний высоконадежных объектов. В качестве исходной информации используется информация, предоставляемая изготовителем, о необходимости подтвердить нижнюю границу вероятности безотказной работы изделия с заданной доверительной вероятностью. Полученные в статье формулы позволили провести исследования зависимости объема испытаний от длительности эксперимента и вероятности безотказной работы изделия. Результаты исследования показали, что чем больше длительность эксперимента, тем меньше изделий требуется поставить на испытания. Причем эта зависимость нелинейная, обусловлена параметризацией функции интенсивности отказа. Аналогичная зависимость получилась и для вероятности безотказной работы: чем выше ВБР изделия, тем меньше объектов требуется испытывать.

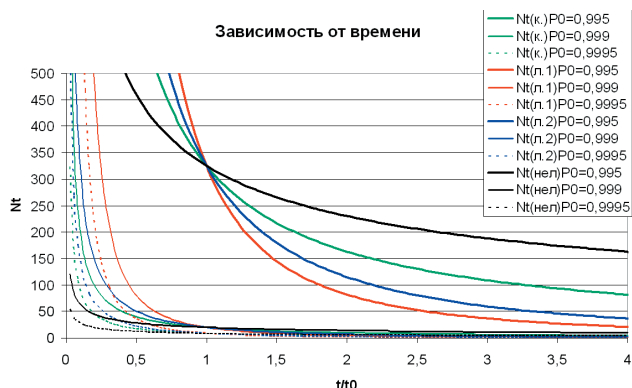


Рис. 3. Зависимость объема испытаний от времени при различных P_0

Библиографический список

1. Антонов А.В. Теория надежности. Статистические модели: Учеб. пособие/ Антонов А.В., Никулин М.С., Никулин А.М., Чепурко В.А. — М.: ИНФРА-М, 2015. — 576 с.
2. Антонов А.В. Статистические модели в теории надежности: Учеб. пособие/ Антонов А.В., Никулин М.С. — М.: Абрис, 2012. — 390 с.
3. Надежность технических систем: Справочник. Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с, ил.
4. Определительные испытания на надежность. Ю.Г. Заренин, И.И. Стоянова. — М.: Изд-во Стандартов, 1978. — 168 с.
5. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Мир, 1975. — 648 с.
6. Антонов А.В. Системный анализ: Учебник для вузов. — М.: Высш. шк., 2008. — 454 с.

Сведения об авторах

Александр В. Антонов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированные системы управления, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.

Россия, 249020, Калужская обл., Обнинск, Студгородок, д. 1, e-mail: antonov@iate.obninsk.ru

Валерий А. Чепурко, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированные системы управления, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.

Россия, 249020, Калужская обл., Обнинск, Студгородок, д. 1, e-mail: chepurko@iate.obninsk.ru

Владимир Е. Чехович, начальник отдела, АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико — энергетический институт им. А.И. Лейпунского».

Россия, 249033, Калужская обл., Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, e-mail: 89158916216@rambler.ru

Владимир Ф. Украинцев, кандидат физико-математических наук, ведущий специалист, АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико — энергетический институт им. А.И. Лейпунского».

Россия, 249033, Калужская обл., Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1, e-mail: ukrainsev@mail.ru

Поступила 20.04.2016

Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем

Юрий Г. Зайко, ОАО «НИИ «Аргон», Москва, Россия, e-mail: zayko@argon.ru

Ларелла Н. Искандарова, ОАО «НИИ «Аргон», Москва, Россия

Александр В. Трахтомиров, Научно-производственное предприятие «Оберон», Харьков Украина



Юрий Г. Зайко



Ларелла Н.
Искандарова



Александр В.
Трахтомиров

Резюме. Цель. Для определения количественных оценок показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем применимы методы теории надежности, аналитические методы или имитационное моделирование. Рассматривается использование этих методов для систем различной сложности. Описывается комплекс имитационных программ «Диалог», разработанный для расчета показателей безотказности. **Методы.** Основным препятствием широкого использования метода имитационного моделирования для получения показателей надежности является большая трудоемкость создания таких моделей. Существующие программные средства для этого не вполне пригодны. Разработанный комплекс программ «Диалог» позволяет решить эту задачу. Это достигается тем, что программы имитационных моделей создаются автоматически на основе введенных исходных данных. Время создания модели в основном определяется временем их ввода. Автоматическое создание имитационных моделей основано на том принципе, что если поведение системы при отказах обуславливается только ее составом, связями между компонентами, критериями отказов и условиями подключения резервов, т.е. когда реакция системы на отказ ее компонента заранее однозначно определена, то возможно создание моделей с одинаковой структурой для систем с любыми конфигурациями. Это позволяет создать основу исходного текста модели, общую для всех имитационных моделей данного типа. Такая основа составляет неизменяемую часть модели, а данные, которые определяют специфику поведения конкретной системы при отказах, задаются в виде вставок в основной текст. **Результаты.** Описываемый комплекс программ предназначен для расчета показателей безотказности различных технических систем с помощью имитационных моделей и состоит из программы для описания моделируемой системы «Диалог-ОС», программы для синтеза моделей «Диалог-Синтез» и специальных подпрограмм, объединенных в отдельную библиотеку. Комплекс позволяет автоматически создавать специализированные имитационные модели резервированных систем, которые проходят статистические испытания, и на основе полученных результатов определяются показатели безотказности. С помощью комплекса «Диалог» могут быть получены следующие показатели безотказности: 1) вероятность безотказной работы за заданное время, 2) интенсивность отказов в конце заданного времени, 3) среднее время наработки до отказа, 4) данные для построения графика зависимости вероятности безотказной работы от времени, 5) данные для построения графика зависимости интенсивности отказов от времени. **Выводы.** Приводятся результаты расчетов, произведенных теоретическими методами и методом имитационного моделирования, которые показывают хорошее совпадение (относительная погрешность не более 1%). Комплекс программ «Диалог» позволяет с достаточной для практики точностью рассчитывать показатели безотказности резервированных радиоэлектронных систем любой сложности. Следует отметить, что комплекс «Диалог» позволяет создать имитационную модель надежности для резервированных радиоэлектронных систем, расчет характеристик безотказности которых теоретическими методами невозможен из-за их сложности.

Ключевые слова: резервированные системы, показатели надежности, теория надежности, имитационное моделирование.

Формат цитирования: Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н., Трахтомиров А.В. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем // Надежность. 2016. №3. С. 8-17. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-8-17

Теоретические методы расчета

Для повышения надежности функционирования радиоэлектронных систем (РЭС) при недостаточной надежности составляющих эти системы элементов используется резервирование, т.е. наличие в системе

большого количества элементов по сравнению с количеством, необходимым для выполнения требуемой функции (аппаратурная избыточность).

Среди показателей надежности, определяющих безотказность функционирования РЭС, чаще всего на практике используются следующие:

- вероятность безотказной работы (ВБР) за заданное время $t - R(t)$;
- средняя наработка до отказа - T_0 ;
- интенсивность отказов системы за заданное время $t - \lambda(t)$.

Аналитический анализ надежности системы при резервировании проводится обычно при следующих ограничивающих допущениях:

1. Отказы элементов резервированной системы являются простейшим потоком случайных событий.

2. Все основные и резервные элементы, входящие в одну резервированную систему, имеют одинаковую надежность.

3. Переключающие устройства не учитываются (реализуются программным путем или принимаются идеально надежными).

4. Ремонт резервированной системы в процессе ее функционирования не производится.

5. Все элементы системы могут существовать только в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном.

Структурная схема надежности (ССН) представляет собой графическое изображение работоспособного состояния системы. ССН показывает логическую связь функционирующих элементов (или объединяющих их блоков), необходимых для успешной работы системы. Для определения количественных оценок показателей безотказности на основе ССН применимы различные методы. В зависимости от вида ССН используют простые булевы методы, теорию марковских процессов и/или анализ дерева неисправностей. Вычисления могут быть сделаны с применением теоретических методов или моделирования Монте-Карло [1] (метод имитационного моделирования).

Простейшим вариантом является последовательная ССН, в которой для успешного функционирования системы необходима успешная работа (отсутствие отказа) каждого из m элементов схемы (рис. 1). Все элементы схемы находятся во включенном состоянии, интенсивность отказов i -го элемента схемы обозначим λ_i ($i = 1, \dots, m$). Вход ССН обозначен символом I , выход - символом O .

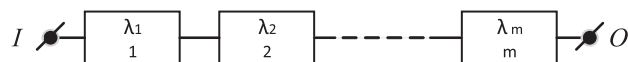


Рис. 1. Последовательная ССН из m элементов

При принятых выше допущениях основные количественные характеристики надежности последовательной ССН будут выражаться следующими формулами [2]:

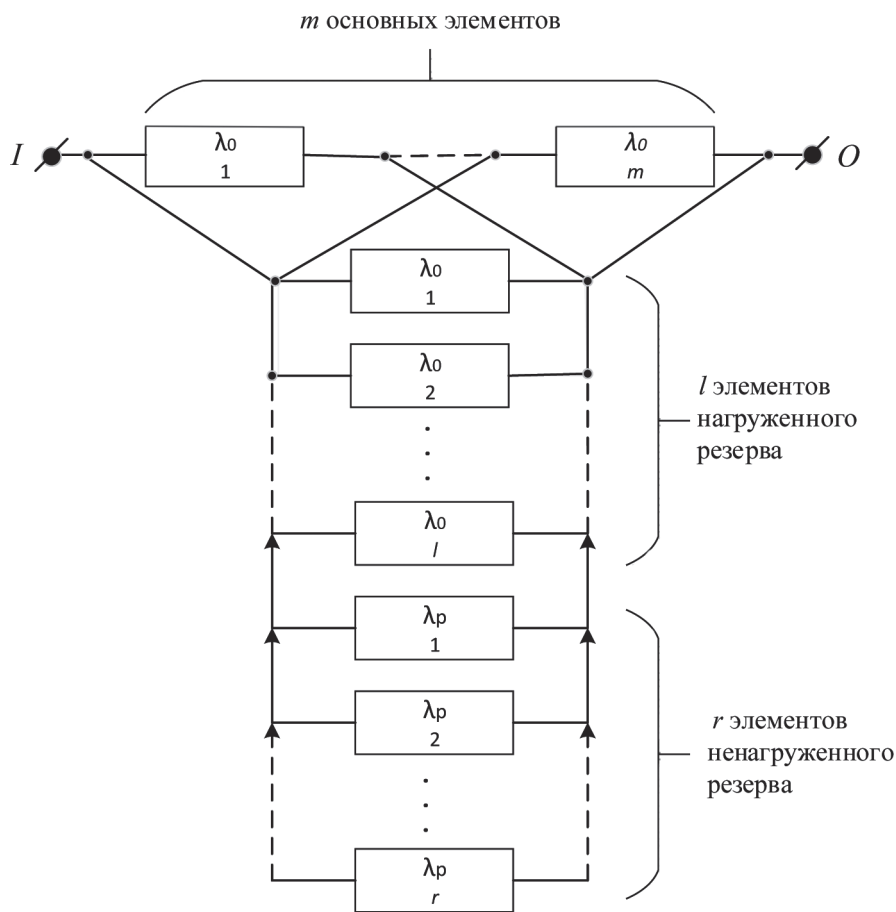


Рис. 2. Параллельная ССН со структурой (m, l, r)

$$R_c(t) = e^{-t \sum_{i=1}^m \lambda_i}; \quad (1)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^m \lambda_i; \quad (2)$$

$$T_{0(c)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}. \quad (3)$$

Параллельная ССН может в общем случае содержать m основных элементов, l элементов нагруженного резерва и r элементов ненагруженного резерва. В частном случае, когда все основные элементы имеют одинаковую интенсивность отказов λ_0 , все l элементов нагруженного резерва имеют такое же значение интенсивности отказов λ_0 , все r элементов ненагруженного резерва находятся в выключенном состоянии и имеют до момента включения в работу интенсивность отказов λ_p ($0 \leq \lambda_p < \lambda_0$), схема такого параллельного резервирования приведена на рис. 2. Будем обозначать структуру такой параллельной системы (m, l, r) .

В частном случае для структур с одним типом резерва $(m, l, 0)$ и $(m, 0, r)$ можно получить с использованием методов теории однородных марковских процессов следующую общую формулу для ВБР резервированной системы:

$$R_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \left[\frac{\prod_{j=0}^n (m + j\alpha)}{\alpha^n \cdot n!} \sum_{i=0}^n (-1)^i \cdot \frac{C_n^i}{m + i\alpha} \cdot e^{-(m-1+i\alpha)\lambda_0 t} \right], \quad (4)$$

где n – число резервных элементов ($n = l$ или $n = r$);
 m – число основных элементов ($m \geq 1$);

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{\lambda_0};$$

$$n! = \prod_{k=1}^n k - \text{факториал числа } n;$$

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} - \text{число сочетаний из } n \text{ по } i.$$

Средняя наработка до отказа равна:

$$T_{0(c)} = \int_0^{\infty} R_c(t) dt = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^n \frac{1}{m + i\alpha}. \quad (5)$$

Интенсивность отказов резервированной схемы можно вычислить по формуле:

$$\lambda_c(t) = -\frac{R'_c(t)}{R_c(t)} = \lambda_0 \frac{\sum_{i=0}^n (-1)^i C_n^i e^{-(m+i\alpha)\lambda_0 t}}{\sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{C_n^i}{m + i\alpha} e^{-(m+i\alpha)\lambda_0 t}}. \quad (6)$$

В общем случае для систем со структурой (m, l, r) , включающей элементы как нагруженного, так и ненагруженного резерва, выражение для ВБР резервированной системы $R_c(t)$ будет зависеть от режима подключения во включенное состояние элементов ненагруженного резерва. В частности, для систем, когда элементы ненагруженного резерва включаются в работу только после отказа l модулей из основного состава или нагруженного резерва, т.е. когда система приобретает структуру $(m, 0, r)$, выражение для $R_c(t)$ имеет достаточно сложную структуру [3]. В простейшем случае для резервированной системы со структурой $(1, l, 1)$ выражение для $R_c(t)$ имеет следующий вид

$$R_c(t) = \left[1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{l+1} \right] + (l+1) \cdot \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{i=0}^l C_l^i (-1)^i \times \frac{\left[1 - e^{-(i+\alpha)\lambda_0 t} \right]}{\lambda_0 (i + \alpha)}. \quad (7)$$

Часто используемое на практике мажоритарное резервирование « m из n » является частным случаем системы, приведенной на рис. 2, если структура будет иметь вид $(m, l, 0)$ (в этом случае $n = m + l$) или $(m, 0, r)$ (в этом случае $n = m + r$).

На практике нередко используются последовательно-параллельные схемы резервирования. На рис. 3 приведена схема, состоящая из нерезервированного элемента 1,

первой параллельной резервированной группы со структурой $(1, 2, 0)$, состоящей из элементов 2, 3, 4 и второй параллельной резервированной группы со структурой $(1, 1, 0)$, состоящей из элементов 5 и 6.

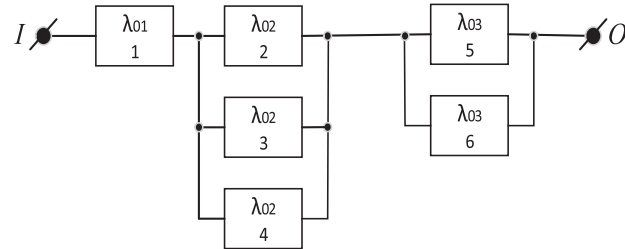


Рис. 3. ССН с последовательным и параллельным соединением элементов

Пример более сложной схемы с последовательно-параллельным резервированием изображен на рис. 4 [1].

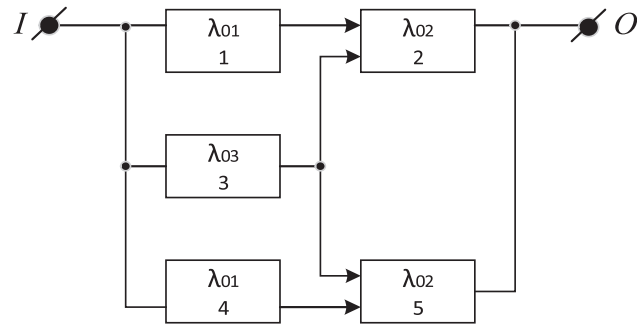


Рис. 4. ССН с последовательным и параллельным соединением элементов

На рисунке изображена система подачи топлива на двигателя легкого самолета. Элемент 1 представляет собой устройство подачи топлива на двигатель левого борта (элемент 2), элемент 4 – на двигатель правого борта (элемент 5), а элемент 3 – резервное устройство на оба двигателя. Отказ данной системы наступает в случае отказа обоих двигателей.

На схеме рис. 4 элементы 1, 3, 4 являются управляющими, а элементы 2, 5 – управляемыми. Связи управляющих элементов с управляемыми обозначены стрелкой.

Более сложная схема с управляющими и управляемыми элементами изображена на рис. 5 [4].

Схема состоит из управляющих элементов Y_1, Y_2, Y_3 и рабочих элементов, объединенных в три линейки с последовательно-параллельным резервированием. Каждый управляющий элемент управляет своей линейкой рабочих элементов, причем отказ управляющего элемента выводит из строя всю линейку. Такая система резервирования используется в блоке оптических датчиков, входящих в блок регистрации грозовой активности, используемый в составе космического аппарата.

На практике могут использоваться схемы с многоуровневым резервированием (рис. 6).

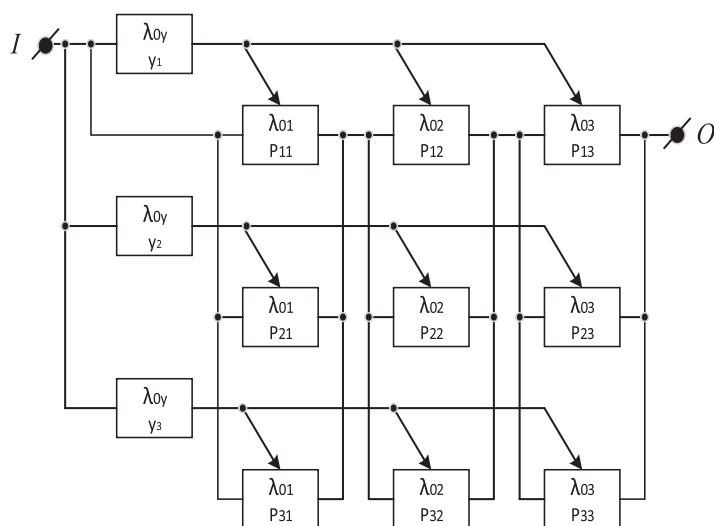


Рис. 5. ССН с управляющими и рабочими (управляемыми) элементами резервирования

В схеме, изображенной на рис. 6, на первом уровне резервирования используется мажоритарная схема «2 из 3» со структурой (2, 1, 0), на втором уровне – параллельная схема с ненагруженным резервом.

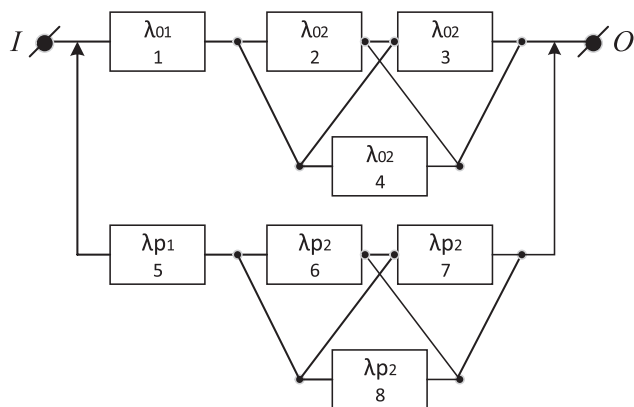


Рис. 6. ССН с двухуровневым резервированием

Анализ показывает, что для простейших схем резервирования (рис. 2) существуют готовые теоретические формулы для расчета показателей $R(t)$, T_0 , $\lambda(t)$ [1, 2]. Для более сложных схем (рис. 4, 5) методом анализа дерева неисправностей можно получить формулы для расчета показателей $R(t)$ [1, 4], однако расчет показателей T_0 , $\lambda(t)$ является проблематичным, поскольку такие схемы теряют свойство простейшего потока отказов.

Для схемы, приведенной на рис. 6, проблематичным является даже расчет показателя $R(t)$, поскольку для схемы второго уровня с ненагруженным резервированием для расчета показателя $R(t)$ по известным формулам необходимо знать значение показателя $\lambda(t)$ для каждой из линеек. Поскольку в каждую из линеек входит резервированная схема первого уровня, то поток отказов в линейках перестает быть простейшим и интенсивность отказов каждой линейки нельзя рассчитать по известным формулам.

Альтернативой теоретическим методам расчета показателей надежности является метод имитационного моделирования, который позволяет имитировать реальное функционирование резервированной системы любой сложности. Ниже описывается комплекс программ для имитационного моделирования, используемый для расчета показателей надежности резервированных систем.

Описание комплекса программ «Диалог»

Основным препятствием широкого использования метода имитационного моделирования для получения показателей надежности является большая трудоемкость создания таких моделей. Существующие программные средства для этого не вполне пригодны.

Разработанный комплекс программ «Диалог» позволяет решить эту задачу. Это достигается тем, что программы имитационных моделей создаются автоматически на основе введенных исходных данных. Время создания модели в основном определяется временем их ввода.

Автоматическое создание имитационных моделей основано на том принципе, что если поведение системы при отказах обуславливается только ее составом, связями между компонентами, критериями отказов и условиями подключения резервов, т.е. когда реакция системы на отказ ее компонента заранее однозначно определена, то возможно создание моделей с одинаковой структурой для систем с любыми конфигурациями.

Это позволяет создать основу исходного текста модели, общую для всех имитационных моделей данного типа. Такая основа составляет неизменяемую часть модели, а данные, которые определяют специфику поведения конкретной системы при отказах, задаются в виде вставок в основной текст.

Исходными данными для синтеза моделей служат следующие сведения:

- состав системы и связи между ее компонентами;
- критерии отказов;
- условия подключения резервов;
- интенсивности отказов элементов системы в различных режимах.

Этих сведений достаточно для отражения в модели поведения системы при отказах.

В дальнейшем изложении будут использованы следующие термины:

- система – объект моделирования, для которого выполняется определение показателей надежности и который состоит из элементов и блоков;
- элемент – наименьшая неделимая часть системы, в которой происходит отказ;
- блок – условное объединение элементов и блоков;
- компоненты системы – элементы и блоки, входящие в ее состав;

- основной комплект системы – элементы и блоки системы, исключая подключаемый резерв и управляющие компоненты;
- подключаемый резерв – компоненты, подключаемые из резерва при появлении специальных условий;
- критерий отказа – состояние компонента, когда происходит его отказ;
- условие подключения резерва – условие, когда происходит замена отказавшего компонента на компонент из резерва.

Перед началом запуска программы «Диалог» должна быть выполнена подготовка части исходных данных, описывающих состав системы и связи между ее компонентами.

Подготовка таких данных заключается в выделении в системе условных блоков и присвоении имен всем блокам и элементам.

Для этого используются следующие типы блоков:

- последовательный (POSL) (рис. 1);
- параллельный (PAR) (рис. 2);
- мажоритарный (MAJ), являющийся частным случаем параллельного блока;
- управляемый (UPR) (рис. 5), состоящий из управляющих элементов (У1, У2, У3) и объектов управления (ОП), куда входят все рабочие компоненты ($P_{11}, \dots, P_{33}$);
- блок резерва (REZ) (рис. 2), который используется для выделения компонентов ненагруженного резерва при любом значении m и выделения компонентов нагруженного резерва при $m > 1$.

Ниже рассмотрена программа «Диалог» и принципы работы полученных с ее помощью имитационных моделей. Программа написана на языке REXX с использованием интерпретатора Regina 3.6. В состав комплекса также входят служебные файлы и специальные подпрограммы, объединенные в библиотеку, которые используются при трансляции.

На первом этапе работы программы оператором вводятся исходные данные, описывающие систему и режим испытаний. На втором этапе в результате обработки введенных данных выполняется синтез модели, которая представляет собой исходный текст компьютерной программы на языке Фортран 77 с использованием некоторых подпрограмм языка SMPL [5].

Структурная схема программы «Диалог» изображена на рис. 7, где приведены основные этапы работы программы.

Описание структурных элементов на рис. 7:

1. Ввод названия модели, времени создания, имени оператора и пути сохранения рабочих файлов. Название модели будет именем файла с записью модели.

2. Ввод состава системы: перечень элементов и условных блоков с указанием их типов.

3. Если у блока или элемента есть выключенные резервы, то вводится имя блока, где они хранятся.

4. Вводится состав условных блоков, в том числе блока хранения резерва.

5. Вводятся интенсивности отказов элементов для включенного и выключенного состояния.

6. Вводятся данные для испытания модели: число испытаний, время моделирования, включение расчета лямбда-характеристики. Эти данные могут быть изменены во время запуска программы модели.

7. Синтез модели. Обрабатываются введенные данные и формируются фрагменты текста модели. Неизменяемые части, составляющие основу модели, объединяются со сформированными фрагментами. Результатом объединения является текст программы на языке Фортран 77 и рабочие файлы.

8. Сохранение исходных данных. Чтобы сократить время ввода исходных данных, если необходимо испытать несколько вариантов систем, предусмотрено со-

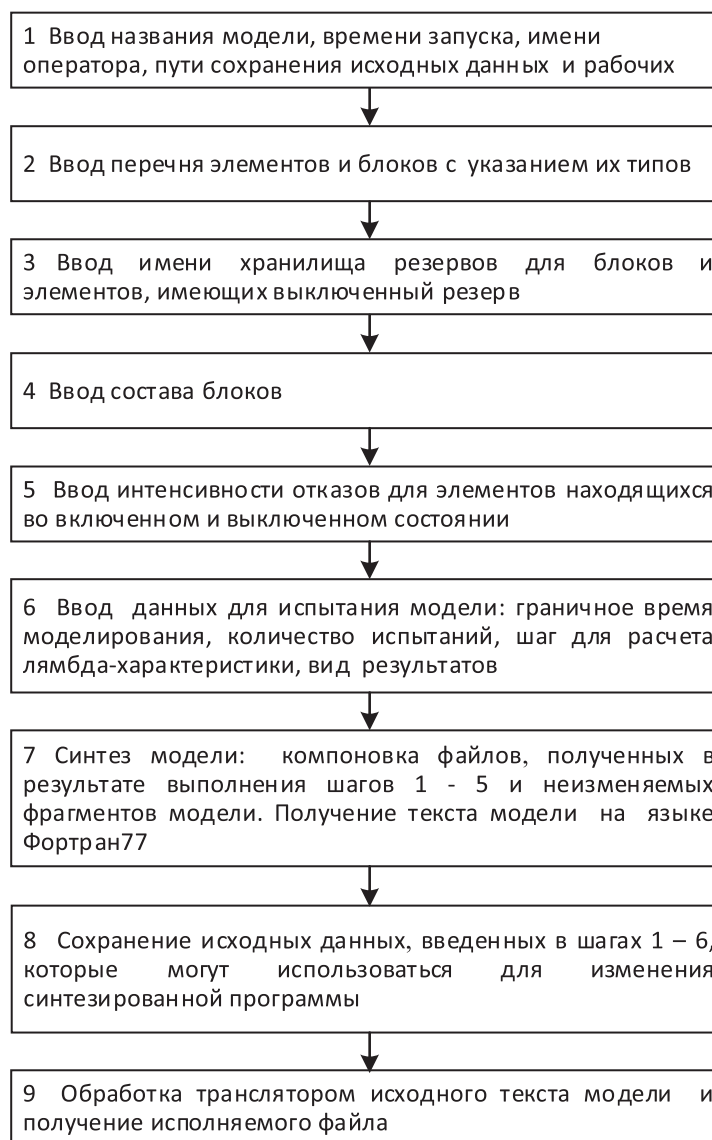


Рис. 7. Структурная схема программы «Диалог»

хранение введенных данных, возможность их частично изменить и синтезировать новую модель.

9. Трансляция сформированного текста программы и получение исполняемого файла. Для запуска трансляции необходим установленный транслятор, поддерживающий Фортран 77. Выбор этого языка обусловлен тем, что после трансляции формируется исполняемый код с небольшой избыточностью по сравнению с другими языками. Трансляция и испытания модели могут быть выполнены на другом компьютере.

Все полученные модели имеют одинаковый алгоритм работы и отличаются между собой только частями, описывающими структуру системы. Поэтому в дальнейшем изложении для них будет использовано общее название «модель».

Полученные модели имеют следующие характеристики:

- количество компонентов в системе – не более 100;
- закон распределения генерируемых событий – экспоненциальный;
- одно хранилище резервов может обслуживать несколько компонентов;
- компонент может обслуживаться только одним резервом;
- резервом компонента может быть компонент другого типа, т.е. резервом элемента может быть блок и наоборот;
- не предусмотрен резерв для компонентов, находящихся в резерве;
- критерий подключения резерва – отказ компонента.

В программе «Диалог» можно задать в качестве получаемых результатов следующие показатели надежности:

- значение вероятности безотказной работы за заданное время $t - R(t)$;
- график зависимости $R(t)$ для заданного интервала времени от $t_{1(R)}$ до $t_{2(R)}$;
- значение средней наработки до отказа – T_0 ;
- значение интенсивности отказов системы за заданное время $t - \lambda(t)$;
- график зависимости $\lambda(t)$ для заданного интервала времени от $t_{1(\lambda)}$ до $t_{2(\lambda)}$ (лямбда-характеристика).

Принцип работы синтезированных моделей заключается в следующем:

1. При запуске программы для каждого элемента случайным образом генерируется время его отказа. Если это время меньше, чем заданное время окончания работы системы, то планируется событие – отказ элемента. В качестве параметра события задается время его наступления и имя элемента, к которому относится это событие. Генерируется также событие прекращения работы модели при наступлении времени окончания работы системы.

2. События заносятся в очередь и сортируются по возрастанию времени.

3. Опрашивается очередь и выбирается событие с минимальным временем.

4. Для выбранного события (отказа элемента) выполняется его обработка: опрашиваются компоненты системы, определяется, привел ли этот отказ к отказу других компонентов или отказу системы, возможно ли подключение резерва.

5. Если достигнуто граничное время или произошел отказ системы, то работа модели прекращается.

6. В случае подключения резерва вместо отказавшего компонента, резерв переводится во включенное состояние, отменяются ранее запланированные для него события и генерируются новые отказы для включенного состояния.

7. Запуск модели повторяется заданное число раз, после чего выполняется расчет показателей надежности.

Для дальнейшего изложения следует учесть, что в модели используется следующее разбиение событий на группы (транзакты) в соответствии с их видом и алгоритмом обработки:

- отказы включенных элементов (транзакт 1);
- отказы выключенных элементов резерва (транзакт 2);
- завершение работы при достижении времени окончания моделирования (транзакт 3).

Результатом работы программы «Диалог» является файл (Имя модели).for с записью модели на языке Фортран. После его трансляции формируется исполняемый файл (Имя модели).exe. Далее выполняется его запуск и проводятся статистические испытания.

Структурная схема, демонстрирующая работу таких моделей, изображена на рис. 8.

Работа происходит следующим образом:

1. Запуск исполняемого файла, полученного после трансляции.

2. Установка начальных условий. Устанавливается время моделирования, число запусков при испытании модели, шаг для расчета лямбда-характеристики. Эти данные можно изменить при выполнении программы, а также исключить расчет лямбда – характеристики.

3. Формируется список элементов и условных блоков.

4. Генерируются события отказов включенных элементов (транзакт 1) и выключенных элементов резерва (транзакт 2). События отказов заносятся в очередь событий и сортируются по запланированному времени свершения. Заносится в очередь событие окончания моделирования (транзакт 3).

5. Опрашивается очередь событий. Выбирается ближайшее по времени свершения событие. В зависимости от номера транзакта, выполняется переход к обработке отказов включенных элементов основного комплекта, обработке отказов выключенных элементов резерва или к окончанию работы модели.

6. Обработка отказа элемента основного комплекта. Проверяется, привел ли отказ этого элемента к отказу системы. Так как элемент может находиться одновременно в нескольких условных блоках, то проверяется,

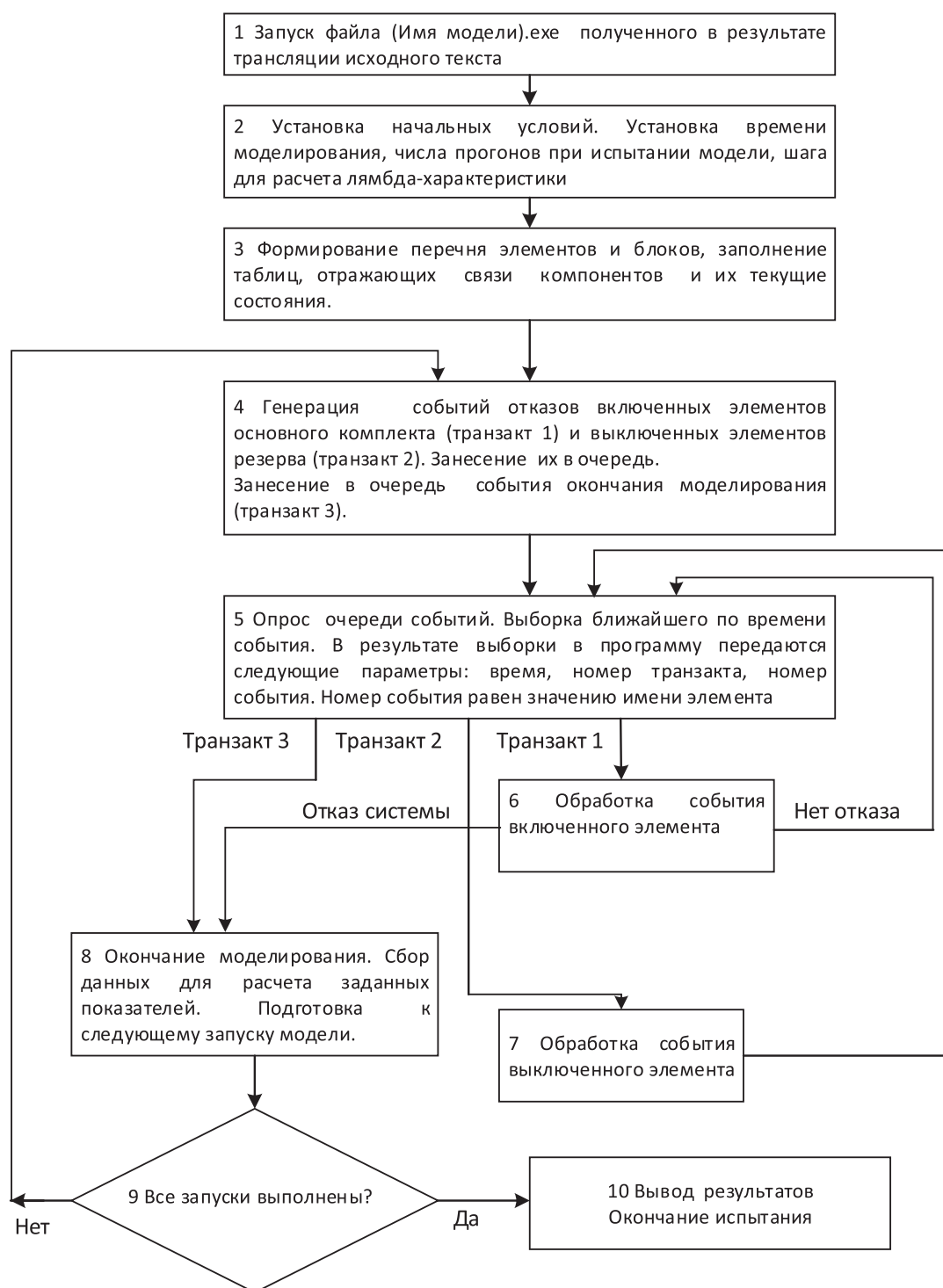


Рис. 8. Структурная схема программы имитационной модели

к чему привел его отказ в этих блоках. В свою очередь, отказ каждого блока может привести к отказу других блоков и т.д. до достижения последнего блока. В случае, если отказавший блок или элемент имеет резерв, выполняется его замещение компонентом из резерва. Если произошел отказ системы, в счетчик отказов прибавляется единица и работа модели прекращается. После выполнения обработки отказа выбирается очередное событие из очереди.

7. Обработка отказа элемента выключенного резерва происходит так же, как описано в пункте 6, за исключением возможности подключения резерва и отсутствия отказа устройства.

8. Заканчивается работа модели по двум причинам: достижение граничного времени при отсутствии отказа или отказ системы.

9. Если не достигнуто заданное количество запусков модели, происходит переход к блоку 4 и

МОДЕЛЬ RIS2-1
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
время моделирования= 1000
число испытаний= 200000
число отказов= 50529
число успехов= 149471
вероятность
безотказной работы=.7473550
среднее время
наработки до отказа= НЕ РАССЧИ-
ТЫВАЛОСЬ
шаг= 50
интенсивность
отказов $\lambda(t) = .00058785$

Рис. 9. Результаты испытания модели

МОДЕЛЬ RIS2-1
ВЫПОЛНЕН РАСЧЕТ СРЕДНЕГО
ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА
время моделирования= 300000
число испытаний= 200000
число успехов= 0
среднее время наработки
до отказа= 1834,26

Рис. 10. Результаты испытания модели для получения среднего времени наработки до отказа

повторный запуск. При каждом завершении работы собираются данные для получения результатов моделирования.

10. Если выполнено заданное количество запусков, выводятся результаты.

ДАННЫЕ ГРАФИКА ИНТЕНСИВНОСТИ
ОТКАЗОВ $\lambda(t)$

шаг	время	$\lambda(t)$
1	25	0.279248E-05
2	75	0.177235E-04
3	125	0.357058E-04
4	175	0.651742E-04
5	225	0.105678E-03
6	275	0.140588E-03
7	325	0.174245E-03
8	375	0.204881E-03
9	425	0.241084E-03
10	475	0.279565E-03
11	525	0.318051E-03
12	575	0.355583E-03
13	625	0.384560E-03
14	675	0.411543E-03
15	725	0.441098E-03
16	775	0.482188E-03
17	825	0.510980E-03
18	875	0.536080E-03
19	925	0.549788E-03
20	975	0.572966E-03

Рис. 11. Данные графика интенсивности отказов $\lambda(t)$

ДАННЫЕ ГРАФИКА ВЕРОЯТНОСТИ
БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ $R(t)$

шаг	время	$R(t)$
1	50	0,999710E+00
2	100	0,999125E+00
3	150	0,997345E+00
4	200	0,994370E+00
5	250	0,989405E+00
6	300	0,981660E+00
7	350	0,973620E+00
8	400	0,963880E+00
9	450	0,951950E+00
10	500	0,939040E+00
11	550	0,924295E+00
12	600	0,907600E+00
13	650	0,890265E+00
14	700	0,872485E+00
15	750	0,853265E+00
16	800	0,833265E+00
17	850	0,811605E+00
18	900	0,790305E+00
19	950	0,768880E+00
20	1000	0,747355E+00

Рис. 12. Данные графика вероятности безотказной работы $R(t)$

В качестве примера работы программы «Диалог» ниже приведены результаты моделирования ССН, показанной на рис. 2 со структурой (1,2,0).

Пример вывода результатов испытания модели показан на рис. 9.

Для получения достоверного значения среднего времени наработки до отказа испытания модели выполняются со временем моделирования, обеспечивающим вероятность безотказной работы, близкую к 0. Обычно достаточно устанавливать время равным $(1/\lambda) \times 20$, где λ – наименьшее значение из показателей λ для элементов, входящих в состав ССН.

Пример результатов такого расчета показан на рис. 10.

Результаты испытаний в виде таблиц показаны на рис. 11-12.

Графики изменений интенсивности отказов $\lambda(t)$ и вероятности безотказной работы $R(t)$ показаны на рис. 13-14. Для построения графиков использовалась программа, не входящая в состав комплекса «Диалог».

Оценка полученных результатов

Для сертификации результатов работы комплекса программ «Диалог» была проведена сравнительная оценка расчетов показателей надежности резервированных систем, проведенных теоретическими методами по известным формулам, и полученных в результате работы имитационной модели. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

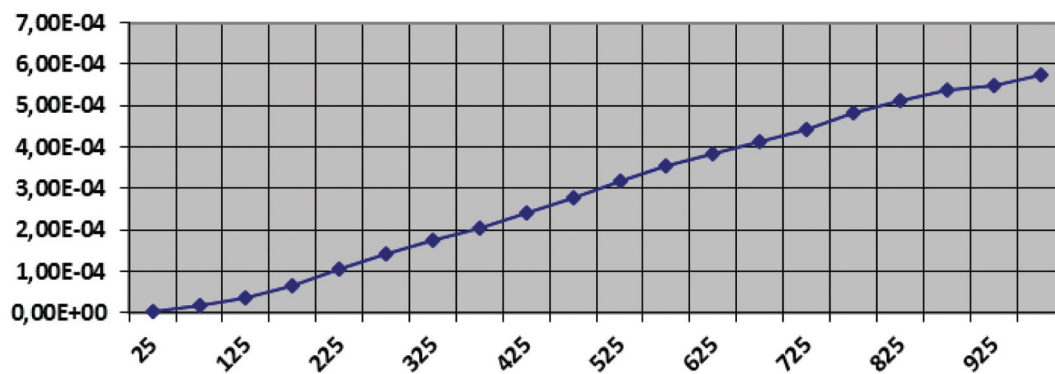
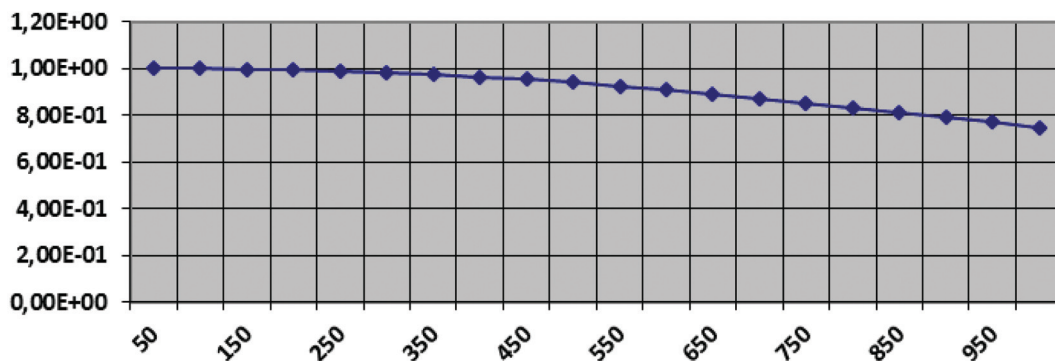
Рис. 13. График $\lambda(t)$ Рис. 14. График $R(t)$

Таблица 1. Сравнительная оценка проведенных расчетов показателей надежности резервированных систем

Примеры для расчета			Сравнительная оценка проведенных расчетов					
			Показатели	Метод расчета				Относительная погрешность, %
				Теоретический		Моделирование		
				Результаты	Формулы	Результаты	Число испытаний, шаг	
№ п/п	Описание системы	Характеристики системы						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Рис. 1	$m = 3$ $\lambda_1 = 40 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_3 = 0,4 \cdot 10^{-6}$ $t = 8760$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ λ_c	0,6777 22522 $44,4 \cdot 10^{-6}$	(1) (2) (3)	0,6782 22532 $44,22 \cdot 10^{-6}$	200000 100	0,073 0,044 0,405
2	Рис. 2 Структура (1, 2, 0)	$\lambda_0 = 1000 \cdot 10^{-6}$ $t = 1000$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ $\lambda_c(t)$	0,7474 1833 $590 \cdot 10^{-6}$	(4) (5) (6)	0,7473 1834 $587,85 \cdot 10^{-6}$	200000 50	0,013 0,054 0,364
3	Рис. 2 Структура (1, 0, 2)	$\lambda_0 = 1000 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_p = 100 \cdot 10^{-6}$ $t = 1000$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ $\lambda_c(t)$	0,9012 2742 $244 \cdot 10^{-6}$	(4) (5) (6)	0,9021 2745 $243,65 \cdot 10^{-6}$	200000 100	0,100 0,109 0,143
4	Рис. 3	$\lambda_{01} = 10 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{02} = 40 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{03} = 100 \cdot 10^{-6}$ $t = 8760$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ $\lambda_c(t)$	0,5885	(4)	0,5879 12418 $88,96 \cdot 10^{-6}$	200000 100	0,102
5	Рис. 4	$\lambda_{01} = 10 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{02} = 100 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{03} = 20 \cdot 10^{-6}$ $t = 1000$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ $\lambda_c(t)$	0,9909	(8) [1]	0,9892 14535 $21,59 \cdot 10^{-6}$	200000 100	0,171

Продолжение таблицы 1

Примеры для расчета			Сравнительная оценка проведенных расчетов					
			Показатели	Метод расчета				Относительная погрешность, %
				Теоретический		Моделирование		
№ п/п	Описание системы	Характеристики системы		Результаты	Формулы	Результаты	Число испытаний, шаг	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	Рис. 5	$\lambda_{0y} = 10 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{01} = 4 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{02} = 1 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{03} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ $t = 87600$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ $\lambda_c(t)$	0,6176	(3) [4]	0,6184 123332 $10,30 \cdot 10^{-6}$	200000 100	0,130
7	Рис. 6	$\lambda_{01} = 10 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{02} = 40 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{p5} = 1 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{p6} = 4 \cdot 10^{-6}$ $t = 8760$ ч	$R_c(t)$ $T_{0(c)}$ $\lambda_c(t)$			0,9699 34217 $9,26 \cdot 10^{-6}$	200000 200	

Как показывает анализ результатов расчетов, приведенных в таблице 1, относительная погрешность результатов не превышает 1%.

Кроме того программа «Диалог» позволяет рассчитывать показатели надежности резервированных систем в случае отсутствия аналитических формул.

Таким образом, разработанная программа моделирования «Диалог» может использоваться для расчета показателей надежности резервированных РЭС.

Библиографический список

- ГОСТ 51901-14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М. Стандартинформ, 2008 г.
- Половко А.М. Основы теории надежности. М. Наука, 1964 г.
- Зайко Ю.Г., Смирнов М.Б. Оценка надежности системы со смешанным резервированием. «Надежность», №4 (11), 2004 г., с. 40-45.
- Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н. Расчет показателя безотказности резервированных систем с управляющими модулями. «Радиопромышленность», 2013 г.,

вып. 4, с. 50-60.

5. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки моделирования и базы данных. Под редакцией М. Брейера. Глава 1 М. Макдугал Моделирование на уровне системы. М. Мир, 1979 г.

Сведения об авторах

Юрий Г. Зайко, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, начальник сектора в ОАО «НИИ «Аргон».

Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 125, служ. тел. 8 (495) 319-68-89, тел. 8-917-576-43-00.

Ларелла Н. Искандарова, ведущий инженер-программист в ОАО «НИИ «Аргон».

Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 125, служ. тел. 8 (495) 319-68-89, тел. 8-926-624-64-27.

Александр В. Трахтомиров, директор научно-производственного предприятия «Оберон».

Украина, Харьков, ул. Гаршина, 4, тел. +380 57 7004476, +380 68 6088611.

Поступила 07.10.2015

Модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения

Артем Н. Волков, ООО «Научно-производственное объединение Программные комплексы реального времени», Москва, Россия, e-mail: artem.n.volkov@yandex.ru



Артем Н. Волков

Резюме. Цель. В рамках данной работы ставились следующие цели: исследование физических механизмов деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов, вызванной обрывом Si-H связей; исследование возможности влияния космического излучения на надежность наноразмерных полевых транзисторов; разработка модели прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения. Для выполнения поставленных целей были проанализированы: современные модели прогнозирования надежности полевых транзисторов; данные о составе, интенсивности потока космического излучения в зависимости от энергии. **Результаты и выводы.** В результате работы показано, что наиболее актуальной физической моделью прогнозирования надежности является модель Браве, которая учитывает следующие механизмы деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов: механизм единичного возбуждения или воздействия (Single Vibration Excitation – SVE), когда обрыв Si-H связи инициируется одним носителем, обладающим достаточной энергией; механизм электрон – электронного рассеяния (Electron – Electron Scattering – EES), когда обрыв связи инициируется носителем, получившим часть энергии от другого носителя, в результате акта ударной ионизации и имеющим после этого достаточно энергии для обрыва связи; механизм мульти-вибрационного возбуждения или воздействия (Multi Vibration Excitation – MVE), когда обрыв Si-H связи инициируется последовательной бомбардировкой связи, носителями, обладающими недостаточной для обрыва связи энергией. Показано, что протоны космического излучения, обладающие большой начальной энергией, могут пройти сквозь структуру полевого транзистора, теряя при этом часть своей начальной энергии на ионизационных потерях, и достичь границы раздела Si/SiO₂. При достижении границы раздела протоны могут обладать энергией, достаточной для инициации процесса диссоциации Si-H связей по двум механизмам: механизм единичного возбуждения Si-H связи под воздействием протона (Single Vibration Excitation – SVEp) – одиночный протон, обладающий достаточной для обрыва связи энергией, сталкивается с атомом водорода и инициирует процесс диссоциации Si-H связи; механизм ударной ионизации – по аналогии с описанным в модели Браве электрон – электронным рассеянием, в данном случае может иметь место протон – электронное рассеяние (Proton-Electron Scattering – PES). На основе модели Браве разработана модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения и позволяющая дать более точный прогноз надежности электронных устройств на их основе. Данная работа отражает современное представление о прогнозировании надежности наноразмерных полевых транзисторов, показывает основные физические механизмы деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов. В данной работе показано, что модели прогнозирования надежности, разработанные для полевых транзисторов с длинным каналом, не подходят для современных наноразмерных устройств, в виду различия механизмов деградации. В рамках данной работы было показано, что существует вероятность влияния космического излучения на деградацию, разработана модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая данное влияние.

Ключевые слова: надежность, деградация приборных характеристик, физические механизмы деградации, наноразмерные полевые транзисторы, космическое излучение, модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов.

Формат цитирования: Волков А.Н. Модель прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающая возможное влияние космического излучения // Надежность. 2016. №3. С. 18-22. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-18-22

Введение

Появление современных технологий, с каждым разом уменьшающих физические размеры и улучшающих приборные характеристики полевых транзисторов, привело

к созданию современных наноразмерных электронных устройств. Скачкообразный переход от устройств микронных размеров, которые были предметом исследования в течение нескольких десятилетий, к устройствам

с нано размерами породил необходимость новых исследований в области физических механизмов деградации и отказов современных электронных устройств, основанных на наноразмерных полевых транзисторах. Модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик, разработанные и успешно применявшиеся в электронных устройствах микронных размеров, не могут в полном объеме дать оценку надежности современных наноразмерных устройств ввиду наличия у последних других физических механизмов деградации, являющейся причиной наступления параметрического отказа и сокращения надежности устройств.

Применение современных наноразмерных полевых транзисторов в аппаратуре космического назначения требует учитывать при прогнозировании надежности возможное влияние космического излучения, так как данное влияние становится все более значимым в электронных устройствах на их основе.

На сегодняшний день существующие физические модели, описывающие механизмы деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов и позволяющие прогнозировать их надежность, не учитывают возможное влияние на деградацию приборных характеристик космического излучения и не могут в полном объеме дать оценку надежности электронных устройств космического назначения. Таким образом, разработка модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения, является актуальной задачей.

В рамках данной работы ставилась задача построения физической модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения.

Физические модели прогнозирования надежности

На сегодняшний день существует большое количество эмпирических и полуэмпирических моделей прогнозирования надежности металл-оксид-полупроводник транзисторов (МОПТ), описывающих деградацию их приборных характеристик, вызванную обрывом Si-H связей на границе раздела Si/SiO₂ [1, 2]. Большинство этих моделей основаны на концепции «удачливых» электронов («lucky electron model» в англоязычной литературе). Данная концепция хорошо описывает механизм обрыва Si-H связей в транзисторах с длинным каналом и электронных устройствах на их основе. Для этих устройств характерны высокие напряжение питания и, как следствие, высокое значение напряженности латерального электрического поля в канале. Данное электрическое поле способно разгонять электроны в канале, делая их «горячими» («hot electron» в англоязычной литературе), т.е. имеющими достаточную энергию для инициации процесса диссоциации Si-H связей.

Большинство электронов, разогнанных электрическим полем в канале полевого транзистора, продолжает свое движение в сторону стока, но некоторые из них («удачливые») отклоняются от траектории движения и достигают поверхности раздела Si/SiO₂, где инициируют обрыв Si-H связей или проникают в окисел, образуя, таким образом, поверхностные или пространственные ловушки. Именно этот физический механизм лег в основу концепции «удачливых» электронов и, соответственно, моделей прогнозирования надежности, основанных на данной концепции.

В современных наноразмерных полевых транзисторах, имеющих более низкое напряжение питания и, как следствие, более низкое значение напряженности латерального электрического поля в канале, исходя из концепции «удачливых» электронов, деградация приборных характеристик, вызванная обрывом Si-H связей, должна быть сведена к минимуму или отсутствовать вообще. Однако не смотря на это, данный вид деградации в современных наноразмерных полевых транзисторах и электронных устройствах на их основе продолжает наблюдаться и даже становится более актуальной проблемой по сравнению с устройствами микронных размеров, что говорит о наличии в наноразмерных полевых транзисторах других физических механизмов, вызывающих обрыв Si-H связей и, как следствие, деградацию приборных характеристик [3].

Таким образом, концепция «удачливых» электронов и модели прогнозирования надежности на ее основе не подходят для прогнозирования надежности и описания деградации приборных характеристик современных наноразмерных полевых транзисторов и электронных устройств на их основе. Следовательно, необходимы новые модели, учитывающие особенности наноразмерных полевых транзисторов и физических процессов, лежащих в основе деградации их приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей.

В работе [3] автор приводит обзор современных физических моделей прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей, для наноразмерных полевых транзисторов. Особенностями данных моделей является то, что они описывают те новые физические механизмы, присущие наноразмерным полевым транзисторам, которые отсутствовали в концепции «удачливых» электронов, а именно:

- связь может разрываться под воздействием одиночного носителя с высокой энергией;
- диссоциация связи может возникать вследствие последовательной бомбардировки связи несколькими носителями с меньшей энергией;
- в наноразмерных полевых транзисторах электрон-электронное рассеяние играет доминирующую роль в процессе обрыва Si-H связей;
- в наноразмерных полевых транзисторах начиная с топологической нормы 180 нм и ниже, управляющей силой деградации является энергетический вклад носителей заряда в канале, а не электрическое поле.

Наиболее успешной физической моделью является модель Браве (Braviax), так как она не требует решения кинетического уравнения Больцмана, для определения функции распределения электронов по энергиям, а также объединяет в себе подходы, разработанные в других моделях, и предполагает, что деградация, вызванная обрывом Si-H связей, может развиваться по трем независимым механизмам:

- механизм единичного возбуждения или воздействия (Single Vibration Excitation – SVE), когда обрыв Si-H связи инициируется одним носителем, обладающим достаточной энергией. Данный механизм хорошо описан моделью «удачливых» электронов;

- механизм электрон-электронного рассеяния (Electron – Electron Scattering – EES), когда обрыв связи инициируется носителем, получившим часть энергии от другого носителя, в результате акта ударной ионизации и имеющим после этого достаточно энергии для обрыва связи. Данный механизм хорошо описан в рамках энергетически управляемой парадигмы [3];

- механизм мульти-вибрационного возбуждения или воздействия (Multi Vibration Excitation – MVE), когда обрыв Si-H связи инициируется последовательной бомбардировкой связи носителями, обладающими недостаточной для обрыва связи энергией. Данный механизм был предложен и хорошо описывается моделью Хесса (Hess), в основе которой лежит упрощенная модель гармонического осциллятора [3].

Объединяя, таким образом, три данных механизма обрыва Si-H связи, модель прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик Браве описывается следующим уравнением:

$$R_{it} = \frac{1}{\tau} = C_1 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W} \right)^{a_1} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}} \right)^m + C_2 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W} \right)^{a_2} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}} \right)^m + C_3 \cdot V_{ds}^{a_3/2} \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W} \right) \cdot \exp \left(\frac{-E_{emi}}{k_B T} \right) \quad (1)$$

где R_{it} – интенсивность образования поверхностных состояний в результате обрыва Si-H связей; τ – срок службы (время до наступления параметрического или критического отказа); C_1 (SVE), C_2 (EES) C_3 (MVE), a_1 , a_2 , a_3 , m – эмпирические параметры, получаемые из результатов ускоренных испытаний; $E_{emi} = 0,26$ эВ – энергия эмиссии водорода с последнего связующего энергетического уровня (определена в рамках модели Браве [3]); k_B – постоянная Больцмана; T – температура; I_{ds} – ток стока; I_{bs} – ток подложки; V_{ds} – напряжение на стоке; W – ширина канала;

Несмотря на то, что данная модель хорошо описывает механизмы образования поверхностных состояний с физической точки зрения и имеет огромное преимущество перед устаревшей, но при этом до сих пор применяемой в качестве индустриальной, концепцией «удачливых» электронов, модель Браве можно применять для описания деградации приборных характеристик только в устройствах, не подвергающихся внешнему воздей-

ствию, способному повлиять на процесс образования поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. В качестве такого внешнего воздействия может выступать ионизирующее излучение космических лучей, способное оказывать влияние на надежность и деградацию приборных характеристик современных наноразмерных полевых транзисторов аппаратуры космического назначения.

Моделирование влияния космического излучения на надежность МОПТ

Согласно работам [4, 5] космическое излучение более чем на 80 % состоит из ядер протонов больших энергий ($10^8 - 10^{20}$ эВ), а интенсивность потока космического излучения в зависимости от энергии частиц описывается формулой:

$$I_N(E) \approx 1,8 \times 10^4 (E/1 \text{ ГэВ})^{-\alpha} \quad (2)$$

где $\alpha (\equiv \gamma + 1) = 2,7$; E – энергия частиц.

Можно предположить, что протоны космического излучения, обладающие большой начальной энергией, могут пройти сквозь структуру полевого транзистора, теряя при этом часть своей начальной энергии на ионизационных потерях, и достичь границы раздела Si/SiO₂. При достижении границы раздела протоны могут обладать энергией, достаточной для инициации процесса диссоциации Si-H связей по двум механизмам:

- механизм единичного возбуждения Si-H связи под воздействием протона (Single Vibration Excitation – SVE_p) – одиночный протон, обладающий достаточной для обрыва связи энергией, сталкивается с атомом водорода и инициирует процесс диссоциации Si-H связи;

- механизм ударной ионизации – по аналогии с описанным в модели Браве электрон-электронным рассеянием в данном случае может иметь место протон-электронное рассеяние (Proton-Electron Scattering – PES). Протон, обладающий энергией, не достаточной для обрыва Si-H связи, может передать необходимое количество энергии электрону канала, который, в свою очередь, сможет инициировать процесс диссоциации Si-H связи.

Согласно работам [3, 6] интенсивность образования поверхностных состояний R_{it} , как обратная функция от времени до наступления параметрического отказа $R_{it} = \frac{1}{\tau}$, являющаяся основой модели Браве, пропорциональна интегралу произведения двух функций:

$$R_{it} \propto \int f(E) \cdot S(E) dE \quad (3)$$

где $f(E)$ – функция распределения по энергиям, $S(E)$ – сечение реакции.

Таким образом, в случае расчета интенсивности образования поверхностных состояний из-за воздействия протонов космического излучения необходимо определить функцию распределения протонов по энергиям и сечение ядерной реакции взаимодействия протонов

космического излучения с атомами водорода в окисле и электронами канала.

Интенсивность потока космического излучения или дифференциальный поток есть не что иное, как функция распределения протонов космического излучения по энергиям, которая описывается уравнением (2). Таким образом, необходимо определить сечение ядерной реакции.

Согласно [7] сечение ядерной реакции можно определить как:

$$S(E) = \frac{dn}{jN} \quad (4)$$

где dn – число заданных реакций, j – плотность потока налетающих на мишень частиц, N – количество частиц мишени.

Согласно работе [8] интенсивность излучения определяется как:

$$I = \Phi \cdot E \quad (5)$$

где I – интенсивность потока, Φ – плотность потока, E – энергия.

Таким образом, необходимую для расчета эффективного сечения плотность потока протонов космического излучения можно определить, разделив уравнение (2), описывающее интенсивность потока космического излучения, на энергию:

$$j = I_N(E)/E \approx \frac{1,8 \cdot 10^4 (E)^{-2,7}}{E} \approx 1,8 \cdot 10^4 (E)^{-3,7} \quad (6)$$

Обозначив сечение ядерной реакции взаимодействия протонов космического излучения с атомами водорода в окисле через функцию $S_{SVEp}(E)$, принимая, что число атомов водорода в окисле находится как n – концентрация атомов водорода в окисле (в м^{-3}), L , W , T_{ox} – длина канала, ширина канала, толщина окисла соответственно, а число заданных реакций dn определяется как число образовавшихся поверхностных состояний $dN_{it}(E)$, получаем следующую формулу для расчета эффективного ядерного сечения реакции взаимодействия протонов космического излучения с атомами водорода в окисле:

$$S_{SVEp}(E) = \frac{dN_{it}(E)}{1,8 \cdot 10^4 \cdot (E)^{-3,7} \cdot n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} \quad (7)$$

Объединяя уравнение (2), описывающее функцию распределения протонов по энергиям, и уравнение (7), описывающее функцию зависимости эффективного сечения от энергии, получим выражение для интенсивности образования поверхностных состояний в случае SVEp механизма диссоциации Si-H связи:

$$R_{itSVEp} \propto \int 1,8 \times 10^4 (E)^{-2,7} \cdot \frac{dN_{it}(E)}{1,8 \cdot 10^4 \cdot (E)^{-3,7} \cdot n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} dE. \quad (8)$$

Вынося константы за знак интеграла, подставив все известные величины и решив интеграл, получаем:

$$R_{itSVEp} = C_4 \cdot \frac{dN_{it}(E)}{n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} \cdot \frac{E^2}{2} \quad (9)$$

где C_4 – коэффициент пропорциональности, получаемый эмпирически; $dN_{it}(E)$ – количество образовавшихся после взаимодействия протонов с атомами водорода поверхностных состояний, зависящее от начальной энергии протонов и интенсивности их потока; n – концентрация водорода в окисле; L – длина канала; W – ширина канала; T_{ox} – толщина окисла; E – энергия протонов космического излучения.

Для случая протон-электронного рассеяния, обозначив сечение ядерной реакции взаимодействия протонов космического излучения с электронами в канале через функцию $S_{PES}(E)$, полагая, что скорость электронов в канале пренебрежительно мала по сравнению со скоростью протонов космического излучения, считая их равномерно распределенными в канале с концентрацией, определяющейся как $N = \frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W$, где I_{sd} – ток, протекающий через канал от истока к стоку, e – заряд электрона, L – длина канала, W – ширина канала, получаем следующую формулу для расчета эффективного сечения ядерной реакции взаимодействия протонов космического излучения с электронами канала:

$$S_{PES}(E) = \frac{dN_{it}(E)}{1,8 \cdot 10^4 \cdot (E)^{-3,7} \cdot \frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W}. \quad (10)$$

По аналогии с взаимодействием протонов космического излучения с атомами водорода в окисле получаем для протон-электронного рассеяния выражение интенсивности образования поверхностных состояний:

$$R_{itPES} = C_5 \cdot \frac{dN_{it}(E)}{\frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W} \cdot \frac{E^2}{2}, \quad (11)$$

где C_5 – коэффициент пропорциональности, получаемый эмпирически;

По аналогии с моделью Браве, в которой все механизмы деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связи, являются независимыми, считая вклады в деградацию от механизмов, описанных уравнениями (9) и (11) также независимыми, объединим уравнение модели Браве (1) и уравнения (9), (11) и получим выражение расширенной модели Браве, физической модели прогнозирования надежности наноразмерных полевых транзисторов, учитывающей возможное влияние космического излучения:

$$R_{it} = \frac{1}{\tau} = \left[C_1 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W} \right)^{a_1} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}} \right)^m + C_2 \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W} \right)^{a_2} \cdot \left(\frac{I_{bs}}{I_{ds}} \right)^m + C_3 \cdot V_{ds}^{a_3/2} \cdot \left(\frac{I_{ds}}{W} \right)^{a_3} \cdot \exp \left(\frac{-E_{emi}}{k_B T} \right) \right] + \left[C_4 \cdot \frac{dN_{it1}(E)}{n \cdot L \cdot W \cdot T_{ox}} \cdot \frac{E_1^2}{2} + C_5 \cdot \frac{dN_{it2}(E)}{\frac{I_{sd}}{e} \cdot L \cdot W} \cdot \frac{E_2^2}{2} \right], \quad (12)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – коэффициенты пропорциональности, получаемые эмпирически, для SVE, EES, MVE, SVE_p и PES механизмов образования поверхностных состояний соответственно; a_1, a_2, a_3, m – эмпирические параметры, получаемые из результатов ускоренных испытаний (были определены в рамках модели Браве [3]), однако могут требовать уточнения для различных типов устройств); $E_{emi} = 0,26$ эВ – энергия эмиссии водорода с последнего связующего энергетического уровня (определена в рамках модели Браве [3]); k_B – постоянная Больцмана; T – температура; I_{ds} – ток стока; I_{sd} – ток протекающий в канале от истока к стоку; I_{bs} – ток подложки; V_{ds} – напряжение на стоке; L – длина канала; W – ширина канала; T_{ox} – толщина окисла; n – концентрация водорода в окисле; e – заряд электрона; $dN_{it}(E)$ – количество образовавшихся поверхностных состояний по SVE_p механизму, зависящее от начальной энергии протонов и интенсивности их потока, определяется по результатам ускоренных испытаний; dN_{it2} – количество образовавшихся поверхностных состояний по PES механизму, зависящее от начальной энергии протонов и интенсивности их потока, определяется по результатам ускоренных испытаний; E_1 – начальная энергия протонов космического излучения, способных достичь границы раздела Si/SiO₂ с конечной энергией, достаточной для инициации процесса образования поверхностных состояний по SVE_p механизму, определяется конструктивными особенностями устройств; E_2 – начальная энергия протонов космического излучения, способных достичь границы раздела Si/SiO₂ с конечной энергией, достаточной для инициации процесса образования поверхностных состояний по PES механизму, определяется конструктивными особенностями устройств.

Операнд уравнения (12), заключенный в квадратные скобки, непосредственно относится к модели, разработанной Браве и соавторами [3], тогда как операнд, заключенный в угловые скобки, относится к разработанному в рамках данной работы дополнению к модели Браве, позволяющему учитывать возможное влияние космического излучения на деградацию приборных характеристик, вызванную обрывом Si-H связей.

Заключение

В рамках данной работы было показано, что современные наноразмерные полевые транзисторы и электронные устройства на их основе по-прежнему подвержены деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей, несмотря на снижение напряжения питания и значения латерального электрического поля в канале.

Эмпирические и полуэмпирические модели прогнозирования надежности и деградации приборных характеристик, основанные на устаревшей, но по-прежнему применяющейся концепции «удачливых» электронов, не могут в полном объеме дать оценку надежности современных наноразмерных полевых транзисторов и электронных устройств на их основе.

Современные физические модели, такие как, например, модель Браве, позволят описать физические механизмы деградации приборных характеристик, вызванной обрывом Si-H связей, присущие современным наноразмерным полевым транзисторам и способны дать более точный прогноз надежности электронных устройств на их основе.

Разработанная в рамках данной работы модель основана на физической модели Браве. Данная модель расширяет модель Браве и позволяет учитывать возможное влияние космического излучения на деградацию приборных характеристик наноразмерных полевых транзисторов и, как следствие, позволяет дать расширенный прогноз надежности электронных устройств на их основе, потенциально пригодных для использования в аппаратуре космического назначения.

Библиографический список

1. Prabhakar M. Characterization and modeling of hot carrier degradation in sub-micron n-MOSFETs/ M. Prabhakar// Master's thesis, Nashville, Tennessee. – 2002. – P. 60.
2. White M. Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation/ M. White, J.B. Bernstein// California Institute of Technology. – 2008. – P. 210.
3. Grasser T. Hot Carrier Degradation in Semiconductor Devices/ T. Grasser// Springer International Publishing Switzerland, 2015. – P. 517.
4. Клапдор-Клайнротхаус Г.В. Астрофизика элементарных частиц/ Г.В. Клапдор-Клайнротхаус, К. Цюбер; под ред. В.А. Беднякова. – М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 2000. – 496 с.
5. Review of particle physics, Pt. 24: Cosmic Rays/ K. Nakamura et al.// J. Phys. – Vol. 37. – pp. 269 – 277.
6. Rauch S.E. The energy-driven paradigm of n-MOSFET hot carrier effects/ S.E. Rauch, G.L. Rosa// IEEE Transactions on Electron Devices and Materials Reliability. – 2005. – Vol. 5. – №4. – pp. 701 – 705.
7. Широков Ю.М. Ядерная физика/ Ю.М. Широков, Н.П. Юдин. – М.: Наука, 1980. – 728 с.
8. Лошаков И.И. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений: учебное пособие/ И.И. Лошаков. – Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет, 2008. – 145 с.

Сведения об авторах

Артем Н. Волков, разработчик текстовой документации 2 категории, ООО «Научно-производственное объединение Программные комплексы реального времени».

124683, Россия, Москва, Зеленоград, корпус 1546, кв. 113, тел.: +7 (905) 756–97–27, e-mail: artem.n.volkov@yandex.ru

Поступила 17.02.2016

К вопросу оптимизации технического содержания контактной сети

Владислав А. Володарский, кафедра систем обеспечения движения, Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия, e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

Алексей А. Орленко, Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия, e-mail: orlenkoai@yandex.ru



Владислав А.
Володарский



Алексей А.
Орленко

Резюме. Цель – предложить и исследовать математическую модель оптимизации технического содержания устройств контактной сети, отличающуюся учетом глубины восстановления ресурса. **Методы.** В результате анализа состояния вопроса предложена стратегия и математическая модель оптимизации технического содержания контактной сети как разновидность протяженного объекта, предусматривающая проведение предупредительных замен и предупредительных ремонтов с минимальным аварийным ремонтом при отказах контактной сети. Рассмотрены также частные случаи общей модели при проведении только предупредительных замен или только предупредительных ремонтов. Для учета глубины восстановления ресурса при проведении предупредительного ремонта использован параметр, означающий «возраст» протяженного объекта, определяемый как разница между его доремонтным и межремонтным ресурсом, отнесенная к доремонтному ресурсу. **Результаты.** При заданных значениях числа предупредительных ремонтов и глубины восстановления ресурса получены выражения для определения оптимальной периодичности предупредительных ремонтов и предупредительных замен контактной сети, а также оптимальных удельных эксплуатационных затрат. При заданных значениях периодичности предупредительных замен и глубины восстановления ресурса получено выражение для определения оптимального числа предупредительных ремонтов до замены контактной сети. **Выводы.** Для учета глубины восстановления ресурса после проведения ПР целесообразно использовать параметр, определяемый как разница между доремонтным и межремонтным ресурсом, отнесенная к доремонтному ресурсу контактной сети. Предлагаемая математическая модель оптимизации технического содержания позволяет при заданной глубине восстановления ресурса определять оптимальную периодичность предупредительных ремонтов и замен устройств контактной сети, а также оптимальное количество предупредительных ремонтов за период срока службы контактной сети.

Ключевые слова: ресурс, глубина восстановления, ремонт, замена, математическая модель, оптимизация.

Формат цитирования: Володарский В.А., Орленко А.А. К вопросу оптимизации технического содержания контактной сети // Надежность. 2016. №3. С. 23-25. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-23-25

Состояние вопроса

Под техническим содержанием согласно [1] будем понимать совокупность мероприятий, направленных на поддержание и восстановление работоспособного состояния техники и на восстановление ее ресурса.

В процессе эксплуатации контактной сети (КС) проводится техническое обслуживание (ТО), текущие (ТР) и капитальные (КР) ремонты, а также реконструкция, эквивалентная предупредительной замене (ПЗ) [2, 3]. При выполнении ТО в виде осмотров, обследований, испытаний и измерений устанавливается только техническое состояние КС [3]. При этом согласно [4] при выполнении ТР происходит только восстановление работоспособности, а при выполнении КР – кроме того и восстановление до определенного уровня ресурса устройств. Полное восстановление ресурса происходит только при замене устройств КС.

В настоящее время в теории надежности [5, 6] разработаны методические вопросы оптимизации ПЗ с

аварийными заменами (АЗ), когда полностью восстанавливаются первоначальная надежность устройств, или ПЗ с минимальным аварийным ремонтом (МАР) при отказах. В перечисленных публикациях учитываются только два крайних случая глубины восстановления ресурса: никакого обновления, когда выполняется МАР, и полное обновление, когда выполняется АЗ или ПЗ. Практический же интерес представляют промежуточные значения глубины восстановления ресурса между этими крайними случаями.

Цель статьи – предложить и исследовать математическую модель оптимизации технического содержания устройств КС, отличающуюся учетом глубины восстановления ресурса.

Стратегия и математическая модель оптимизации технического содержания

Для учета глубины восстановления ресурса предлагается использовать согласно [7] параметр $a = T_{др} - T_{мр}$,

означающий «возраст» контактной сети после проведения предупредительного капитального ремонта (ПР). Здесь $T_{др}$ и $T_{мр}$ – соответственно доремонтный и межремонтный ресурс [7]. В дальнейшем при разработке математических моделей оптимизации технического содержания для оценки глубины восстановления ресурса целесообразно использовать безразмерный параметр $\alpha = a/T_{др}$. Если $\alpha = 0$, то это означает, что проведена замена КС. Если проводится ПР, например, через время τ , то «возраст» КС уменьшается от τ до $\alpha\tau$.

КС с позиций обеспечения надежности относится к объектам большой протяженности с множеством последовательно соединенных различных элементов. В процессе устранения отказов восстанавливается только отдельный поврежденный участок КС (в терминах теории надежности это МАР), что практически не изменяет текущих показателей надежности КС в целом. В связи с этим рассмотрим стратегию технического содержания, при которой отказы работоспособности устраняются МАР, а после проведения n ПР осуществляется замена КС.

Характер изменения интенсивности отказов (ИО) от времени эксплуатации при этой стратегии представлен на рис. 1. После проведения МАР значение ИО не изменяется. После проведения ПР с периодичностью x и глубиной восстановления ресурса α ИО снижается до значения $\lambda(\alpha)$, а после проведения ПЗ с периодичностью x_p – до нуля. ИО в момент проведения ПР и ПЗ составляет $\lambda(x+\alpha)$. Здесь значения x и x_p измеряются в единицах ресурса.

Математическая модель оптимизации технического содержания КС при этой стратегии определяется из выражения

$$y = (1 + n\gamma + \varepsilon \int_0^{x_p} \lambda(x) dx) / x_p, \quad (1)$$

где y – относительные удельные эксплуатационные затраты;

γ – параметр стоимости ПР;

ε – параметр стоимости МАР;

λ – ИО;

Количество отказов на интервале $0 - x_p$ определится как

$$\begin{aligned} \int_0^{x_p} \lambda(x) dx &= \int_0^{\alpha} \lambda(x) dx + (n+1) \int_{\alpha}^{x+\alpha} \lambda(x) dx = \\ &= n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P(x+\alpha), \end{aligned} \quad (2)$$

где P – вероятность безотказной работы.

Подставив значения $\int_0^{x_p} \lambda(x) dx$ из (2) в (1), и учитывая, что $x_p = \alpha + (n+1)x$, получим математическую модель вида

$$y = \frac{1 + n\gamma + \varepsilon (n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P(x+\alpha))}{\alpha + (n+1)x}. \quad (3)$$

Рассмотрим два частных случая модели (3):

при $n = 0$ (проводятся только замены, которые полностью восстанавливают первоначальный ресурс), когда $\alpha = 0$, получим математическую модель вида

$$y = (1 - \varepsilon \ln P(x)) / x,$$

которая известна как модель ПЗ с минимальным аварийным ремонтом при отказе [5];

при $n \rightarrow \infty$ (проводятся только ПР, которые частично восстанавливают первоначальный ресурс) после раскрытия неопределенности в выражении (3) получим математическую модель вида

$$y = (\gamma - \varepsilon (\ln P(x+\alpha) - \ln P(\alpha))) / x,$$

которая известна как модель ПР с МАР при отказе [7].

С использованием выражения (3) при заданных значениях n и α оптимальная периодичность ПР x_0 и минимум удельных эксплуатационных затрат y_0 определим из условия $\partial y / \partial x = 0$ как

$$\begin{aligned} (\alpha + (n+1)x_0) \lambda(x_0 + \alpha) + (n+1) \ln P(x_0 + \alpha) - \\ - n \ln P(\alpha) = \frac{(1 + n\gamma)}{\varepsilon}; \\ y_0 = \varepsilon \lambda(x_0 + \alpha). \end{aligned}$$

Периодичность ПР может быть определена из выражения

$$x = (x_p - \alpha) / (n+1). \quad (4)$$

$$\text{Тогда } x + \alpha = (x_p + n\alpha) / (n+1). \quad (5)$$

Подставив полученные значения x из (4) и $x + \alpha$ из (5) в выражение (3), преобразуем его к виду

$$y = \left(1 + n\gamma + \varepsilon \left(n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P \left(\frac{x_p + n\alpha}{n+1} \right) \right) \right) / x_p \quad (6)$$

С использованием выражения (6) при заданных значениях n и α оптимальную периодичность ПЗ x_{p0} и минимум удельных эксплуатационных затрат найдем из условия $\partial y / \partial x_p = 0$ как

$$\begin{aligned} x_{p0} \lambda \left(\frac{x_{p0} + n\alpha}{n+1} \right) + (n+1) \ln P \left(\frac{x_{p0} + n\alpha}{n+1} \right) - \\ - n \ln P(\alpha) = \frac{(1 + n\gamma)}{\varepsilon}; \\ y_0 = \varepsilon \lambda \left(\frac{x_{p0} + n\alpha}{n+1} \right). \end{aligned}$$

С использованием выражения (6) при заданных значениях x_p и α оптимальное количество ПР n_0 определим из условия $\partial y / \partial n = 0$ как

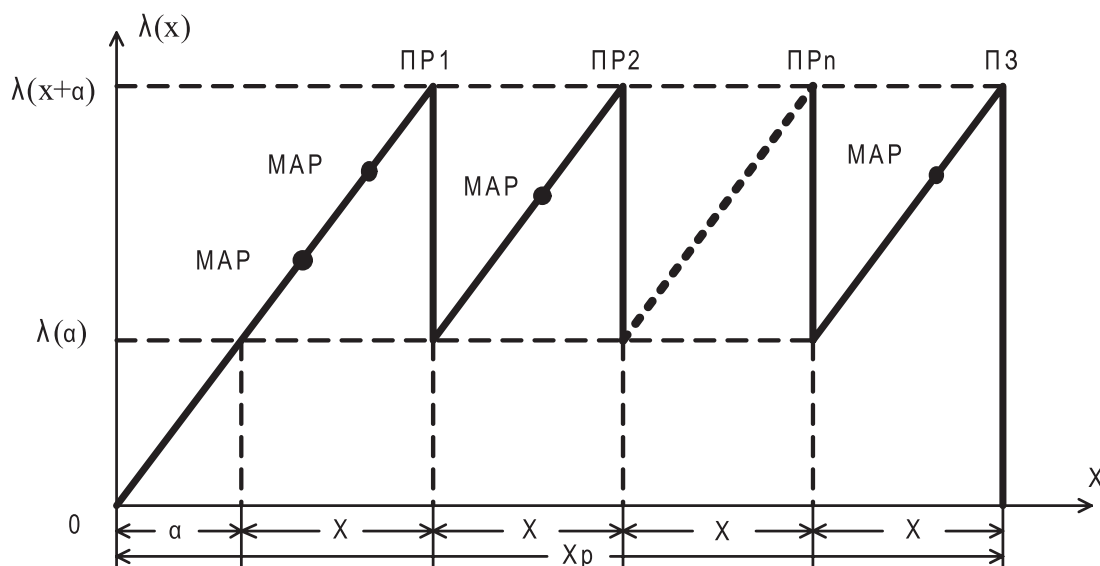


Рис. 1. Изменение ИО в случае ПР и ПЗ с МАР

$$\frac{x_p - \alpha}{n_0 + 1} \lambda \left(\frac{x_p + n_0 \alpha}{n_0 + 1} \right) + \ln P \left(\frac{x_p + n_0 \alpha}{n_0 + 1} \right) - \ln P(\alpha) = \gamma / \varepsilon.$$

Заключение

Для учета глубины восстановления ресурса после проведения ПР целесообразно использовать параметр, определяемый как разница между доремонтным и межремонтным ресурсом, отнесенная к доремонтному ресурсу КС.

Предлагаемая математическая модель оптимизации технического содержания позволяет при заданной глубине восстановления ресурса определять оптимальную периодичность ПР и замены КС, а также оптимальное количество ПР за период срока службы КС.

Библиографический список

1. ГОСТ 32192-2013 Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. СТО РЖД 1.12.001-2007 Устройства электрификации и электроснабжения. Техническое обслуживание и ремонт. Общие требования.
3. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог

(ЦЭ – 868). – М.: Трансиздат, 2002. – 184 с.

4. ГОСТ 18322 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

5. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1961. – 488 с.

6. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.

7. Володарский В.А. К вопросу оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств // Надежность. – 2011. – № 2. – С. 49-59.

Сведения об авторах

Владислав А. Володарский, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор, Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия, тел. +7 (391) 221 60 72, e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

Алексей И. Орленко, кандидат технических наук, доцент, Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия, тел. +7 (391) 271 67 40, e-mail: orlenkoai@yandex.ru

Поступила 29.02.2016

Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многообразных воздействиях высокой точности (часть 2)

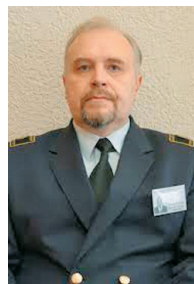
Геннадий Н. Черкесов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gennady.cherkesov@gmail.com

Алексей О. Недосекин, Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: apostolfoma@gmail.com

ЧАСТЬ 2. МНОГОВАРИАНТНЫЕ РАСЧЁТЫ



Геннадий Н.
Черкесов



Алексей О.
Недосекин

Резюме. Цель. Рассматриваются основные понятия и определения, показатели живучести, методы оценки живучести в различных внешних и внутренних условиях применения технических систем. В том числе, обозреваются наработки в области структурной живучести, полученные 30 лет назад, в рамках советской научной школы. Делается попытка преодолеть различное понимание технической живучести, которое к сегодняшнему моменту сложилось по ряду отраслевых направлений – в судостроении, авиации, сетях связи, в системах энергетики, в оборонном ведомстве. Также рассматривается вопрос об установлении отношений преемственности между свойством технической живучести и свойством глобальной системной устойчивости. Техническая живучесть понимается в двух базовых значениях: а) как свойство системы сопротивляться негативным внешним воздействиям; б) как свойство системы восстанавливать свою работоспособность после отказа или аварии, вызванных внешними причинами. В работе рассматривается связь между структурной живучестью, когда логика работоспособности системы бинарна и описывается логической функцией работоспособности, и функциональной живучестью, когда работа системы описывается критерием функциональной эффективности. Тогда отказ системы – это падение уровня её эффективности ниже заранее предустановленного значения. **Методы.** Техническая система рассматривается как управляемая кибернетическая система, которой приданы специализированные средства обеспечения живучести (СОЖ). В анализе использованы логико-вероятностные методы и результаты комбинаторной теории случайных размещений. Предполагается: а) негативные внешние воздействия являются точечными и однократными (за одно воздействие поражается ровно один элемент); б) каждый элемент системы обладает бинарной логикой (работоспособность – отказ) и нулевой стойкостью, то есть гарантированно поражается за одно воздействие. В последующем, данное допущение обобщается на случай g -кратного негативного внешнего воздействия и L -стойких элементов. Также в работе рассматриваются варианты неточечных моделей, когда часть системы или система в целом подвергаются групповому поражению специализированного типа. Рассмотрены варианты сочетания свойств надёжности и живучести, когда анализу подвергаются одновременно отказы по внутренним и по внешним причинам. **Результаты.** Воспроизведены различные варианты законов поражения и функций живучести технических систем. Выявлено, что в основе этих распределений лежат простые и обобщённые числа Моргана, а также числа Стирлинга второго рода, которые могут быть восстановлены на основе простейших рекуррентных соотношений. Если допущения математической модели обобщаются на случай n g -кратных негативных внешних воздействий и L -стойких элементов, то обобщённые числа Моргана, участвующие в оценке закона поражения, определяются на основе теории случайных размещений, в ходе n -кратного дифференцирования производящего полинома. В этом случае установить рекуррентное соотношение между обобщёнными числами Моргана не представляется возможным. Показано, что при однородных допущениях к модели живучести (равностойкие элементы системы, равновероятные негативные внешние воздействия) в ядре соотношений для функции живучести системы, вне зависимости от закона поражения, находится вектор структурной избыточности $F(u)$, где u – число поражённых элементов, $F(u)$ – число работоспособных состояний технической системы при u отказах. **Выводы.** Точечные модели живучести являются превосходным инструментом для экспресс-анализа структурно-сложных систем и для получения приближённых оценок функций живучести. Простейшие допущения структурной живучести могут быть обобщены на случай, когда логика работоспособности системы не является бинарной, но обуславливается уровнем эффективности функционирования системы. В этом случае надо говорить о функциональной живучести. Вычислительная трудность PNP задачи оценки живучести не позволяет решать её путём простейшего перебора состояний технической системы и вариантов негативных внешних воздействий, необходимо искать пути отхода от полного перебора, в том числе за счёт преобразования функции

работоспособности системы и её декомпозиции. Проектирование и внедрение свойства живучести в техническую систему должно проходить с оглядкой на то, как такое свойство обеспечено в биологических и социальных системах.

Ключевые слова: живучесть, витальность, устойчивость, риск, неблагоприятное воздействие, запас живучести, закон уязвимости, функция живучести.

Формат цитирования: Черкесов Г.Н., Недосекин А.О. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности (часть 2) // Надежность. 2016. №3. С. 26-34. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-26-34

1. Предисловие

В [1] мы дали общее определение технической живучести, классифицировали основные подходы к анализу живучести, предложили простейшие модели и методы анализа живучести, основанные на математике теории аксиологических вероятностей, случайных размещений и логических функций работоспособности. В данной второй части работы мы обсуждаем четыре основных вопроса:

- вычислительная трудность задач живучести;
- многовариантные расчёты живучести структурно-сложных систем;
- понятие функциональной живучести и её связь со структурной живучестью;
- связь между технической живучестью и мобилизационной экономической устойчивостью.

2. Вычислительная трудность задач живучести и пути её преодоления

Задача живучести ставится и решается на декартовом произведении двух логико-вероятностных пространств: пространства неблагоприятных воздействий (НВ) и пространства состояний технической системы. В простейшем случае, оба эти пространства являются дискретными. В соответствии с терминологией классического труда [2], задача о размещении НВ по элементам системы является P -полной или P -трудной, т.е. количество вычислений и время вычислений пропорциональны числу N^n , где n – число воздействий, а N – число элементов системы. Уже давно известно, что для современных вычислительных машин P -полнота не составляет никакой трудности, пусть даже n оценивается сотнями или тысячами, что в реальности невозможно. Другое дело – задача выделения полной группы возможно работоспособных состояний, когда из системы в N элементов последовательно изымается от 1 до $N-1$ элементов. Поскольку в задачах структурной живучести элемент может пребывать в одном из «противоположных» состояний – работоспособности или отказа (бинарная логика), то полное число состояний системы, подлежащее перебору, составляет 2^N , и этому же числу соответствует сложность вычислений. Таким образом, задача живучести становится NP -трудной и имеет свои фиксированные пределы сложности.

Когда логико-вероятностные методы анализа ещё только пробивали себе дорогу в науке (80-е годы прошлого века), а наиболее ходовыми вычислительными

машинами в СССР были ЕС ЭВМ различных модификаций, было экспериментально установлено предельное число элементов системы, превышение которого не позволяло получать решение задачи анализа живучести за обозримое время. Этим числом было $N = 23$. Все попытки увеличить эту размерность не увенчивались успехом, пока не было найдено несколько подходов к тому, чтобы перейти от прямого перебора состояний к перебору **направленному**. В результате работа школы проф. А.С. Можаяева и его последователей [3 – 5] привела к тому, что оказалось возможным декомпонировать граф сложной системы на основной граф и его подграфы (узловые раскрытия), а также разработать логические схемы направленного перебора в пространстве состояний. В результате сегодня предельное число элементов в основном графе составляет 400, а в подграфе – 100 (данные по программному комплексу «АРБИТР»).

Таким образом, преодоление «проклятия размерности» применительно к задачам структурной живучести состоялось. Но выиграна всего лишь первая позиционная война. Потому что при переходе от структурной живучести к функциональной пространство состояний технической системы перестаёт быть счётным, и «проклятие размерности» возвращается, но уже в пугающей форме. Подробнее об этой особенности – см. раздел 5 настоящей работы. Аналогичным образом, решение задачи структурной живучести резко осложняется, если кратность воздействия составляет r , а стойкость элемента – L (или дискретная стойкость в модели замещается вероятностной функцией стойкости).

Перейдём теперь к изложению простейших примеров анализа живучести (эти решения впервые продемонстрированы в [6], включая все рисунки и таблицы раздела 3). Все представленные примеры хорошо просчитываются вручную и могут выступать в качестве тестов для новых алгоритмов анализа как вырожденные случаи.

3. Расчет структурной живучести по состоянию системы для простейших структур.

3.1. Система со структурой типа «мостик» с пятью элементами.

Система с мостиковой структурой (рисунок 1) подвергается многократным точечным неблагоприятным воздействиям. Необходимо дать оценку живучести по

состоянию системы, полагая, что поражение элементов при однократном НВ равновероятно, а стойкость элементов по отношению к интенсивности НВ высокой точности ничтожно мала.

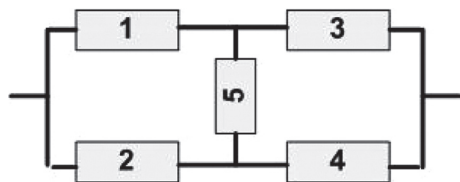


Рис. 1. Система с мостиковой структурой

Логическая функция работоспособности в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме (ОДНФ) имеет вид [7, глава 4]:

$$F = x_1 x_3 \vee x_1' x_2 x_4 \vee x_1 x_2 x_3' x_4 \vee x_2' x_3' x_1 x_4 x_5 \vee x_1' x_4' x_2 x_3 x_5. \quad (1)$$

Воспользуемся формулами (31) и (32) из [1], полагая в них $m = 5$, $s_1 = 2$, $N = 5$, $s_2 = 3$, $s_3 = 4$, $s_4 = s_5 = 5$, и получим

$$R(n) = (1 - s_1 / N)^n + \sum_{k=2}^3 \sum_{i=1}^n C_n^i N^{-i} (1 - s_k / N)^{n-i} + 2N^{-n} \sum_{i=1}^{n-1} C_n^i = 2(0,6)^n + 2(0,4)^n - 5(0,2)^n. \quad (2)$$

Значения $R(n)$ при $n \leq 5$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Функция $R(n)$

n	1	2	3	4	5	6	7
$R(n)$	1	0,84	0,52	0,3024	0,1744	0,1012	0,0592

Воспользуемся теперь формулами (33) – (37) из [1] для определения $R(n)$. Для этого по формуле (37) составим таблицу коэффициентов L_{nk} (табл. 2) и заметим, что она не зависит от характеристик системы (структуры и числа элементов). Поэтому ее можно использовать как общую таблицу, пригодную для расчета живучести любых систем. В табл. 3 приведены значения коэффициентов B_{ki} для девяти работоспособных структур, получаемых из базовой структуры удалением одного, двух или трех элементов (рисунок 2).

Таблица 2. Числа L_{nk}

n	L_{nk}						
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	2	0	0	0	0	0
3	1	6	6	0	0	0	0
4	1	14	36	24	0	0	0
5	1	30	150	240	120	0	0
6	1	62	540	1560	1800	720	0
7	1	126	1806	8400	16800	15120	5040

Таблица 3. Числа B_{ki}

k	B_{ki}								
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	3	3	1	1
3	0	0	0	0	0	1	1	0	0

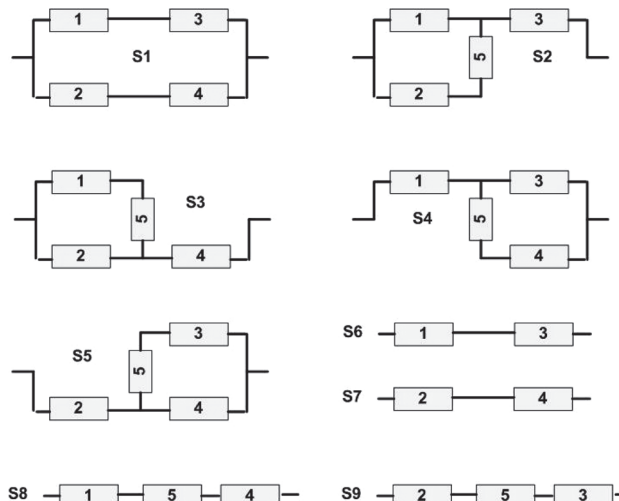


Рис. 2. Работоспособные структуры, получаемые из базовой мостиковой структуры

Умножая строки матрицы $||L_{nk}||$ на столбцы матрицы $||B_{ki}||$, получим матрицу коэффициентов r_{ni} , выражающих число способов, которыми при n -кратном НВ можно перейти от базовой структуры S_0 к структуре S_i (табл. 4). Складывая элементы одной строки, найдем число различных несовместных событий, приводящих при n -кратном НВ к работоспособной структуре. Нетрудно убедиться, что значения $R(n) = r_n / N^n$ совпадают с приведенными в таблице 4.

Используя формулы (5) из [1] и (2), найдем среднее число НВ, приводящее к потере работоспособности:

$$\bar{\omega} = \sum_{n=0}^{\infty} R(n) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \{2(0,6)^n + 2(0,4)^n - (0,2)^{n-1}\} = 4,083 \quad (3)$$

Таблица 4. Числа r_{ni}

n	r_{ni}					r_n	N^n
	$i=1..5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$		
1	1	0	0	0	0	5	5
2	1	6	6	2	2	21	25
3	1	24	24	6	6	65	125
4	1	78	78	14	14	189	625
5	1	240	240	30	30	545	3125
6	1	726	726	62	62	1581	15625
7	1	2184	2184	126	126	4625	78125

Средний запас живучести $\bar{d} = 3,083$. Следует обратить внимание на то, что для данной структуры $d = 2$, а $m = 3$. Следовательно, средний запас живучести больше максимального числа элементов, которое может быть удалено без потери работоспособности, больше m -живучести. Этот эффект объясняется тем, что некоторые элементы попадают в область действия НВ несколько раз.

Система расчёта настоящего параграфа, основанная на числах Стирлинга 2-го рода, была полностью описана в [6] и в [10].

3.2. Электроэнергетическая система со структурой типа «мостик» с восемью элементами.

Электроэнергетическая система состоит из генераторов 1 и 2, главных распределительных щитов 3 и 4, переключки 8, кабелей 5 и 6, распределительного щита 7 (рисунок 3). Необходимо дать оценку живучести по состоянию системы после многократного НВ, полагая, что при каждом НВ становится неработоспособным ровно один элемент системы, а поражение элементов при однократном НВ равновероятно.

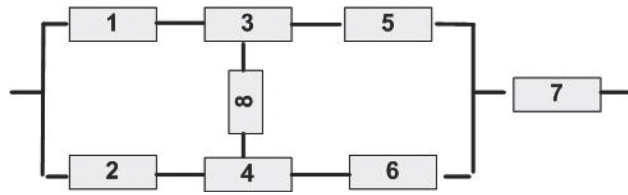


Рис. 3. Структура электроэнергетической системы

Логическая функция работоспособности системы имеет вид:

$$F = x_7(x_1x_3(x_5 \vee x_4x_6x_8) \vee x_2x_4(x_6 \vee x_3x_5x_8)) \quad (4)$$

ОДНФ:

$$F = x_1x_3x_5x_7 \vee x_1x_2x_4x_6x_7 \vee x_1x_2x_3x_4x_6x_7 \vee x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7 \vee x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7x_8 \vee x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7x_8. \quad (5)$$

Таким образом, ЛФРС содержит всего 6 импликант, в том числе одну без отрицаний, три с одним отрицанием и две с двумя отрицаниями. Вероятности

$$P(Q_l = 1 / A_n) = 2^{-n};$$

$$P(Q_l = 1 / A_n) = \sum_{j=1}^n C_n^j N^j (1 - s_1 / N)^{n-j},$$

$$l = 2, 3, 4; s_2 = 5, s_3 = 6, s_4 = 7$$

$$P(Q_l = 1 | A_n) = \sum_{j=1}^{n-1} C_n^j N^{-n}, N = 8, s_5 = s_6 = 8. \quad (6)$$

Согласно (1) имеем:

$$\sum_{l=1}^6 P(Q_l = 1 | A_n) = 2^{-n} + 8^{-n} (4^n + 2^{n+1} - 5) = 2^{-n+1} + 2^{-2n+1} - 5 \times 2^{-3n}. \quad (7)$$

Результаты расчетов по формуле (7) приведены в табл. 5.

Таблица 5. Функция живучести $R(n)$

n	1	2	3	4	5	6
$R(n)$	7/8	35/64	139/5122	539/4096	2107/32768	8315/262144
$R^*(n)$	7/8	1/2	8/56	1/35	0	0

В последней строке указаны данные расчетов при стратегии 2, когда пораженные элементы исключаются из повторного поражения.

Среднее число НВ

$$\bar{\omega} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \{2(0,5)^n + 2(0,25)^n - 5(0,125)^n\} = 2,9524$$

Средний запас живучести $\bar{d} = 1,9524$. Это существенно меньше, чем m -живучесть (здесь $m = 4$). Выживаемость системы находят с помощью формул (33) – (37) из [1]. Учитываем, что кроме базовой структуры система может иметь еще девять различных работоспособных деградированных структур ($i=1 \dots 9$). Для этого определим сначала коэффициенты B_{ki} (табл. 6).

Таблица 6. Числа B_{ki}

k	B_{ki}				
	$i=1 \dots 5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$
1	1	1	1	0	0
2	0	6	6	1	1
3	0	4	4	0	0
4	0	1	1	0	0

Структуры $S_1 \dots S_5$ возникают при потере только одного элемента ($k = 1$), а именно: 1, 2, 5, 6, 8. Структура S_6 (1357) может возникнуть при потере одного (4), двух (24, 26, 46, 82, 84, 86), трех (246, 248, 268, 468) или четырех (2, 4, 6, 8) элементов. Аналогично структура S_7 (2467) возникает при потере 1, 2, 3 или 4 элементов. Их количество такое же, как и для структуры S_6 . Структура S_8 (работоспособны элементы 138467) возникает при потере двух элементов (25), а S_9 (248357) при потере двух элементов: 1 и 6.

Используя данные таблиц 2 и 6, вычислим r_{ni} . Результаты приведены в табл. 7.

Видим, что результаты в таблицах 5 и 7 совпадают. Анализ данных таблицы 7 позволяет установить интересную закономерность. Отношение r_{ni}/r_n выражает

Таблица 7. Числа r_{ni}

n	r_{ni}					r_n	N^n	R_n
	$i=1...5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$			
1	1	1	1	0	0	7	8	0,875
2	1	13	13	2	2	35	64	0,546875
3	1	61	61	6	6	139	512	0,271484
4	1	253	253	14	14	539	4096	0,131592
5	1	1021	1021	30	30	2107	32768	0,064301

условную вероятность сохранения структуры S_i , после n -кратного НВ при условии, что система осталась работоспособной. Как видно из результатов расчета (табл. 8), только для одного типа структуры (S_6 и S_7) условная вероятность растет при увеличении числа НВ, и эта структура избыточна и обладает наименьшим числом элементов. Уже при $n = 5$ на долю структур S_6 и S_7 приходится 97% всех случаев, когда система сохраняет работоспособность.

Таблица 8. Условные вероятности

n	r_{ni} / r_n		
	$i = 1...5$	$i = 6,7$	$i = 8,9$
1	0,1429	0,1429	0
2	0,0286	0,3714	0,0571
3	0,0072	0,4388	0,0432
4	0,0019	0,4694	0,0260
5	0,0005	0,4846	0,0142

При стратегии 2, когда пораженные элементы исключаются из области действий следующих НВ, и равновероятном поражении оставшихся работоспособных элементов расчет функции выживаемости проводят по формуле:

$$R^*(n) = \sum_{i=1}^l C_{N-s_i}^{n-k_i} / C_N^n, \quad (8)$$

где l – число импликант в ОДНФ, s_i – число букв в импликанте, k_i – число отрицаний. Результаты расчетов приведены в таблице 8. Видно, что функция выживаемости убывает значительно быстрее, чем в схеме независимых НВ (при «пассивной стратегии»). Среднее число НВ до поражения $\bar{\omega} = 2,547$. Это также меньше, чем при стратегии 1.

В целом можно говорить о существовании вектора чисел работоспособных состояний системы $F_N(u)$, $u = 0...N$, где u – число единомоментно удаляемых из системы элементов. Соотношение

$$f(u) = F_N(u) / C_N^u \quad (9)$$

– это условная вероятность того, что при кратном поражении u элементов в системе из N элементов

система сохраняет работоспособность. Тогда (8) переписывается в виде

$$R^*(n) = f(n) \quad (10)$$

Вектор $F_N(u)$ характеризует **структурную избыточность** в системе и её профиль. Причём проявление этой избыточности в интересах живучести сохраняется при любом распределении вероятностей НВ. Эта же избыточность работает в равной степени и на надёжность. Например, вероятность безотказной работы невосстанавливаемой структурно-сложной системы из однородных элементов

$$P(t) = F_N(0) * p(t)^N + F_N(1) * p(t)^{N-1} (1 - p(t)) + \dots + F_N(N-1) * p(t) (1 - p(t))^{N-1}, \quad (11)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы одного элемента системы. Безотказность такой системы тем больше, чем выше $F_N(u)$. Это вполне подробно показано в [14].

Можно перейти от оценки живучести по состоянию к оценке живучести по результату выполнения задания. Такая работа с высокой степенью подробности проведена в [6], причём за основу в расчётах взяты те же самые структуры: мостик из 5 элементов и электроэнергетическая структура из 8 элементов. Оценка живучести в этой постановке позволяет гибридизировать отдельные свойства живучести и надёжности, получая новые комплексные свойства НВ-безотказности, НВ-безопасности и др. [11, 12].

Структурная живучесть многополюсных технических систем

Рассмотрим варианты построения технической системы на многополюсной основе, когда система может быть отображена многополюсным графом, в котором узлы (без нарушения общности) являются неподверженными НВ, а воздействию подвергаются только связи в графе. Одним из возможных критериев неработоспособности такой системы является появление в ней изолированных узлов или обособленных подграфов.

Характерный пример – сеть связи, когда узлы связи надёжно защищены от НВ, а воздействию подвергаются линии связи, путём наведения различного рода помех и собственно разрушения линий. Если какой-либо узел (или группа узлов) останется без связи, система лишится критически важного источника информации или функции управления. Фактически, она рассыплется на ряд подсистем, каждая из которых начнёт функционировать автономно; и это событие признаётся нами фактом потери живучести.

Также без нарушения общности, предположим, что дуги из графа многополюсной системы выбиваются по очередности, т.е. исключаются из области поражения

новых НВ. Тогда наша задача состоит в том, чтобы сформировать вектор избыточности системы $F_N(u)$, а затем применить формулы (9) – (10) для оценки её вероятности выживания при n однократных НВ.

Рассмотрим две многополюсные системы, последовательно на четырёх и пяти узлах (рисунок 4), в двух конфигурациях – неизбыточной, когда узлы замкнуты в кольцо, и полно-избыточной, когда обеспечивается соединение между узлами по принципу «каждый с каждым».

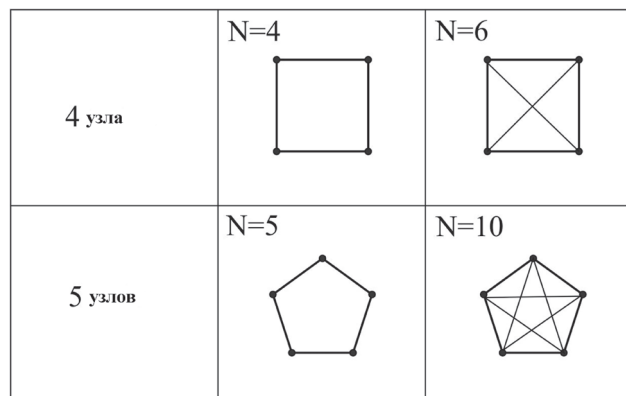


Рис. 4. Различные конфигурации многополюсных систем

Четырёхполюсник, неизбыточная система (N=4). Легко видеть, что первое НВ при активной стратегии не выводит систему из строя (это же справедливо и для структур с большим количеством полюсов). Зато любое второе НВ автоматически переводит систему в неработоспособное состояние. Соответственно, справедливо:

$$R(n) = 1 \text{ при } n \leq 1 \text{ и } R(n) = 0 \text{ при } n \geq 2.$$

Соответственно, функция живучести приобретает пороговый вид, и это говорит об отсутствии живучести в принципе, что обусловлено её неизбыточностью.

Четырёхполюсник, полно-избыточная система (N=6). Здесь видно, что система из $N=6$ связей сохраняет свою работоспособность при двухразовом НВ любой направленности (во всех случаях система сохраняет связность). И даже существует 4 сценария выживания системы при 3-разовом воздействии (из 20 возможных

Таблица 9. Функция живучести для полно-избыточной системы на 4 узлах

n	$F_6(n)$	C_6^n	$R^*(n) = f(n)$
0	1	1	1
1	6	6	1
2	15	15	1
3	4	20	0,2
≥ 4	0		0

сценариев). Соответственно, результаты оценки функции живучести сведены в табл. 9.

Здесь уже возникает элемент некоей плавной деградации, но эта плавность, тем не менее, оставляет желать лучшего. Плавность возникнет, когда наряду с основными дугами в графе многополюсной системы, в системе появятся дополнительные резервные дуги (например, каналы, основанные на другом принципе кодирования и приёма-передачи информации). Условно говоря, когда из строя выходит цифровая связь, есть возможность воспользоваться классической радиосвязью.

Пятиполюсник, неизбыточная система (N=5). По аналогии с неизбыточным четырёхполюсником, мы видим, что первое НВ при активной стратегии не выводит систему из строя, а любое второе – выводит. Значит, опять имеем дело с пороговой функцией живучести:

$$R(n) = 1 \text{ при } n \leq 1 \text{ и } R(n) = 0 \text{ при } n \geq 2.$$

Пятиполюсник, полно-избыточная система (N=10). Система сохраняет свою работоспособность при трёхразовом НВ любой направленности. При $n = 4$ появляются первые сценарии деградации (оказывается возможным изолировать один из 5 узлов). При $n = 7$ и выше система однозначно погибает. Соответственно, результаты оценки функции живучести сведены в табл. 10.

Таблица 10. Функция живучести для полно-избыточной системы на 5 узлах

n	$F_{10}(n)$	C_{10}^n	$R^*(n) = f(n)$
0	1	1	1,0
1	10	10	1,0
2	45	45	1,0
3	120	120	1,0
4	205	210	0,976
5	222	252	0,881
6	5	210	0,024
≥ 7	0		0

Здесь мы уже имеем действительно плавную деградацию свойства живучести. И, чем больше N , тем плавнее эта деградация реализуется с ростом n .

Аналогичные результаты можно получить, сделав НВ r -кратным и придать дугам в графе уровень стойкости L (аналог системы резервирования каналов). В этом случае следует использовать соотношение из [8]. Но это не изменит базового принципа: чем выше уровень избыточности, измеряемый по вектору F , тем выше и уровень живучести системы в отношении НВ широкого спектра.

Функциональная живучесть и принципы её анализа

Качественный скачок от структурной живучести к функциональной совершается за счёт того, что бинарная функция работоспособности в задачах структурной живучести замещается уровнем допустимой потери эффективности. Пусть система характеризуется базовым свойством, по которому оценивается её функционирование (например: в электроэнергетической системе – располагаемая мощность, в системе газоснабжения – пропускная способность газотранспортной системы). Тогда можно зафиксировать уровень ε в процентном отношении от максимума значения системного эффекта, когда мы говорим, что если эффективность системы по результатам НВ становится ниже ε в процентном отношении, то живучесть системой утрачена.

И тогда **функциональная живучесть** – это способность системы сохранять свой эффект на уровне не хуже ε от максимума в условиях НВ или быстро восстанавливать требуемый уровень после НВ. Например, в теории гражданской обороны существует принцип технологической брони $\varepsilon=30\%$, когда обесточиваются неосновные потребители, а вся энергия пускается только на бытовые нужды населения. И есть ещё уровень аварийной брони $\varepsilon=10\%$, когда электроэнергию получает уже не всё население, а только отдельные выделенные значимые центры потребления (больницы, родильные отделения и т.п.). И научная задача оценки и обеспечения функциональной живучести состоит в том, чтобы таким образом распределить средства обеспечения живучести (СОЖ) и располагаемую избыточность, таким образом настроить алгоритмы системной реконфигурации, чтобы минимизировать вероятность потери технологической и аварийной брони в случаях НВ широкого спектра. Подробно ε -критерий рассматривается нами в работах [9, 13, 15 – 17].

Когда НВ является точечным, мы находимся в дискретном пространстве состояний НВ. Такого пространства у нас нет, если мы оцениваем варианты площадного поражения, когда в ходу непрерывный спектр НВ. Аналогичным образом, переходя от структурной живучести к функциональной, мы лишаемся дискретного пространства состояний системы, оно становится непрерывным и несчётным. Вместо логической функции работоспособности мы имеем дело с **алгоритмом** обеспечения живучести при НВ, как своеобразным чёрным ящиком, у которого на входе – модель НВ, а на выходе – результирующий эффект. Если вход представляет собой непрерывный спектр воздействия, то на выходе – непрерывный спектр результирующих состояний.

И первое, что приходит в голову в этом случае – попытаться упростить задачу, заменить непрерывное пространство состояний дискретным. Например, в [17] мы оговариваем, что разовое НВ состоит в том, что выхватывает из системы определённый квант располагаемой мощности, и задача большой электроэнергетической си-

стемы состоит в том, чтобы своими средствами перераспределить нагрузку и покрыть возникший дефицит. По мере нарастания НВ система начинает деградировать, её запасы по располагаемой мощности исчерпываются, и однажды мы выходим за уровень технологической брони; и нужно оценить, какова вероятность такого негативного развития событий.

Приступив к решению задачи, мы обнаружили, что в состоянии заместить непрерывное пространство состояний дискретным, фиксируя конкретный уровень ε в анализе. Фактически, ε -критерий подобен фиксированной частоте, на которой мы сканируем систему, выделяя полное множество её работоспособных состояний. Если сделать перебор пространства состояний направленным (например, с помощью метода ветвей и границ), то можно существенно снизить объём операций; при этом *NP*-полнота задачи никуда не девается.

И тогда можно переписать выражения (9) и (10) следующим образом:

$$R^*(n, \varepsilon) = f(n) = F_N(n, \varepsilon) / C_N^n, \quad (12)$$

где $F_N(n, \varepsilon)$ – число работоспособных состояний системы из N элементов, подверженной n -разовому точечному НВ, в предположении, что живучесть такой системы описывается ε -критерием. При этом можно за просто перейти от активной стратегии НВ к пассивной, это кардинально не изменит принцип анализа. Главное – оценить уровень функциональной избыточности, который не зависит от применяемой стратегии НВ, так как формируется в пространстве дискретных состояний системы, выделенных алгоритмическим путём. А затем функцию живучести можно оценивать уже с учётом стратегии, на основе сформированного вектора F .

Красивые формулы, воспроизводимые нами для случая равновероятных НВ, полностью рассыпаются, когда дело доходит до предпочтений одних НВ другим. В этом случае надо откатываться назад, к популярной в своё время модели Горшкова [18], назначая аксиологические вероятности воздействия точечных НВ на отдельные элементы по принципу Фишберна [19], [20, с. 83-84], строя системы предпочтений одних НВ другим. Применяя формулу Горшкова, мы оцениваем функцию живучести в определённой контрольной точке. Варьируя вероятностями НВ в нешироких пределах, мы оцениваем габариты подмножества оптимальности в многомерном поле вероятностных сценариев, когда наши решения по СОЖ являются наилучшими. Тем самым мы тестируем наши решения, касающиеся обеспечения живучести, на параметрическую устойчивость [13]. Разумеется, в качестве одного из параметров в ходе верификации решения на оптимальность может выступать и ε -критерий.

Переход от структурной живучести к функциональной сразу выводит нас за границы традиционных подходов к анализу и позволяет производить оценку не только собственно технической живучести, но и системной устойчивости, в широком спектре классов

и предназначения этих систем. Так постепенно мы совершаем продвижение в область задач мобилизационной экономической устойчивости.

Связь между технической живучестью и мобилизационной экономической устойчивостью

Экономический объект – это сильносвязная система, предназначенная для генерации комплексного экономического эффекта и охваченная контурами положительных и отрицательных обратных связей [20]. В качестве НВ, применительно к таким объектам, выступают разнообразные шоки, воздействующие на систему со стороны окружающей объект внешней среды. Под воздействием НВ экономический объект начинает деградировать, вплоть до уровня, распознаваемого как негативный, – когда речь идёт о срыве достижения стратегических целей, либо по уровню, либо по срокам достижения. Управляющая надсистема генерирует решения, направленные на выживание экономического объекта и на сохранение им устойчивости в условиях негативного внешнего окружения. Такие решения носят явно выраженный мобилизационный оттенок.

Есть несомненное сходство между технической живучестью и экономической устойчивостью, и это сходство прослеживается в рамках общей теории кибернетических систем, разрабатываемых, начиная с Л. фон Берталанфи и его группы [21]. Глядя на живучесть и устойчивость с общесистемных позиций, мы снова приходим к идее **витальности** как базового прототипного свойства живучести в общем смысле, которое порождает свои проекции в системах различных типов. По мысли Берталанфи, все живые системы (или системы, претендующие на жизнеспособность) обладают свойством **эквифинальности**, когда система с неизбежностью приходит в своё финальное состояние, различными путями, из различных начальных состояний. Фактически, эквифинальность – это динамическая устойчивость, реализующая в ходе достижения системой своих конечных целей, своего базового предназначения – служить, давать ток, защищать, снабжать. Живучесть наследуется от эквифинальности в той же степени, что и от витальности; система витальна, если она эквифинальна, и наоборот.

Полученный изоморфизм свойств технической живучести и экономической устойчивости открывает простор для обоюдной миграции методов, моделей и подходов из одних типов приложений в другие. Например, мобилизационная устойчивость явно заимствует у функциональной живучести принцип НВ и принцип ϵ -критерия в условиях непрерывных пространств НВ и состояний системы. В качестве функции работоспособности или функционального алгоритма в экономической системе выступает система сбалансированных показателей. Наоборот, техническая живучесть может сильно продвинуться, если погрузится в экономический контекст, когда анализ эффективности будет

подкреплён расширенным анализом экономической и финансовой состоятельности технических решений в области живучести. Когда окажется, что у технической системы есть управляющая надсистема, а у той – экономический контекст и стратегические цели, которые вводятся в управляющую надсистему рассматриваемой технической системы в качестве базовых критериев её функционирования.

Конечное предназначение техники – служить экономическим и социальным системам, как в штатных условиях, так и в условиях НВ. И во всех случаях это служение должно развёртываться в оговорённых рамках, с понятными ожиданиями, в согласии с собственными целями надсистем.

Заключение по части 2 работы

Развитие теории технической живучести должно совершаться по следующим основным направлениям:

- осмысление технической живучести как общенаучной дисциплины, преодолевающей отраслевые границы. Такой единый взгляд будет выработан, когда на живучесть начнут смотреть с общесистемных кибернетических позиций, как на проекцию витальности;

- анализ накопленного опыта исследований живучести и устойчивости в западной традиции. Осмысление, насколько западные подходы могут быть применены на российской почве, почему «да» и почему «нет»;

- замещение вероятностных моделей живучести нечётко-сценарными моделями, которые не нуждаются в аксиологических гипотезах, а моделируют экспертный опыт в терминах самих воздействий и реакций, с учётом существенной информационной неопределённости. Логика функционирования систем в этих условиях также может быть «мягкой», оцениваться с применением мягких вычислений и измерений в смысле Заде – Дюбуа – Прада [22, 23];

- переход от функции живучести к риск-функции. Оценивать не выживаемость, а риск недостижения цели;

- более подробное внимание к гуманитарным аспектам живучести, к человеческому фактору в управлении живучестью. Исследовать не только собственно техническую систему, но и её СОЖ;

- простройка смысловой горизонтали между технической живучестью (survivability) и экономической мобилизационной устойчивостью (resilience). Внедрение экономико-финансовых измерителей в задачи технической живучести. Рассмотрение задачи обеспечения живучести под углом зрения инвестиционного проектирования.

Библиографический список

1. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О. Оценка живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности (часть 1) // Надёжность. – №2. 2016. С. 3-15.

2. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М.: Мир, 1982. – Также на сайте: <http://cmcstuff.esyr.org/vmkbotva-r15/5%20%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81/9%20%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%82%D1%80/%D0%A2%D0%B8%D0%B3%D1%80%D1%8B/NP-Completeness.pdf>.

3. Можаяев И.А., Нозик А.А., Струков А.В. Современные тенденции структурно-логического анализа надёжности и кибербезопасности АСУТП. – На сайте: http://www.szma.com/mabr2_2015.pdf.

4. Можаяев И.А. Методики структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. 2015. 19с.

5. Можаяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. – СПб: ВИТУ, 2000. – 145 с.

6. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 55 с. – Также на сайте: <http://www.gcherkesov.com/articles/article02.pdf>.

7. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб: Питер, 2005. – 480 с.

8. Недосекин А.О. Применение теории случайных размещений к анализу живучести технических систем // Кибернетика АН УССР. – 1991. – №6.

9. Недосекин А.О. Анализ живучести систем энергетики комбинаторно-вероятностными методами // Известия РАН. Энергетика. 1992. N3. С.48 – 58.

10. Недосекин А.О. Анализ живучести автоматизированного комплекса на основе точечной модели // Приборы и системы управления. 1989. N11. С.12-14.

11. Недосекин А.О. Связь отказоустойчивости и живучести в функционально-избыточных технических системах // Проблемы комплексной автоматизации судовых технических систем / Тез. докл. Л., НПО «Аврора», 1989. С.208-209

12. Недосекин А.О. Сопоставительный анализ безотказности и живучести технических систем с сетевой структурой // Повышение качества и надежности промышленных изделий / Тез. докл. Л., ЛДНТП, 1989. С.15 -18.

13. Недосекин А.О. Обеспечение функциональной живучести сетей связи: анализ и принятие решений // Пути совершенствования сетей и комплексов технических средств связи / Тез. докл. Л., НПО «Красная заря», 1989. С.10 – 13.

14. Недосекин А.О. Живучесть как функция избыточности в сетях связи // X-ый симпозиум по проблеме избыточности в информационных системах / Тез. докл. Часть 2. Л., ЛИАП, 1989. С.178 -181.

15. Недосекин А.О. Анализ живучести ЭЭС комбинаторно-вероятностными методами // МВИН БСЭ. Вып. 41. Иркутск, 1991.

16. Недосекин А.О. Анализ живучести газотранспортной системы региона Западной Сибири по фактору электроснабжения // МВИН БСЭ. Вып. 43. Иркутск, СЭИ СО РАН, 1992.

17. Недосекин А.О. Структурный анализ живучести ЭЭС на примере тестовой расчетной схемы // МВИН БСЭ. Вып. 43. Иркутск, СЭИ СО РАН, 1992.

18. Горшков В.В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем //АН УССР, Кибернетика, 1982, №1. – С.104-107.

19. Трухачев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределённости. – М.: Наука, 1981.

20. Абдулаева З.И., Недосекин А.О. Стратегический анализ инновационных рисков. – СПб: СПбГПУ, 2013. – 145 с. – Также на сайте: http://an.ifel.ru/docs/InnR_AN.pdf.

21. Bertalanffy L. von. An Outline of General System Theory. // British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1. 1950. P. 134–165.

22. Zadeh L. From computing with numbers to computing with words — from manipulation of measurements to manipulation of perceptions // International Journal of Applied Math and Computer Science, pp. 307–324, vol. 12, no. 3, 2002.

23. DuBois D., Prade H. Fuzzy sets and systems. Theory and applications. – Academic Press, Inc. Orlando, FL, USA. – 1997. – ISBN 0122227506.

Сведения об авторах

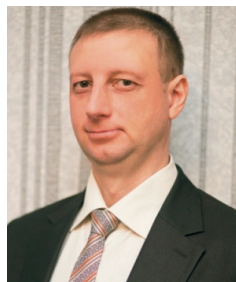
Геннадий Н. Черкесов, доктор технических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gennady.cherkesov@gmail.com

Алексей О. Недосекин, доктор экономических наук, кандидат технических наук, академик МАНЭБ, профессор Санкт-Петербургского Горного университета, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: apostolfoma@gmail.com

Поступила 30.03.2016

Особенности организации процесса функционального диагностирования управляющего компьютера повышенной живучести

Владимир Г. Зарубский, Пермский институт Федеральной службы исполнения наказания России, Пермь, Россия, e-mail: volen3030@rambler.ru



Владимир Г.
Зарубский

Резюме. Цель. Надежность охраны объектов особой важности и повышенной опасности на сегодняшний день достигается применением интегрированных систем безопасности с интеграцией подсистем на базе управляющих компьютеров. Повышение живучести специализированных компьютеров является актуальной задачей, решение которой может лежать в использовании компьютеров, обладающих свойством структурной устойчивости. Практическая реализация такого компьютера связана с решением задачи его функционального диагностирования и последующей функциональной адаптацией. В статье предлагается рассмотреть решение задачи функционального диагностирования структурно-устойчивого управляющего компьютера как функциональной системы, принципиально отличающейся от традиционного процесса контроля персонального компьютера, осуществляемого известными программами самопроверки. **Методы.** Для решения задачи функционального диагностирования предложена математическая модель тестового контроля, который может стать основой функционального диагностирования управляющего компьютера. Кроме этого, на основании предложенной математической модели осуществлен анализ возможных исходов тестового контроля. **Результаты.** В результате анализа предложенной математической модели определены варианты сведения к минимуму рисков I и II рода, то есть причисления неисправных функций к множеству исправных (риск потребителя) и причисления исправных функций к множеству неисправных (риск поставщика), что достигается путем использования общепринятой для электронных вычислительных машин методики диагностирования по принципу «раскрутка». Суть методики заключается в поиске работоспособного «ядра» – набора базовых функций позволяющих в дальнейшем осуществлять диагностирование оставшихся функций системы команд компьютера. Таким образом «ядро» с любым обнаруженным дефектом к дальнейшему функционированию не допускается, а исправное может служить достаточно надежным средством контроля. При использовании данной методики получение нормы одиночного теста не гарантирует отсутствие риска I рода, что объясняет сложившуюся практику проверки каждой функции системы команд достаточной последовательностью проверочных тестов, при этом риск II рода не возрастает. **Выводы.** Представленная в статье модель проверочного теста функционального диагностирования позволила сформулировать стратегию построения данного процесса для структурно-устойчивого управляющего компьютера, которая заключается в реализации ряда частных задач таких как: выделение в особый ряд задачи идентификации работоспособного «ядра», как возможной причины зарождения риска I рода, служащей источником возникновения риска II рода; поочередное диагностирование остальной части функций, как в вычислительной среде с развитым свойством постепенной деградации функций; оптимизация расширяющейся последовательности проверочных тестов для каждой уменьшающей риск I рода функции, необратимо приводящая к возрастанию временных границ контроля дефицитных для предэтапной самопроверки; продолжение тестирования при отрицательных результатах, но другой программной реализацией для снижения риска II рода; разработка специальной методики для обоснования продолжительности тестирования каждой функции управляющих компьютеров.

Ключевые слова: управляющий компьютер, живучесть, структурная устойчивость, функциональная избыточность, функциональное диагностирование, достоверность контроля, риски I и II рода.

Формат цитирования: Зарубский В.Г. Особенности организации процесса функционального диагностирования управляющего компьютера повышенной живучести // Надежность. 2016. №3. С. 35-38. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-35-38

Введение

Взросшая в последнее время террористическая активность выдвигает повышенные требования к обеспечению надежной защиты объектов особой важности. Для решения этой задачи широкое распространение получили интегрированные системы безопасности (ИСБ). Интеграция подсистем, входящих в состав ИСБ, в большинстве случаев осуществляется на базе управляющего компьютера (УК), в качестве которого используется обычный персональный компьютер (ПК), как правило, импортного производства со «штатной» операционной системой. Очевидно, что выход из строя управляющего компьютера по причине как преднамеренного, так и непреднамеренного характера, приводит к недопустимым изменениям работы всей системы в целом. В данной ситуации надежность охраны объектов особой важности становится весьма сомнительной. В связи с вышеизложенным, идея разработки отечественного УК, обладающего свойствами повышенной живучести к угрозам различного характера, представляется весьма актуальной.

В качестве такого УК может быть предложен компьютер, обладающий свойствами структурной устойчивости [1], принципы работы которого основаны на функциональной избыточности любого современного компьютера. В свою очередь практическая реализация такого компьютера связана с решением двух частных задач – функциональное диагностирование УК и последующая его функциональная адаптация.

Все современные компьютеры являются многоуровневыми устройствами и каждый из этих уровней обладает свойствами функциональной избыточности [2], в связи с чем в данной статье процессы функционального диагностирования будут рассмотрены на примере командного уровня архитектуры.

Функциональное диагностирование структурно-устойчивых (СтУ) УК как функциональной системы принципиально отличается от традиционного процесса контроля ПК, осуществляемого известными программами самопроверки с целью установления вида технического состояния: «исправен – неисправен», «работоспособен – неработоспособен». В современных ПК функциональное диагностирование центрального процессора лишено всякого смысла, поскольку непрохождение любого теста делает нецелесообразным получение ПК готовности, т.к. усеченная система команд становится несоответствующей специальному программному обеспечению. Несколько иначе обстоит дело с групповым оборудованием специальных цифровых вычислительных комплексов систем вооружения, обеспечивающим трехгранную (трехканальную) структуру, особенно эффективную в борьбе со сбоями и их последствиями. Здесь встречаются элементы функционального диагностирования, ставящего целью выявления ряда частных отказов, не препятствующих выполнению боевых задач, но обязательно устраняе-

мых на регламенте ввиду снижения запасов живучести, необходимых в экстремальных условиях эксплуатации. К этой категории отказов относятся: неспособность канала быть ведущим (ведомым) в двухканальной структуре, неспособность мажоритарных механизмов парировать одиночные сбои при вводе информации, полная или частичная утрата функций межканального обмена и др. Однако в этом случае имеет место не самоконтроль, а определение технического состояния устройств обмена функциональными средствами центрального процессора.

Функциональное диагностирование структурно-устойчивого управляющего компьютера

Функциональное диагностирование центрального процессора, актуальное для этапа восстановления готовности СтУ УК, по сути является самодиагностированием, т.е. идентификацией функционального состояния $\tilde{p}^F$ в условиях стохастически неопределенного разбития функциональной системы F на классы $\tilde{p}^F$ и $\bar{\tilde{p}}^F$:

$$F = \tilde{p}^F \cup \bar{\tilde{p}}^F, \tilde{p}^F \cap \bar{\tilde{p}}^F = \emptyset, \quad (1)$$

при стремлении

$$\tilde{p}^F \rightarrow p_{\phi}^F, \bar{\tilde{p}}^F \rightarrow \bar{p}_{\phi}^F, \quad (2)$$

где p_{ϕ}^F – текущее функциональное состояние СтУ УК, и ограничении продолжительности процесса контроля

$$t_{\phi\partial} \leq t_{\phi\partial}^{\max}. \quad (3)$$

Выражение (2) означает сведение к минимуму рисков I и II рода, то есть причисления неисправных функций к множеству исправных (риск потребителя) и причисления исправных функций к множеству неисправных (риск поставщика).

В общем случае подобная задача не может иметь удовлетворительных решений ввиду определенной недоверности уже первичных результатов самопроверки и стремительного ее распространения в последующие процессы контроля. При этом нарушается основной принцип любого процесса контроля, требующий, чтобы средства контроля были более высокого класса, чем объект контроля. Это условие выполняется в СтУ УК с развитым свойством постепенной деградации [3, 4], для которой выбирается методология организации программы самопроверки как средство идентификации текущего функционального состояния электронной вычислительной машины (ЭВМ).

Действительно, на первом этапе процедуры функционального диагностирования осуществляется поиск работоспособного функционально полного «ядра» по общепринятой для ЭВМ методике: «раскрутка» с признанием его неработоспособности по

первому непрохождению проверочного теста. Т.е. «ядро» с любым обнаруженным дефектом к дальнейшему функционированию не допускается. Исправное «ядро» функциональной системы УК может служить достаточно надежным средством контроля для одичных функций из остальной части системы команд. Этому способствует развитое свойство постепенной деградации функций, предполагающее существование для каждой проверяемой функции обслуживающей только ее части оборудования, для которого можно подобрать достаточно полную последовательность проверочных тестов.

Поскольку полностью снять проблему достоверности процесса контроля функций нельзя, следует проанализировать условия ее повышения при снижении возможных последствий в последующих процессах. Для этого необходима адекватная модель процесса тестового контроля, описывающая элементарные операции контроля и их композиции по части поддержания требуемого уровня достоверности.

Рассмотрим процесс контроля произвольной команды ϑ как функции системы команд θ ЭВМ, организуемый на участке самопроверки с целью разрешения альтернативы

$$\vartheta \in \rho_{\phi}^F \mid \vartheta \in \bar{\rho}_{\phi}^F, \quad (4)$$

в действительности, превращающийся в разрешение альтернативы

$$\vartheta \in \tilde{\rho}^F \mid \vartheta \in \bar{\tilde{\rho}}^F \quad (5)$$

на множестве Π_F вариантов разбиения (1).

Исправная функция ЭВМ ϑ определена в конечном дискретном пространстве состояний S' ЭВМ, компоненты которого суть ячейки памяти и регистры общего назначения, принимающие всевозможные значения в пределах их разрядности. Это означает, что для любой точки S' произвольного подмножества S_{ϑ} , $|S_{\vartheta}| \leq |X'_{\vartheta} \cup X''_{\vartheta}|$, где $X'_{\vartheta}, X''_{\vartheta}$ – множество входных и выходных переменных команды ϑ , существует образ $S'' \in S_{\vartheta}$, т.е. имеет место преобразование

$$\vartheta : S' \rightarrow S'' \quad (6)$$

Каждая пара (S', S'') может составить основу проверочного теста, который вместе с объектом контроля ϑ образует оперативную систему контроля, если имеет средства приведения вычислительного процесса в точку $S' - a'_{\vartheta}$ (воздействия на объект контроля ϑ), и средства a''_{ϑ} оценки факта

$$\vartheta(S') = S'', \quad (7)$$

т.е. реакции объекта контроля на заданное воздействие. Как принято, a'_{ϑ} и a''_{ϑ} играют роль средства контроля. В целом построенный тест a_{ϑ} имеет вид

$$\begin{aligned} a_{\vartheta} &= a'_{\vartheta}(\bar{\rho}^F) \vartheta a''_{\vartheta}(\bar{\rho}^F) = \\ &= \vartheta \notin \tilde{\rho}^F \mid (\vartheta \in \tilde{\rho}^F \mid \vartheta \notin \tilde{\rho}^F) \mid \bar{\rho}^F \cup \vartheta \end{aligned} \quad (8)$$

где $\bar{\rho}^F$ – состояние процесса идентификации $\tilde{\rho}^F$ перед прохождением теста a_{ϑ}

$$\bar{\rho}^F \subseteq \tilde{\rho}^F. \quad (9)$$

Результатом процесса контроля ϑ тестом (8) может быть отнесение ϑ к классу $\bar{\rho}^F$ при непрохождении теста по признаку (7), неопределенность ($\vartheta \in \tilde{\rho}^F \mid \vartheta \notin \tilde{\rho}^F$), если процесс контроля ϑ будет продолжен последующими тестами типа (8), либо отнесение ϑ к классу $\tilde{\rho}^F$ и подключение данной функции к идентифицированной части функционального состояния $\bar{\rho}^F$, если этот тест был завершающим в процессе контроля ϑ (рис. 1).

Несмотря на наличие всего двух исходов каждого отдельно рассматриваемого проверочного теста, внутренних ситуаций в процессе контроля возникает значительно больше (рис. 2). Проведем анализ ситуаций 1-15, происхождение которых связано:

- с надежностью определения работоспособного «ядра», принимаемого в начале за исходную, а затем за текущую идентифицированную часть функционального состояния

$$\bar{\rho}^F := \rho_{ял}^F \quad (2.10)$$

При этом возможны два варианта:

$$\bar{\rho}^F \subset \rho_{\phi}^F \quad (2.11)$$

и

$$\bar{\rho}^F \not\subset \rho_{\phi}^F; \quad (2.12)$$

- с надежностью установки задаваемых проверочным тестом исходных данных S' . Для случая (2.11) неизбежно

$$a'_{\vartheta}(\bar{\rho}^F) : \tilde{S}' = S', \quad (2.13)$$

где $\tilde{S}'$ – фактический результат выполнения фрагмента теста a'_{ϑ} , построенного на базе подмножества команд $\bar{\rho}^F$. Для случая (2.12) из-за несовершенства теста кроме результата

$$a'_{\vartheta}(\bar{\rho}^F) : \tilde{S}' \neq S' \quad (2.14)$$

возможен результат (2.13);

- с неопределенностью состояния объекта контроля ϑ , реакции которого на исходные данные S' , могут быть как

$$a'_{\vartheta}(\tilde{S}') : \tilde{S}'' = S'', \quad (2.15)$$

всего 5 случаев (1, 2, 4, 5, 8), так и

$$a'_0(\tilde{S}') : \tilde{S}'' \neq S'', \quad (2.16)$$

4 случая (3, 6, 7, 9), где $\tilde{S}''$ – фактический результат выполнения команды ϑ ;

- с надежностью оценки результатов типа (2.15), (2.16) последовательностью команд $a''_0(\tilde{p}^F)$ проверочного теста: N (норма) для 8 вариантов (1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14), $\bar{N}$ (ненорма) для 7 вариантов (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15).

Нормовые ситуации распадаются на две группы. Первая (1, 4, 10) – соответствует случаю $\vartheta \in \rho_\phi^F$. Их объединяет невозрастание риска II рода, поскольку исправная команда идентифицируется как исправная. Вторая группа (2, 6, 8, 12, 14) соответствует случаю $\vartheta \notin \rho_\phi^F$ и своим подтверждением нормы способствует нарастанию риска I рода.

Ненормовые ситуации, в свою очередь, распадаются на две группы. Первая (3, 7, 9, 13, 15) – соответствует случаю $\vartheta \notin \rho_\phi^F$. Их объединяет невозрастание риска I рода, поскольку неисправная команда идентифицирована как неисправная. Вторая группа соответствует случаю $\vartheta \in \rho_\phi^F$ и своим утверждением о ненорме способствует нарастанию риска II рода.

Заключение

Из изложенного в статье следует, что получение нормы одиночного теста не гарантирует отсутствие риска I рода, что объясняет сложившуюся практику проверки каждой функции системы команд достаточной последовательностью проверочных тестов. При этом риск II рода не нарастает. Поскольку нормовые ситуации являются лишь частью полной группы событий 1-15, то можно утверждать, что в последовательности разнообразных проверочных тестов, проходящих по норме, риск I рода уменьшается. Это объясняется тем, что с каждым новым тестом проверяется очередной вариант функционирования аппаратуры, а число непроверенных вариантов сокращается. В случае проверки всех вариантов риска I рода после нормы последнего из них, данный риск полностью исключается. Однако, в случае наличия ограничений на время проверки, данный результат, может быть, не достигнут.

В то время, как было отмечено выше, не устраненный риск I рода порождает риск II рода в форме отрицательного результата теста проверяемой функции при норме последней. В этом случае условия функционального диагностирования ухудшаются. Судя по ситуации 5 исхода теста, положение можно улучшить повтором теста (S' , S''), используя иные команды из состава $\tilde{p}^F$. Отрицательный результат подтвердит неисправность функции ϑ , а положительный – позволит обоснованно перейти к новому функциональному «ядру».

Модель проверочного теста функционального диагностирования позволит сформулировать стратегию построения этого важного для СтУ УК процесса:

1) идентификации работоспособного «ядра» должно быть уделено особое внимание, поскольку на этом этапе зарождается риск I рода, служащий источником возникновения и риска II рода;

2) диагностирование остальной части функций УК следует провести поочередно, как в вычислительной среде с развитым свойством постепенной деградации функций;

3) расширяющаяся последовательность проверочных тестов для каждой функции УК уменьшает риск I рода, однако при этом растет время контроля, дефицитное для предэтапной самопроверки, на которую дополнительно возлагаются задачи адаптации к текущему функциональному состоянию;

4) для снижения риска II рода при отрицательных результатах тестирования, его целесообразно продолжить при тех же исходных данных, но другой программной реализацией;

5) обоснование продолжительности тестирования каждой функции УК требует разработки специальной методики.

Библиографический список

1. Зарубский В.Г. Вопросы разработки перспективных интегрированных систем охраны, отвечающих требованиям повышенной живучести, на базе структурно-устойчивых управляющих компьютеров. Вестник Пермского института ФСИН России. Выпуск 1 (5)/2012. С 4-9.
2. Зарубский В.Г., Рыбаков А.П. Математическая модель процесса адаптации управляющего компьютера интегрированной системы к текущему функциональному состоянию. Вестник Воронежского института МВД России. Выпуск 1/2012. С. 170-178.
3. Харитонов В.А. Основы теории живучести функционально-избыточных систем. С.-Пб.: СПИИРАН, 1993. – 60 с.
4. Тюрин С.Ф. Синтез адаптируемой к отказам цифровой аппаратуры с резервированием базисных функций/ Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Выпуск №1/ 1999. С 36-39

Сведения об авторе

Владимир Г. Зарубский, кандидат технических наук, доцент кафедры, Пермский институт Федеральной службы исполнения наказания России, Пермь, Россия, e-mail: volen3030@rambler.ru

Поступила 10.03.2016

Оценка рисков, связанных с проездом запрещающего сигнала светофора маневровым составом или пассажирским поездом¹

Игорь Б. Шубинский, ЗАО «ИБТранс», Москва, Россия, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru
Алексей М. Замышляев, ОАО «НИИАС», Москва, Россия, e-mail: A.Zamyslyayev@vniias.ru
Алексей Н. Игнатов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: alexei.ignatov1@gmail.com
Юрий С. Кан, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: yu_kan@mail.ru
Андрей И. Кибзун, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: kibzun@mail.ru
Евгений Н. Платонов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: en.platonov@gmail.com



И.Б. Шубинский



А.М. Замышляев



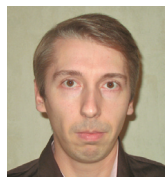
А.Н. Игнатов



Ю.С. Кан



А.И. Кибзун



Е.Н. Платонов

Цель. Разработка методики, позволяющей оценить риски, возникающие вследствие проезда маневровым или поездным локомотивом запрещающего сигнала светофора и выработать рекомендации, позволяющие снизить риск столкновения при проведении маневровых работ на станции. **Методы.** Для достижения поставленной цели в работе определяется среднее число взрезанных стрелок маневровыми составами без последующего схода, а также среднее число сходов маневровых составов с рельсов за год. По имеющимся статистическим данным проводится расчет среднего размера ущерба от одного столкновения, взреза стрелки без последующего схода, а также взреза стрелки с последующим сходом. Для вычисления среднего размера ущерба, который возникает при столкновении вследствие получения некоторой травмы человеком, рассматриваются различные виды травм. Травмы классифицируются по уровню последствий, которые пересчитываются в денежном эквиваленте при помощи минимального размера оплаты труда. Для учета вариативности в выборе маршрута и для получения вероятности столкновения пассажирского поезда при проезде через станцию используется формула полной вероятности. Для получения вероятности хотя бы одного столкновения за год используется формула умножения вероятности. Для получения среднего числа взрезов и сходов определяется общее число стрелок, пересекаемых маневровыми составами на станции за год, а для определения вероятности взреза и схода при одном проезде через стрелку – формула умножения вероятностей. Для определения уровня риска от рассматриваемого неблагоприятного события строятся матрицы риска, позволяющие определить, имеет ли необходимость в проведении срочных мер по снижению уровня риска. **Результаты.** Исследована проблема расчета риска неблагоприятных событий, вызванных проездом пассажирским поездом или маневровым составом запрещающего сигнала светофора. Приведены формулы расчета вероятности хотя бы одного столкновения на станции пассажирского поезда за год, среднего количества взрезанных стрелок маневровым составом без последующего схода, среднее число сходов с рельсов за год. Приведены формулы по расчету среднего ущерба от неблагоприятных событий. Построены матрицы рисков для всех неблагоприятных событий. Приведен пример использования полученных результатов, основанный на гипотетических данных, реальных данных и экспертных оценках. **Выводы.** При помощи полученной в работе методике была продемонстрирована ее применимость на практике. Было получено, что для рассмотренного набора входных данных никаких мер по снижению риска от взрезов и сходов на рассматриваемой станции проводить не следует. В то же время риск от столкновений находится в оранжевой зоне – зоне нежелательного риска, вследствие чего необходимо проводить меры по снижению риска. При этом количественное значение риска от взрезов оказывается больше, чем риск от столкновений. Это обстоятельство связано с тем, что при столкновении ОАО «РЖД» несет дополнительные репутационные издержки, усугубляющиеся тем фактом, что столкновение происходит на станции с большим количеством людей.

Ключевые слова: вероятность столкновения, взрез, сход, ущерб, матрица рисков.

Формат цитирования: Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кан Ю.С., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Оценка рисков, связанных с проездом запрещающего сигнала светофора маневровым составом или пассажирским поездом // Надежность. 2016. №3. С. 39-46. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-39-46

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-11-00062).

Введение

При проезде маневровым составом запрещающего сигнала светофора возможны несколько неблагоприятных событий: его столкновение с пассажирским или грузовым поездами, взрез стрелочного перевода без схода маневрового состава, сход маневрового состава с рельсов. Каждое из этих событий происходит с определенной интенсивностью или вероятностью. При этом каждое из этих событий характеризуется определенным ущербом. Поэтому актуальной является задача количественной оценки рисков для поддержания их на допустимом уровне [1].

В работе [2] проводится расчет вероятности бокового столкновения маневрового состава и пассажирского поезда, когда один из участников движения проехал светофор с запрещающим показанием, на определенном маршруте следования пассажирского поезда, где под маршрутом понимается набор стрелочных переводов, которые пассажирский поезд пересекает при движении через станцию. Изолированным стрелочным переводом называется тот, на котором столкновение, вызванное проездом запрещающего сигнала, произойти не может, неизолированный стрелочный перевод – тот, на котором столкновение возможно. Однако при пересечении станции у пассажирского поезда имеется несколько возможных маршрутов передвижения, которые используются с определенной интенсивностью.

В настоящей работе для учета вариативности в выборе маршрута и для получения вероятности хотя бы одного столкновения пассажирского поезда при проезде через станцию используется формула полной вероятности. Для получения вероятности хотя бы одного столкновения за год используется формула умножения вероятности. Для получения среднего числа взрезов и сходов определяется общее число стрелок, пересекаемых маневровыми составами на станции за год, а для определения вероятности взреза и схода при одном проезде через стрелку – формула умножения вероятностей.

Поскольку рассматриваются транспортные происшествия на железнодорожной станции, то при столкновении пассажирского поезда и маневрового состава как на самой станции, так и в пассажирском поезде возможны человеческие жертвы, поэтому в настоящей работе средний ущерб от одного столкновения пассажирского поезда и маневрового состава складывается из ущерба от повреждения железнодорожной инфраструктуры при столкновении: железнодорожного полотна, вагонов и т.д. и последствий от гибели людей, количественное выражение которого получается на основе [1]. Ущерб от взрезв и сходов строится на основании последствий от повреждения железнодорожной инфраструктуры, а гибель людей при этом маловероятна, поскольку маневровые работы проводятся на небольшой скорости. Матрицы риска строятся на основании подхода, изложенного в [1].

Расчет вероятности хотя бы одного столкновения маневрового состава и пассажирского поезда за год

Согласно расписанию, получаемому из АСУ «Экспресс» на рассматриваемый промежуток времени (год), присвоим номера пассажирским поездам, пересекающим рассматриваемую нами станцию согласно порядку их прибытия, то есть первый прибывающий поезд, получает номер 1, второй – номер 2 и т.д. Рассмотрим i -ый пассажирский поезд из этого набора.

Пусть A_i – столкновение пассажирского поезда с номером i при движении через станцию, а $P(A_i | R_k)$ – вероятность столкновения пассажирского поезда с номером i при движении через станцию по маршруту R_k , где $k=1, \dots, K$, а K – общее число возможных маршрутов для поезда с номером i . Тогда вероятность столкновения пассажирского поезда с номером i при движении через станцию равна [2]

$$P(A_i) = \sum_{k=1}^K P(A_i | R_k) P(R_k),$$

где $P(R_k)$ – вероятность использования маршрута R_k определяется по формуле

$$P(R_k) = \frac{m_{R_k}}{n},$$

где m_{R_k} – число проехавших пассажирских поездов с номером i по маршруту R_k , а n – общее число пассажирских поездов с номером i , проехавших через станцию за время наблюдения. Если данные о прошлых пересечениях станции пассажирским поездом с номером i отсутствуют, а организация мониторинга за движением не представляется возможной, то вероятность использования всех маршрутов можно положить равновероятной, то есть

$$P(R_k) = \frac{1}{K}.$$

Вероятность $P(A_i | R_k)$ определяется при помощи следующей формулы, полученной в [2],

$$P(A_i | R_k) = P(A_{k:1}) + (1 - P(A_{k:1})) \cdot P(A_{k:2}) + \\ + (1 - P(A_{k:1})) \cdot (1 - P(A_{k:2})) \cdot P(A_{k:3}) + \dots,$$

где $P(A_{k:j})$ – вероятность столкновения поезда с номером i , пересекающего станцию по маршруту R_k , на j -м по порядку пересечения поездом стрелочном переводе. В свою очередь $P(A_{k:j})$ вычисляется по формуле

$$P(A_{k:j}) = \left(\lambda_m \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} \right) (P_m (1 + P_n) + P_n) + \right. \\ \left. + \lambda_c P_n \tau_c + \lambda_m P_m P_{nc} \tau_{nc} \right) \cdot k_c,$$

где k_c – коэффициент изолированности стрелки (1, если стрелочный перевод неизолированный, и 0, если стрелочный перевод изолированный);

λ_m – интенсивность следования маневровых составов через j -ую стрелку, в направлении, при котором возмож-

но боковое столкновение (для простоты можно предположить, что $\lambda_m = \tilde{\lambda}_m / 4$, где $\tilde{\lambda}_m$ – общая (суммарная) интенсивность следования маневровых составов через j -ую стрелку во всех направлениях);

λ_c – интенсивность останавливающихся на j -ом стрелочном переводе маневровых групп, не нарушивших при пересечении стрелки безопасности движения;

τ_c – среднее время нахождения на j -ом стрелочном переводе маневровой группы, не нарушившей при пересечении стрелки безопасности движения, при условии остановки на стрелочном переводе;

l_n – средняя длина пассажирского поезда;

v_n – средняя скорость движения пассажирского поезда по станции;

l_m – средняя длина маневровой группы;

v_m – средняя скорость движения маневровой группы по станции;

P_n – вероятность проезда запрещающего сигнала пассажирским поездом;

P_{nc} – вероятность остановки пассажирского поезда на стрелочном переводе;

τ_{nc} – среднее время стоянки пассажирского поезда на стрелочном переводе;

P_m – вероятность проезда запрещающего сигнала маневровым составом, вычисляемая по формуле [2]

$$P_m = P_{\text{двое}} \cdot P_{m(\text{двое})} + (1 - P_{\text{двое}}) \cdot P_{m(\text{один})}$$

где $P_{\text{двое}}$ – вероятность комплектования локомотивной бригады маневрового локомотива машинистом и его помощником;

$P_{m(\text{двое})}$ – вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе с помощником машиниста;

$P_{m(\text{один})}$ – вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе без помощника машиниста («в одно лицо»).

Пусть на станции за год в различных направлениях следуют I поездов. Рассмотрим i -й поезд из этого набора, $i=1, \dots, I$. Если ему соответствует вероятность $P(A_i)$ столкновения при проезде через станцию, то вероятность столкновения хотя бы одного поезда из I штук равна [2]

$$P(A_{\text{год}}) = P(A_1 + A_2 + \dots + A_I) = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - P(A_i)). \quad (1)$$

Расчет среднего количества взрезов и сходов маневрового состава за год

Пусть L – общее количество локомотивов, работающих на станции, а N_i – среднее количество стрелок, проезжаемых в час маневровым составом с локомотивом с номером i . Тогда общее количество $N_{\text{год}}$ стрелок, которые пересекают маневровые составы на станции вычисляется по формуле

$$N_{\text{год}} = 365 \cdot 24 \cdot \sum_{i=1}^L N_i. \quad (2)$$

Рассмотрим несколько случайных событий: A_m – проезд запрещающего сигнала светофора маневровой группой, $A_{\text{вз}}$ – взрез стрелки маневровой группой после проезда запрещающего сигнала, $A_{\text{сх}}$ – сход с рельсов после взреза стрелки. Пусть известны (например, оценены экспертным путем) вероятность взреза после проезда запрещающего сигнала светофора $P_{\text{вз}}$ и вероятность схода с рельсов после взреза стрелки $P_{\text{сх}}$. Тогда вероятность взреза стрелки с последующим сходом подвижного состава определяется по формуле умножения вероятностей [3]

$$P_{\text{вз(со сходом)}} = P(A_m A_{\text{вз}} A_{\text{сх}}) = P_m P_{\text{вз}} P_{\text{сх}}, \quad (3)$$

а вероятность взреза стрелки без последующего схода подвижного состава аналогично по формуле умножения вероятностей равна

$$P_{\text{вз(без схода)}} = P(A_m A_{\text{вз}} \bar{A}_{\text{сх}}) = P_m P_{\text{вз}} (1 - P_{\text{сх}}). \quad (4)$$

Поскольку при каждом проезде через стрелку возможен сход с рельсов или взрез стрелки, то число взрезанных стрелок без последующего схода является случайной величиной, имеющей биномиальное распределение с параметрами $N_{\text{год}}$ и $P_{\text{вз(без схода)}}$, а число сошедших подвижных составов является случайной величиной, имеющей биномиальное распределение с параметрами $N_{\text{год}}$ и $P_{\text{вз(со сходе)}}$. Поэтому среднее число взрезанных стрелок без последующего схода определяется перемножением числа испытаний и числа «успехов», то есть вычисляется по формуле [3]

$$\bar{N}_{\text{вз}}^{\text{вз}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(без схода)}}, \quad (5)$$

а среднее число взрезанных стрелок с последующим сходом вычисляется по формуле

$$\bar{N}_{\text{вз}}^{\text{сх}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(со сходе)}}. \quad (6)$$

Определение среднего ущерба от неблагоприятных событий

Рассмотрим вначале ущерб, возникающий при столкновении. Ущерб от столкновения на станции состоит из двух частей. Первой частью является материальный ущерб от повреждения вагонов, путей, инфраструктуры станции, груза и т.д. Данные виды ущерба фиксируются в протоколах транспортных происшествий и могут быть вычислены как средние величины. Второй частью является ущерб, связанный с возможной гибелью людей или причинением вреда здоровью человека.

Пусть имеется $M_{\text{см}}$ протоколов столкновений. Тогда средняя величина материального ущерба, вычисленная по всем происшествиям, вычисляется по формуле

$$\bar{C}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{M_{\text{см}}} C_{\text{см}}^i}{M_{\text{см}}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{см}}^i$ – материальный ущерб от столкновения, зафиксированный в i -м протоколе.

Вычислим средний ущерб, связанный с возможной гибелью людей или причинением вреда здоровью человека. Разделим травмы, происходящие при транспортном происшествии, на классы: причиняющие средний вред здоровью; причиняющие тяжкий вред здоровью; вызывающие гибель человека. Пусть N_{cm}^i – количество погибших людей в i -м столкновении, $N_{тя}^i$ – количество людей, которым причинен тяжкий вред здоровью в i -м столкновении, N_{cp}^i – количество людей, которым причинен средний вред здоровью в i -м столкновении, C_{cp} – ущерб при причинении среднего вреда здоровью одному человеку, $C_{тя}$ – ущерб при причинении тяжкого вреда здоровью одному человеку, C_{cm} – ущерб при гибели одного человека. Таким образом, средний ущерб от возможной гибели людей или причинения вреда здоровью человека при одном столкновении составляет

$$\bar{C}_2 = C_{cm} \frac{\sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i}{M_{cm}} + C_{тя} \frac{\sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i}{M_{тя}} + C_{cp} \frac{\sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i}{M_{cp}}.$$

Величины C_{cp} , $C_{тя}$, C_{cm} найдем, исходя из [1]. Гибель одного человека приравнивается к материальному ущербу в 5000 МРОТ, тяжкий вред здоровью к 1000 МРОТ, вред средней тяжести к 500 МРОТ. Величина МРОТ с 1 января 2016 года составляет 6204 руб. [4]. Таким образом,

$$C_{cp} = 6,204 \cdot 500 = 3102 \text{ тыс. руб.},$$

$$C_{тя} = 6,204 \cdot 1000 = 6204 \text{ тыс. руб.},$$

$$C_{cm} = 6,204 \cdot 5000 = 31020 \text{ тыс. руб.}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \bar{C}_2 &= 3102 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i}{M_{cp}} + 6204 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i}{M_{тя}} + 31020 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i}{M_{cm}} = \\ &= \frac{1}{M_{cm}} \left(3102 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i + 6204 \cdot \sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i + 31020 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку общий ущерб от столкновений $\bar{C}_{cm}$ складывается из материального ущерба и ущерба от причинения вреда здоровью, то

$$\begin{aligned} \bar{C}_{cm} &= \bar{C}_1 + \bar{C}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{M_{cm}} C_{cm}^i}{M_{cm}} + \\ &+ \frac{1}{M_{cm}} \left(3102 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i + 6204 \cdot \sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i + 31020 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотрим теперь ущерб, возникающий при врезках и сходах. Пусть имеется $M_{вз}$ протоколов врезок без сходов, в которых был зафиксирован некоторый ущерб. Тогда средняя величина материального ущерба, вычисленная по всем происшествиям, вычисляется по формуле

$$\bar{C}_{вз} = \frac{\sum_{i=1}^{M_{вз}} C_{вз}^i}{M_{вз}}, \quad (10)$$

где $C_{вз}^i$ – материальный ущерб от врезки стрелки, зафиксированный в i -м протоколе. Аналогично если имеется $M_{сх}$ протоколов врезок с последующим сходом, в которых был зафиксирован некоторый ущерб, то средняя величина материального ущерба, вычисленная по всем происшествиям, вычисляется по формуле

$$\bar{C}_{сх} = \frac{\sum_{i=1}^{M_{сх}} C_{сх}^i}{M_{сх}}, \quad (11)$$

где $C_{сх}^i$ – материальный ущерб от врезки с последующим сходом, зафиксированный в i -м протоколе.

Оценивание величины риска

Для определения уровня риска после завершения анализа частот и анализа последствий проводится количественная или качественная оценка. В общем случае согласно [1] риск представляет некоторый функционал от двух величин – вероятности (частоты) нежелательного события $P(A)$ и его последствий $C(A)$. В настоящей работе будем рассматривать количественную величину риска как произведение вероятности (частоты) на ущерб. Таким образом, риск от столкновений, вызванных проездом запрещающего сигнала одним из участников движения, вычисляется по формуле

$$R_{cm} = P(A_{сод}) \cdot \bar{C}_{cm}, \quad (12)$$

где $P(A_{сод})$ вычисляется по формуле (1), а $\bar{C}_{cm}$ по формуле (9) соответственно. Риски от врезок без последующего схода и с последующим сходом вычисляются по формулам

$$R_{вз} = \bar{N}_{сод}^{вз} \cdot \bar{C}_{вз}, \quad (13)$$

$$R_{сх} = \bar{N}_{сод}^{сх} \cdot \bar{C}_{сх}, \quad (14)$$

где величины $\bar{N}_{сод}^{вз}$, $\bar{N}_{сод}^{сх}$, $\bar{C}_{вз}$, $\bar{C}_{сх}$ вычисляются по формулам (5), (6), (10), (11) соответственно.

Построение матриц риска

Представление результатов оценивания риска может быть осуществлено с помощью матрицы рисков, которая представляет собой таблицу с сочетанием частоты возникновения события и тяжести последствий этого события (рисунок 1) и позволяет в наглядной форме проинформировать лица, принимающие решения, об уровнях рисков для рассматриваемого события. Форма (размерность) матрицы зависит от области ее применения.

Матрица риска строится следующим образом:

– по вертикальной оси отсчитываются частоты (вероятности) возникновения события, представленные в

соответствии с принятой (как правило, логарифмической) шкалой частот;

– по горизонтальной оси отсчитываются размеры последствий возникновения события, представленные в соответствии с принятой (как правило, логарифмической) шкалой тяжести последствий;

– проводится определение и ранжирование уровня риска для каждой ячейки матрицы.

Основной проблемой при построении матриц риска является правильный выбор границ для ячеек матрицы. Одна и та же ячейка содержит точки с разными значениями риска, при этом часть точек относится, например, к области «допустимого» риска, а часть точек к области «нежелательного» риска. В наиболее неблагоприятном случае ячейка может разделиться на два сегмента одинаковой площади, из-за чего нельзя точно определить к какой области значений риска относится большинство точек, расположенных внутри ячейки.

В статье [5] предложена методика выбора границ для ячеек матрицы риска, позволяющая решить данную проблему.

В [1] в качестве типовой шкалы для вероятности рекомендуется шкала, имеющая 6 уровней (градаций). В качестве типовой шкалы последствий рекомендуется шкала, имеющая 4 уровня (градации).

Границы для ячеек матрицы рисков выберем в рамках подхода, предложенного в [1].

Минимальное и максимальное значения вероятности приняты равными 0 и 1 из условия нормировки вероятности случайного события. Наиболее неблагоприятное событие (частое) задаётся границей 0,5, т.е. транспортное происшествие происходит чаще, чем не происходит. Границы для маловероятного и редкого события выбираются в логарифмической шкале так, что бы они были на порядок меньше, т.е. 0,05 и 0,005 соответственно. Значение 0,05 является самым распространенным для вероятности редкого события. Промежуточные границы между уже заданными значениями выбираются в логарифмической шкале так, чтобы величина этих ячеек была примерно одинаковой. Поэтому граница, задающая переход от вероятного события к случайному событию задаётся равной 0,15 (примерно в три раз меньше, чем 0,5 и в три

раз больше, чем 0,05). Аналогично для границы перехода от редкого события к крайне редкому. Уровни вероятности возникновения столкновений приведены в таблице 1.

Если же вместо вероятности нежелательного события мы строим оценку средней частоты появления опасного случая, то в [1] в таблице А.5 предложены следующие уровни частот (таблица 2). Для нашего случая данный вариант выбора уровня частот является также обоснованным.

При выборе границ для тяжести последствий будем руководствоваться ущербом, который будет вызван смертью человека. В соответствии с таблицей 2 ГОСТ Р 54505 катастрофический риск наступает при гибели одного или более человек, что приравнивается к величине в 5000 МРОТ = 30000 тыс. руб. Две

Таблица 1. Уровни вероятности возникновения столкновений

Уровни вероятности	Вероятность событий в год, $P(A)$	Описание
Частое	$P(A) > 0,5$	Постоянное наличие опасности
Вероятное	$0,15 \leq P(A) < 0,5$	Ожидается частое возникновение опасного события
Случайное	$0,05 \leq P(A) < 0,15$	Ожидается неоднократное возникновение опасного события
Редкое	$0,015 \leq P(A) < 0,05$	Вероятность того, что событие будет иногда возникать на протяжении жизненного цикла объекта.
Крайне редкое	$0,005 \leq P(A) < 0,015$	Можно предположить, что опасное событие может возникнуть в исключительном случае.
Маловероятное	$P(A) \leq 0,005$	Можно предположить, что опасное событие не возникнет.

Уровни вероятности	Уровни риска			
	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Частое	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Вероятное	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
Случайное	Допустимый	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый
Редкое	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Крайне редкое	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый	Нежелательный
Маловероятное	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный
	Незначительный	Серьёзный	Критический	Катастрофический
	Уровни тяжести последствия			

Рис. 1. Форма матрицы рисков

Таблица 2. Уровни частот

Уровни частоты	Количественное значение, $P^*(A)$, 1/год	Описание
Частое	$P^*(A) \geq 100$	Постоянное наличие опасности
Вероятное	$40 \leq P^*(A) < 100$	Ожидается частое возникновение опасного события
Случайное	$15 \leq P^*(A) < 40$	Ожидается неоднократное возникновение опасного события
Редкое	$6 \leq P^*(A) < 15$	Вероятность того, что событие будет иногда возникать на протяжении жизненного цикла объекта.
Крайне редкое	$2 \leq P^*(A) < 6$	Можно предположить, что опасное событие может возникнуть в исключительном случае.
Маловероятное	$P^*(A) < 2$	Можно предположить, что опасное событие не возникнет.

Таблица 3. Уровни тяжести последствий

Уровни			
Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
менее 300 тыс. руб.	от 300 до 3000 тыс. руб.	от 3000 до 30000 тыс. руб.	более 30000 тыс. руб.

других границы выбраны в логарифмической шкале и отличаются на один и два порядка соответственно (таблица 3).

Уровни вероятности	Уровни риска			
	Частое	Вероятное	Случайное	Редкое
1	300	3000	30000	
0,5	150	1500	15000	
0,15	45	450	4500	
0,05	15	150	1500	
0,015	4,5	45	450	
0,005	1,5	15	150	
0	Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
	300	3000	30000	Уровни тяжести последствия

Рис. 2. Матрица рисков столкновений

Выполним ранжирование ячеек матрицы. Для этого перемножим верхние значения частоты и тяжести последствий, соответствующие каждой ячейке и в зависимости от результата назначим ей категорию (рисунки 2 и 3).

	Уровни частот, 1/год	Уровни риска			
	Частое	Вероятное	Случайное	Редкое	Крайне редкое
100		30000	300000	3000000	
40		12000	120000	1200000	
15		4500	45000	450000	
6		1800	18000	180000	
2		600	6000	60000	
0		Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
		300	3000	30000	Уровни тяжести последствия

Рис. 3. Матрица рисков сходов и взрывов стрелки

Пример

Согласно данным из системы АСРБ за 2011-2015 годы произошло 64 транспортных происшествий со столкновением, в которых был зафиксирован ущерб (его размеры приведены в таблице 4), а также 78 случаев, в которых ущерб не был зафиксирован.

Согласно формуле (7) получаем

$$\bar{C}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{64} C_{cm}^i + \sum_{i=65}^{142} 0}{78 + 64} \approx 488 \text{ тыс. руб.}$$

Пусть $\sum_{i=1}^{142} N_{cp}^i = 23$, $\sum_{i=1}^{142} N_{тя}^i = 10$, $\sum_{i=1}^{142} N_{см}^i = 1$, тогда по формуле (8) получаем

$$\bar{C}_q = \frac{1}{142} (3102 \cdot 23 + 6204 \cdot 10 + 31020 \cdot 1) = 1158 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда общий ущерб при столкновении по формуле (9) составляет

$$\bar{C}_{cm} = \bar{C}_1 + \bar{C}_2 = 488 + 1158 = 1646 \text{ тыс. руб.}$$

Согласно данным из системы АСРБ за 2013-2015 годы произошло 17 взрывов с ущербом, приведенным в таблице 5.

По формуле (10) получаем

$$\bar{C}_{вз} = \frac{\sum_{i=1}^{17} C_{вз}^i}{17} = 78 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 4. Размер ущерба от столкновений в тыс. руб. (по каждому происшествию)

207,67	19,56	440	156,81	65,17	21,8	76,7	54,1	35,05	445,92
61,31	5,11	1717	149,75	378	65,12	14,46	422,28	74,5	2264,62
226,3	1,3	326,7	645,25	57,86	1067,27	43,64	0,2	3,63	226,28
4,5	1,02	1082,27	1	1,35	21	195,75	923,35	1	2,45
9,44	11,4	800	41,06	2	2,04	4,49	173	19,35	9,9
66,9	393,4	0,9	2332,72	115,87	5,9	5,9	263	85,7	1612
22	42,7	654,38	51139						

Таблица 5. Размер ущерба от взрывов в тыс. руб. (по каждому происшествию)

8,49	110,88	49,04	1	18,78	102,39	64,39	85,3	21,61	174,11
4,25	389,48	132,01	91,01	2,57	72,04	0,35			

Таблица 6. Размер ущерба от сходов в тыс. руб. (по каждому происшествию)

79	14,8	422,3	158,03	7,66	28,83	3	215	503,67	9,13
328,07	3,86	133,18	3	20,31	573,44	363,42	263,69	261,9	251,7
247,26	27,05	34	180,75	219,6	322,76	262,5	5123,35	266,45	2027,08
59,75	281,74	228,38	193,5	474,3	75,5	33,93	52,9	82,35	38,96
29,13	1,44	68,07	1,38	1	150,62	970,07	33,3	15	117,3
3,2	375,95	200	192,82	45,64	45,3	349,47	28,31	78,9	33,3
579,26	338,46	479,17	13	43,37	152	525,22	920,84	203,77	2411,23
2	88,52	109,31	408,65	1007,25	1,99	10	608,29	137,7	113,24
7	16,63	11,7	102,78	15	15,89	23,6	25	18,97	34
48,74	48,69	2	15	309,05	223,68	66,28	993,66	42,76	30
155,06	163,25	56,06	43,48	73,67	19,28	36,6	67,9	46	112
71,65	149,05	76,7	33,13	12,34	491,8	1460	32,25	220,61	3,2
9,37	19,2	118,53	703,44	72	124,52	7,73	146,78	188,04	150,47
142,3	179,12	306,86	3,6	717,69	29,5	149,7	254,01	94,77	2
34	309,21	116	10	30	93,9	110	40,77	103,85	1147,05
483,05	89,73	12	340	34	420,16	3,6	24	6,49	139,53
899,9	1	31,67	55,27	22,2	106,76	1,68	129,9	118,61	160
150,8	256,63	374,41	29,62	74,8	98,21	20	292,99	80,46	162,72
1446	544,06	37,56	1610,54	55,1	79,77	101	93,46	125	260,3
3,1	46	773,55	24,5	27,03	203	13,92	655,1	72,49	216
303,89	24,47	58,49	256	447,55	41,43	37,9	8,3	247,99	0,52
704,67	26,5	80,74	494,73	174,99	16,15	58,89	154,81	8,56	17,79
62,82									

По данным из системы АСРБ за 2013-2015 годы произошел 221 взрез с последующим сходом с ущербом, приведенным в таблице 6.

По формуле (11) получаем

$$\bar{C}_{cx} = \frac{\sum_{i=1}^{221} C_{cx}^i}{221} = 225 \text{ тыс. руб.}$$

Пусть, как и в работе [2], на станции работают два локомотива, каждый из которых в среднем за час пере-

секает 36 стрелок, а вероятность проезда запрещающего сигнала маневровым составом равна $P_m = 1,4 \cdot 10^{-4}$, вероятность взреза стрелки равна вероятности схода с рельсов после взреза $P_{cx} = P_{вз} = 0,1$, тогда вероятность взреза стрелки с последующим сходом с рельсов вычисляется по формуле (3)

$$P_{вз(со сходом)} = P_m \cdot P_{вз} \cdot P_{cx} = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 1,4 \cdot 10^{-6},$$

а вероятность взреза стрелки без последующего схода вычисляется по формуле (4)

$$P_{\text{вз(без схода)}} = P_{\text{м}} P_{\text{вз}} (1 - P_{\text{сх}}) = \\ = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,1) = 1,26 \cdot 10^{-5}.$$

Общее количество стрелок, проезжаемых маневровыми составами за год, вычисляется по формуле (2)

$$N_{\text{год}} = 365 \cdot 24 \cdot \sum_{l=1}^L N_l = 365 \cdot 24 \cdot (36 + 36) = 630720.$$

Следовательно, среднее количество взрезанных стрелок по формуле (5) составляет

$$\bar{N}_{\text{год}}^{\text{вз}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(без схода)}} = 630720 \cdot 1,26 \cdot 10^{-5} = 7,947,$$

а среднее количество взрезанных стрелок с последующим сходом по формуле (6) равно

$$\bar{N}_{\text{год}}^{\text{сх}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(со сходом)}} = 630720 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6} = 0,883.$$

Пусть также при помощи формулы (1) получено, что

$$P(A_{\text{год}}) = 0,3.$$

Найдем количественные значения рисков от всех неблагоприятных событий и соответствующие им зоны риска.

Риск от столкновений вычисляется по формуле (12) и составляет

$$R_{\text{ст}} = P(A_{\text{год}}) \cdot \bar{C}_{\text{ст}} = 0,3 \cdot 1646 = 493,8 \text{ тыс. руб.}$$

При этом попадаем в оранжевую зону – зону нежелательного риска. Следовательно, необходимо принимать меры по уменьшению риска. В качестве такой меры можно предложить установку на станции системы Маневровой Автоматической Локомотивной Сигнализации (МАЛС).

Риски от взрезов и сходов вычисляются по формуле (13) и (14)

$$R_{\text{вз}} = \bar{N}_{\text{год}}^{\text{вз}} \cdot \bar{C}_{\text{вз}} = 7,947 \cdot 78 = 620 \text{ тыс. руб.},$$

$$R_{\text{сх}} = \bar{N}_{\text{год}}^{\text{сх}} \cdot \bar{C}_{\text{сх}} = 0,883 \cdot 225 = 199 \text{ тыс. руб.}$$

При этом попадаем в зеленую зону – зону не принимаемого в расчет риска. Следовательно, на данной станции никаких мер по снижению риска от взрезов и сходов проводить не надо. Отметим, что риск от взрезов оказывается больше, чем риск от столкновений. Тем не менее, меры по снижению риска столкновения проводить необходимо, а по снижению риска взрезов – нет. Это обстоятельство связано с тем, что при столкновении ОАО «РЖД» несет дополнительные репутационные издержки, усугубляющиеся тем фактом, что столкновение происходит на станции с большим количеством людей.

Заключение

В работе исследована проблема расчета риска неблагоприятных событий, вызванных проездом пассажирским поездом или маневровым составом за-

прещающего сигнала светофора. Приведены формулы расчета вероятности хотя бы одного столкновения на станции пассажирского поезда за год, среднего количества взрезанных стрелок маневровым составом без последующего схода, среднее число сходов с рельсов за год. Приведены формулы по расчету среднего ущерба от неблагоприятных событий. Построены матрицы рисков для всех неблагоприятных событий. Приведен пример использования полученных результатов, основанный на гипотетических данных и экспертных оценках.

Библиографический список

- ГОСТ Р 54505-2011 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте».
- Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Оценка вероятности столкновения железнодорожных составов на железнодорожных станциях на основе пуассоновской модели // Автоматика и телемеханика, 2016. №11. (принята к публикации).
- Кибзун А.И., Горяинова Е.Р., Наумов А.В. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
- Статья 1 Федерального закона от 14.12.2015 N 376-ФЗ.
- Новожилов Е.О. Принципы построения матрицы рисков // Надежность. 2015. № 3(54), с. 73-86.

Сведения об авторах

Игорь Б. Шубинский, доктор технических наук, профессор, директор ЗАО «ИБ Транс», Москва, Россия, тел. +7 (495) 786-68-57, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

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

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

Юрий С. Кан, доктор физико-математических наук, профессор, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: yu_kan@mail.ru

Андрей И. Кибзун, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: kibzun@mail.ru

Евгений Н. Платонов, кандидат физико-математических наук, доцент, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: en.platonov@gmail.com

Поступила 02.02.2016

Генезис надежности уникальных высокоответственных систем

Юрий П. Похабов, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Олег К. Валишевский, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), e-mail: valishevsky@iss-reshetnev.ru



Юрий П. Похабов



Олег К.
Валишевский

Резюме. Цель. Предлагается взгляд на генезис надежности уникальных высокоответственных систем, характеризуемых малой вероятностью отказов, на примере трансформируемых конструкций космических аппаратов, для которых сама возможность отказов способна поставить под сомнение целесообразность их создания. Показано, на какой из стадий жизненного цикла уникальных высокоответственных систем меры по обеспечению их надежности максимально действенны, а когда уже поздно что-либо предпринимать.

Методы. Не учет генезиса уникальных высокоответственных систем неизбежно приводит к отказам на стадии эксплуатации изделий, причем отказы обусловлены ошибками проектирования, конструирования, моделирования, а также возникновением различного рода отклонений при производстве. На практике до 80% случаев отказов предопределяются еще до начала эксплуатации – «за кульманом» и в производственных цехах, когда что-то недодумали, не учли, где-то ошиблись, допустили брак, не проконтролировали т.д. Надежность будущих изделий зависит от качества принимаемых решений в процессе разработки, которые напрямую зависят от принципов, правил и требований, используемых при проектировании и конструировании. Указанные понятия взаимосвязаны и несут конкретную смысловую нагрузку. Принципы используются для выработки проектных решений. Правила являются переходным звеном от теории к практике и часто отражают полученный опыт, который должен учитываться в новых разработках во избежание повторения ошибок. Требования к надежности на этапе конструирования формулируются в результате применения целенаправленных процедур и анализов и устанавливаются в графической и текстовой форме в конструкторской документации: в технических требованиях и на поле чертежа, а также в технических условиях. Исполнение этих требований в конечном итоге направлено на безусловное выполнение изделием своих функциональных задач и обеспечение заданной надежности. **Результаты.** Рассмотренные в статье аспекты позволяют разграничить методы теории надежности, которые базируются на вероятностно-статистических моделях, с практическими инженерными методами, нацеленными на создание надежной техники. Область теории надежности распространяется на исследование поведения готовых изделий, исходя из наличия информации о математических моделях, учитывающих стохастичность параметров. Реальные объекты в теории надежности схематизируются до моделей, которые описываются вероятностными зависимостями и имеют выборку, пригодную для статистических обобщений. На практике же, как правило, инженеры работают в условиях отсутствия статистики и представлений о вероятностном поведении будущего изделия, причем арсенал методов и алгоритмов его работы, по сути, позволяет в широком диапазоне влиять на надежность реальных изделий. **Выводы.** В статье показано, что стадии жизненного цикла уникальных высокоответственных систем, предшествующих этапу эксплуатации, резко дифференцированы по действенности мер обеспечения надежности. На каждой стадии необходимо пользоваться определенными, свойственными только данной стадии алгоритмами и методами надежности, что способно существенно повысить эффективность решения задач надежности уникальных высокоответственных систем.

Ключевые слова: уникальные высокоответственные системы, трансформируемая конструкция, космический аппарат, надежность, генезис, жизненный цикл изделий.

Формат цитирования: Похабов Ю.П., Валишевский О.К. Генезис надежности уникальных высокоответственных систем // Надежность. 2016. №3. С. 47-53. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-47-53.

Введение

При создании любого технического изделия в первую очередь решается задача достигнуть таких выходных характеристик, которые оно только способно продемонстрировать. Однако сама по себе

достижимость таких характеристик не гарантирует того, что изделия будут изготавливаться от раза к разу годными, не перестанут нормально функционировать после хранения и транспортирования, выполнят свои целевые задачи в полном объеме или не отработают меньше заданного срока.

Неизбежные изменения возможных состояний изделий под воздействием внешних условий и внутренних химико-физических процессов способны со временем существенным образом снизить их выходные характеристики, в результате чего ожидаемая эффективность изделий может оказаться не достигнутой.

Почему такое возможно? Чаще всего недооцениваются, либо должным образом не учитываются режимы и условия функционирования изделий. Нередки непреднамеренные ошибочные действия персонала в процессе производства и эксплуатации. Иногда конструктивные решения опережают технологические возможности производства или неадекватны представлениям о физических процессах, происходящих при работе изделий. В любом из случаев указанные предпосылки могут привести к возникновению отказов, которые способны обернуться авариями и катастрофами. Если социально-экономические потери, которые общество готово понести в случае отказов изделий, превышают допустимый критический уровень, то возникает необходимость в решении задач по обеспечению их надежности.

Для обычной техники обеспечение надежности принято считать вторичной задачей, которая решается чаще всего «между прочим», поскольку отказы, как правило, не имеют серьезных последствий. Вопросы надежности в этом случае рассматриваются в контексте оптимизации финансовых и имиджевых издержек. Однако существуют технические объекты, которые не допускают отказов, несмотря на неизбежные дополнительные финансовые затраты по их профилактике, ведь в противном случае это может привести к более существенным потерям в результате аварий. Пример таких объектов – уникальные высокоответственные системы (УВС), для которых в некоторых случаях сама возможность отказов способна поставить под сомнение целесообразность их создания. Здесь важно разобраться, на какой из стадий жизненного цикла УВС меры по обеспечению надежности максимально действенны, а когда уже поздно что-либо предпринимать.

В связи с этим имеет смысл рассмотреть генезис надежности УВС на примере трансформируемых конструкций (ТК), основная задача которых за счет одноразового срабатывания на орбите обеспечить условия для длительного функционирования космического аппарата (КА) в условиях космического пространства [1].

Что происходит с надежностью на этапе эксплуатации трансформируемых конструкций

Согласно ГОСТ 25866-83 эксплуатация изделий в общем случае включает в себя использование по назначению, транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт. Для раскрывающихся частей ТК процесс эксплуатации условно можно ограничить рамками, начиная с момента передачи изделия на хранение после заводской приемки и заканчивая раскрытием

в рабочую конфигурацию на околоземной орбите. В процессе эксплуатации ТК последовательно проходят следующие стадии жизненного цикла: хранение, наземное транспортирование, техническое обслуживание, подготовку на полигоне к запуску, полет в составе ракеты-носителя, выведение на орбиту, подготовку к раскрытию и раскрытию в рабочую конфигурацию [2].

Предположим, что при эксплуатации в какой-либо момент времени t ТК может внезапно отказать и восстановить или отремонтировать ее в последующие моменты времени невозможно. Определим вероятность $P_f(t)$, с которой такая конструкция будет функционировать в пределах периода эксплуатации вплоть до момента наступления времени t . Если представить работоспособность ТК как выборку последовательных независимых испытаний с вероятностями $P_v(\tau)$, то вероятность ее функционирования в период времени t будет равна:

$$P_f(t) = \prod_{\tau=1}^t P_v(\tau). \quad (1)$$

Из (1) следует, что с течением времени t вероятность функционирования ТК не может повышаться, она может снижаться, либо теоретически оставаться постоянной на уровне 1.

Снижение $P_f(t)$ является результатом стохастических изменений состояния ТК при воздействии внешних факторов (перегрузок, ударов, сотрясений, вибраций, колебаний температур, влажности, агрессивных сред и проч.), вследствие реализации следующих процессов:

- деградации физико-механических свойств материалов из-за износа, коррозии, старения, охрупчивания и т.д.;
- изменений физико-механических характеристик материалов при воздействии знакопеременных температур;
- необратимых деформаций и разрушений (пластических деформаций, смятия контактных поверхностей, ползучести, трещин и т.д.);
- ухудшения характеристик трибосопряжений;
- проявления конструкционных нестабильностей в виде смещений фиксированных деталей, самоотвинчивания резьбовых соединений, изменений люфтов в подвижных узлах, нарушений регулировки механизмов и т.п.

Следующим немаловажным аспектом является решение вопроса об исходном уровне величины P_0 в момент времени, который соответствует началу эксплуатации.

Рассмотрим ситуацию на момент времени, когда ТК находится в состоянии ожидания эксплуатации, т.е. ей уже в полной мере присуща способность проявлять свойства надежности, поскольку взаимоположение, взаимосвязь и взаимодействие элементов внутри ТК уже осуществлено (ТК готова к эксплуатации), а взаимоположение, взаимосвязь и взаимодействие ТК в окружающей среде и с другими объектами предусмотрено и предполагается. Указанное состояние ТК априори задано в конструкторской документации (КД) в виде номинальных

значений параметров μ_i и соответствующих допусков $\Delta\mu_i$. Причем сами параметры являются случайными величинами (зависящими или не зависящими от времени), которые могут изменяться в пределах не случайных границ поля допусков:

$$\Delta\mu_i = \mu_{i\max} - \mu_{i\min} \quad \forall i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Совокупность параметров μ_i составляет множество:

$$\mu_i \in R^N. \quad (3)$$

Число уравнений N множества (3) соответствует числу параметров конструкции и с ростом ее детализации может увеличиваться, причем сами параметры, согласно (2) всегда будут находиться в заданном диапазоне:

$$\mu_{i\min} \leq \mu_i \leq \mu_{i\max}. \quad (4)$$

Если КД доработана настолько, что в ней отсутствуют грубые ошибки, требующие проведения изменений КД в процессе производства, то она является стационарной стохастической моделью объекта, представленной в чертежно-текстовом виде [3]. Если случайная величина любого параметра $\mu_i(t)$, предусмотренного в стационарной модели ТК, при изготовлении укладывается в допуск $\Delta\mu_i$, то ТК считается годной для эксплуатации. Таким образом, готовность объекта к эксплуатации определяется выполнением всех требований КД по соблюдению установленных параметров μ_i , а ее работоспособность определяется случайностью их попадания в заданные допусками пределы (4). Выход параметров μ_i за пределы допусков квалифицируется как отказ. Кроме того, возможность наступления отказов заложена в самом принципе использования стационарной стохастической модели объекта. Поскольку число уравнений (3) при разработке КД всегда конечно при бесконечном числе случайных величин, то существует риск не учета каких-либо факторов отказа.

Таким образом, до начала эксплуатации всегда существует риск с вероятностью γ , что не все параметры μ_i при конструировании будут должным образом учтены, а те параметры, которые заданы в КД, будут находиться при эксплуатации в соответствующем допуске $\Delta\mu_i$.

Предположим, что все параметры ТК независимы в смысле надежности, а не учет какого-либо из параметров или выход за пределы допусков любого параметра приведет к его отказу. Событие, характеризующее переход в состояние готовности к функционированию ТК без отказа, обозначим H , а событие, характеризующее наступление отказа в случае реализации риска с вероятностью γ , обозначим A , тогда:

$$\begin{aligned} P(H) + P(A) &= 1, \quad P(A) = \gamma, \\ P(H) &= 1 - \gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что исходная надежность ТК до начала эксплуатации $P_0 = P(H)$ всегда меньше единицы. Причем, после функционирования ТК в те-

чение времени t , ее надежность с учетом формул (1) и (5) равна:

$$P(t) = P_f(t) \cdot P(H) \quad (6)$$

Формула (6) позволяет рассматривать надежность ТК не только как результат выполнения ее функций без учета генезиса своего происхождения, но и как результат процесса, вследствие которого она непосредственно возникает. Таким образом, заданное в техническом задании (ТЗ) на разработку значение показателя безотказности ТК должно определяться формулой (6), которая подразумевает учет не только условий эксплуатации, но также конструкторских и производственных предпосылок к отказам вследствие следующих факторов:

- несовершенств методов проектирования и конструирования, конструкторских ошибок, нарушений требований нормативно-технической документации, нарушений норм и правил конструирования;
- несовершенств и ошибок применяемых технологий;
- дефектов и ошибок изготовления, сборки и монтажа, нарушений технологических процессов изготовления, приработки узлов трения и сборки, ухудшения параметров в результате испытаний, предусмотренных производственным циклом.

Мало того, если при условии перехода в состояние готовности к функционированию без отказа, обозначенном как событие H , нормальное выполнение функций ТК при раскрытии обозначить как событие B , то надежность (6) функционирования ТК в течение времени t следует интерпретировать как условную вероятность:

$$P(t) = P(B|H).$$

Исходя из сказанного, надежность следует рассматривать и оценивать не только на стадиях жизненного цикла изделия, готового к эксплуатации, но и в тех случаях, когда оно создается в процессе производства или существует в виде моделей, таких как:

- информационные модели при проектировании;
- графические модели при конструировании;
- модели технологического процесса при подготовке производства.

По мере осуществления последовательного моделирования и производства изделия в течение жизненного цикла, его ожидаемая исходная надежность на начало эксплуатации имеет тенденцию к снижению из-за неизбежности накопления предпосылок к отказам как вследствие ошибок моделирования, так и вследствие возникновения различного рода отклонений при производстве.

Справедливость формулы (6) подтверждается результатами исследований, проведенных Rome Air Development Center с целью совершенствования стандарта по обеспечению надежности Министерства обороны США MIL-HDBK-217 [4]. Анализу подвергались сведения об авариях и инцидентах на 300 американских и европейских КА, касающиеся 2500 фактов отказов за период с начала 1960-х годов по январь 1984 года. В качестве причин отказов ТК были признаны следующие факторы: ошибки конструирования – 34,4%, недооценка

условий внешней среды – 25,3%, дефекты комплектующих – 10,8%, качество изготовления – 8,9%, условия эксплуатации – 6,9%, другие – 2,2% и неизвестные – 11,5%. Фактически, не менее чем в 79,4% случаев, отказы ТК были предопределены еще до начала их эксплуатации – «за кулисами» и в производственных цехах (что-то недодумали, не учли, где-то ошиблись, допустили брак, не проконтролировали т.д.).

Таким образом, ожидаемая безотказность ТК на начало эксплуатации в общем случае всегда меньше единицы и в течение эксплуатации имеет тенденцию к снижению. Мало того, конструкторско-технологические и производственные причины, которые предопределяют отказы еще до начала эксплуатации, превалируют над причинами отказов, возникающими вследствие факторов, воздействующих при эксплуатации.

Запись формул (1) и (5) не противоречит тому, чтобы безотказность ТК в интервале времени эксплуатации от 0 до t была «близкой к единице» – фактически «ноль и девять в периоде»: $0, (9) \cong 1$. Если предположить, что при проектировании, конструировании, технологической подготовке и производстве не допущено ни единой ошибки (т.е. нет причин для отказов), то, гипотетически, исходная надежность объекта на начало эксплуатации может быть предельно возможной, что не противоречит идеи создания безотказных объектов.

Что происходит с надежностью до начала эксплуатации трансформируемых конструкций

Разработка и постановка продукции на производство согласно ГОСТ Р 15.201-2000 укрупненно включает следующие стадии:

- 1) Разработку тактико-технического задания на опытно-конструкторскую работу (ОКР);
- 2) Проведение ОКР (в т.ч. разработку КД и технологической документации (ТД) согласно ГОСТ 2.103-68 и ГОСТ 3.1102-81, соответственно);
- 3) Постановку на производство (в т.ч. подготовку и освоение производства, изготовление продукции и проведение квалификационных испытаний).

На стадиях разработки и постановки продукции на производство с позиций генезиса надежности имеет смысл рассмотреть следующие стадии жизненного цикла продукции:

- разработка ТЗ – установление требований к выпускаемой продукции;
- проектирование (техническое предложение, эскизный проект, технический проект) – увязка и обоснование требований к продукции;
- разработка КД – реализация требований к продукции в технической документации для ее изготовления;
- разработка ТД – увязка и согласование требований КД с возможностями производства;
- производство (постановка продукции на производство) – выпуск готовой продукции.

Как отмечалось в [5], надежность на стадии разработки и постановки продукции на производство проявляется как способность. В соответствии с этим тезисом, на момент начала разработки ТЗ способность будущего изделия проявлять надежность отсутствует. Если употребить термин «условной вероятности безотказной работы» изделия, то она равна нулю (нет еще ничего, не о чем говорить). При разработке ТЗ формируются требования к условиям и режимам эксплуатации будущего изделия, в которых ему, собственно, предстоит проявить свойство надежности. К этому времени должны быть получены и накоплены сведения об условиях внешних воздействий и нагрузок, выполнены фундаментальные исследования по изучению характеристик конструкционных материалов, отработаны ключевые технологии производства. При наличии достоверных статистических выборок существует возможность уйти от стохастической зависимости изменения параметров изделия, переводя решение задач надежности к детерминированному подходу. Наиболее известным примером такого рода является обеспечение прочности конструкций с использованием коэффициентов безопасности и запасов прочности. Чем более обоснованы и точнее будут сформулированы такие требования в ТЗ, тем выше условная вероятность безотказной работы будущего изделия.

Исходя из требований ТЗ в процессе проектирования (термин «проектирование» используется здесь согласно ГОСТ 22487-77, статья 1), закладываются принципы работы будущего изделия, детализируются технические решения, оптимизируются характеристики изделия и алгоритмы его функционирования, уточняются расчетные схемы и методы исчисления параметров и т.д.

Этап проектирования является наиболее важным для обеспечения надежности будущего изделия, поскольку здесь существует возможность принятия таких технических решений, которые позволяют выбрать рациональные конструктивно-компоновочные и конструктивно-силовые схемы, и способны резко снизить неопределенности состояний изделий, тем самым повысить его надежность. Например, использование тепловых развязок в узлах крепления протяженных континуальных конструкций приводит к исключению возможности заклинивания (перекашивания) исполнительных элементов замков системы зачекочки в нестационарном поле знакопеременных температур [6]. Другим примером, подобного рода может служить перенос сварного шва в лейнере металлокомпозитного сосуда высокого давления из зоны максимальных напряжений, что приводит к снижению влияния технологических дефектов в сварных швах (в частности, за счет образования окисных плен на поверхности свариваемых деталей), соответственно, к повышению и стабилизации значений запасов прочности [7].

Способность будущего изделия проявлять надежность изменяется и на стадии разработки КД, но возможности прироста условной вероятности безотказной

работы ограничены (разработка КД производится на основе уже принятых при проектировании технических решений, причем исправить проектные ошибки при конструировании сложно). Резервы повышения надежности связаны с возможностями исправления и подчистки конструктивных «мелочей», допущенных за счет невнимательности, неправильного выбора параметров и решений, некомпетентности, привычки работать на «авось», недостаточной квалифицированности проектировщиков и т.д. [8]. Главным результатом конструирования являются ясные и четкие требования к изготовлению изделий, исключающие любые недосказанности, двоякости понимания и интерпретации. К моменту завершения разработки КД условная вероятность безотказной работы изделия достигает предельно возможного уровня для данной разработки (подразумевается, что разработчик вложил все свои знания, умения и навыки, т.е. на большее он уже не способен).

Надежность будущих изделий напрямую зависит от качества принимаемых решений в процессе разработки, которые напрямую зависят от принципов, правил и требований, используемых при проектировании и конструировании. Причем указанные понятия взаимосвязаны и несут конкретную смысловую нагрузку.

Принцип – это основополагающая истина, не требующая доказательств, которая следует из установленных закономерностей и формирует общую стратегию действий. Принципы используются для выработки проектных решений, как *«промежуточных или конечных описаний объекта проектирования, необходимых и достаточных для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования»* [ГОСТ 22487-77, статья 7]. Число принципов ограничено основополагающими факторами, каждый из которых выражает физическую сущность того или иного явления, влияющего на надежность. Сущность этих явлений объективна и незыблема, например, число функциональных элементов должно быть минимальным, изделие в процессе эксплуатации не должно разрушаться, энергии приводов должно быть достаточно для осуществления предписанных перемещений и т.д. Принцип – это теоретическая основа дальнейших рассуждений, решений или действий, в нем не содержится конкретных указаний на способы осуществления, просто это должно быть так, а не иначе. Для реализации принципов используются правила, которые вытекают из принципов, ими определяется и конкретизируется применение принципов.

Правило – это закономерность, служащая руководством в чем-либо, которая основана на устойчивой взаимосвязи между явлениями, установленном порядке или нормах деятельности. Принципы и правила существуют объективно, независимо от нас, отступление от них нарушает порядок вещей.

Рассмотрим пример, дающий представление о том, чем отличаются принципы от правил. Обеспечение энергоизбыточности приводов раскрытия ТК – это принцип работоспособности поворотной конструкции в условиях

неопределенностей внешних условий, а также разбросов физических свойств материалов и технологических допусков деталей и сборочных единиц конструкций. Значения величины энергоизбыточности определяются правилами по выбору соотношения моментов движущих сил и моментов сил сопротивления в поворотном узле для конкретных типов приводов, которые учитывают действующие сопротивления, инерционность раскрывающихся конструкций, комбинацию наихудших факторов и т.п. [9]. Принцип указывает, как должно быть (необходимо обеспечить энергоизбыточность), а правило уточняет, как именно это должно быть осуществлено (например, отношение запаса движущего момента к моменту сил сопротивления в шарнире должно быть не менее трех для худшего сочетания факторов, отношение запаса движущего момента должно быть обеспечено в любом угловом положении шарнира и т.д.).

Построить правила без принципов нельзя. Правила используются для выработки проектных и конструкторских решений.

Правила являются переходным звеном от теории к практике, поэтому они часто являются концентрированным опытом, который должен учитываться в новых разработках во избежание повторения ошибок. Этот опыт может применяться в форме установки «так еще деды делали», либо в явном виде отражаться в положениях нормативно-технической документации. К сожалению, проследить, насколько оправданно и действительно используются правила, крайне сложно, для этого они должны быть по меньшей мере формализованы и записаны, как, например, в работе [10], к тому же для новых разработок правил еще не существует по определению. С позиций обеспечения надежности, следование правилам является необходимым, но не достаточным условием.

Надежность не может быть достигнута «по умолчанию», она может быть обеспечена только в результате неукоснительного исполнения требований, направленных на стабильность проявления заданных свойств объектов. Основой обеспечения надежности является выполнение требований, как осознанной необходимости соблюдения условий, которые должны быть строго исполнены на производстве. Требование – потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным [ГОСТ ISO 9000-2011, статья 3.1.2].

Требования к надежности на этапе конструирования могут быть сформулированы в результате применения целенаправленных процедур и анализов [11] и устанавливаются в графической и текстовой форме в КД: в технических требованиях и на поле чертежа, а также в технических условиях. Их исполнение в конечном итоге направлено на безусловное выполнение изделием своих функциональных задач. Однако исполнение требований КД в процессе постановки продукции на производство не способно повысить условную вероятность безотказной работы изделия в силу того, что перед производителями таких целей никто не ставит. При

этом возникает достаточно поводов и причин отступить от требований КД при изготовлении, нарушить технологические процессы и технологическую дисциплину, недостаточно или неэффективно использовать средства и методы неразрушающего контроля на производстве и т.п., что неизбежно приводит к дефектам и браку.

Задача на стадии выпуска готовой продукции – «не навредить» качеству и надежности при воплощении чертежно-текстовой модели в готовое изделие, при этом максимальная задача – чтобы конструктор, технолог и производитель были «на одной волне». Для этого необходимо, чтобы требования в КД были без искажений и интерпретаций отображены в ТД, а на производстве исполнены с допустимыми отклонениями [12]. На этапе разработки ТД и постановки продукции на производство, условная вероятность безотказной работы будущего изделия естественным образом снижается до значений исходного уровня надежности P_0 на начало эксплуатации.

Изменение надежности трансформируемых конструкций на стадиях жизненного цикла

Если на основании (6) исходить из того, что причины отказов возникают, существуют и развиваются, начиная уже с самых ранних стадий жизненного цикла ТК, то условная вероятность отказов может быть представлена графиком, приведенным на рисунке.

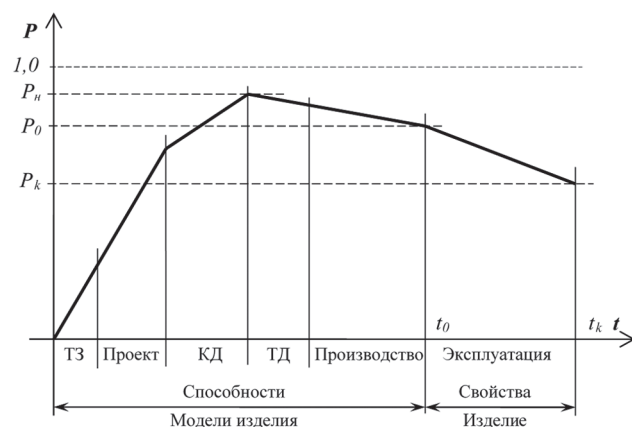


Рис. График изменения вероятности безотказной работы (условной вероятности) УВС по стадиям жизненного цикла

График показывает, что на конец эксплуатации ТК t_k его надежность P_k имеет минимальное значение, определяемое (1). Считается, что изделие обеспечивает заданную надежность $P_{зад}$ если выполняется неравенство:

$$P_k > P_{зад}$$

Падение надежности изделия в интервале времени от t_0 до t_k согласуется с представлением о поведении изделий, исходя из широко известной «корытообразной кривой» надежности изделия в течение срока службы [13]. Указан-

ная кривая характеризует изменение вероятности отказов при эксплуатации. Считается, что в начальный период эксплуатации вероятность поломки высока из-за принципиальных ошибок, допускаемых при проектировании, дефектов изготовления или неправильной сборки изделий. Затем наступает период накопления износа изделия, в течение которого вероятность отказа сравнительно не велика. После того, как износ достигает определенного уровня, отказы вновь резко возрастают.

Для ТК не предусматривается длительная наработка на отказ и связанные с этим процессы деградации и износа, как представляется классической «корытообразной кривой», поскольку их эксплуатация осуществляется кратковременно в течение периода раскрытия механизмов КА при подготовке его к работе. Процесс эксплуатации ТК полностью вписывается только в первый участок «корытообразной кривой». Однако, поскольку ТК относятся к УВС, характеризующихся малой вероятностью отказов, то отказы на этапе эксплуатации должны быть минимальными, т.е. к началу эксплуатации вероятности отказов из-за проектно-конструкторских и производственных ошибок должны быть исключены, или минимизированы.

Согласно (6), к началу эксплуатации исходная надежность P_0 всегда ниже единицы, при этом до момента времени t_0 изделие характеризуется способностью проявлять свойство надежности, а после – характеризуется самим свойством надежности. Разделение понятия надежности как способности и как свойства позволяет рассматривать по отдельности задачи практической инженерии, нацеленные на получение функционального и надежного изделия, и задачи надежности в классической постановке теории надежности.

Как следует из рисунка, способность изделия проявлять свойство надежности при переходах со стадии на стадию жизненного цикла существенно меняется. Переход со стадии на стадию жизненного цикла в разной степени сказывается на исходном уровне надежности к началу эксплуатации. Представленный график наглядно иллюстрирует задачи, стоящие на различных стадиях жизненного цикла при разработке и производстве ТК:

- при разработке ТЗ – закончить фундаментальные исследования по изучению характеристик конструкционных материалов и получить все необходимые сведения об условиях внешних воздействий и нагрузок;
- при проектировании – обеспечить максимально возможный уровень надежности за счет использования эффективных технических решений;
- при выпуске КД – как минимум, не допустить потери надежности, достигнутой при проектировании, и как максимум, повысить надежность за счет исправления ошибок проекта и установления ясных и четких требований к изготовлению ТК;
- при выпуске ТД – не исказить требования к надежности в КД;
- при производстве – не допустить отступлений от требований КД и ТД.

Заключение

Рассмотренные в статье аспекты, связанные с генезисом надежности УВС, позволяют разграничить методы теории надежности, которые базируются на вероятностно-статистических моделях, с практически инженерными методами, нацеленными на создание надежной техники. Область теории надежности распространяется на исследование поведения готовых изделий, исходя из наличия информации о математических моделях, учитывающих стохастичность параметров. Реальные объекты в теории надежности схематизируются до моделей, которые описываются вероятностными зависимостями и имеют выборку, пригодную для статистических обобщений. Но на практике, как правило, инженеры работают в условиях отсутствия статистики и представлений о вероятностном поведении будущего изделия, однако, арсенал методов и алгоритмов его работы, по сути, позволяет в широком диапазоне влиять на надежность реальных изделий.

В статье на примере ТК показано, что стадии жизненного цикла УВС резко дифференцированы по действенности мер обеспечения надежности. На каждой стадии необходимо пользоваться определенными, свойственными только данной стадии алгоритмами и методами надежности, что способно существенно повысить эффективность решения задач надежности УВС.

Библиографический список

1. Похабов Ю.П. Подход к обеспечению надежности уникальных высокоответственных систем на примере крупногабаритных трансформируемых конструкций // Надежность. – 2016. – № 1. – С. 24-36.
2. Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. – Красноярск, СибГАУ, 2011. – 488 с.
3. Куриленко А.М., Ледовский А.Д. Качество судовых динамических систем правления. – СПб.: Судостроение, 1994. – 176 с.
4. Hecht H., Hecht M. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center, no. RADC-TR-85-229, Dec. 1985. – 156 p.
5. Похабов Ю.П. О философическом аспекте надежности на примерах уникальных высокоответственных систем // Надежность. – 2015. – № 3. – С. 16-27.

6. Способ закрепления изделий: пат. 2230945 Рос. Федерации. МПК F16B 1/00 / Ю.П. Похабов, В.В. Гриневич. – № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.

7. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Черняев А.П., Похабов Ю. П., Халиманович В. И. Экспериментальная оценка прочности и герметичности металлокомпозитных сосудов высокого давления // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 6. – С. 30-36.

8. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

9. Способ выбора привода для поворота конструкции в шарнирном узле: пат. 2198387 Рос. Федерации. МПК G 01L 3/00 5/00 / Ю.П. Похабов. – № 2000129330/28; заявл. 23.11.2000; опубл. 10.02.2003. Бюл. № 4.

10. Bowden M.L. Deployment devices // Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design, Edited by Peter L. Conley. John Wiley & Sons, Inc., 1998. – P. 495-542.

11. Похабов Ю.П. О методе конструкторско-технологического анализа надежности // Решетневские чтения. – 2015. – Т. 1. – № 19. – С. 126-128.

12. Похабов Ю.П. Обеспечение надежности крупногабаритных трансформируемых механических систем // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1. – № 18. – С. 95-97.

13. Клиффорд М. Справочник инженера. Инженерная механика. М.: Изд-во АСВ, 2003. 280 с.

Сведения об авторах

Юрий П. Похабов, кандидат технических наук, начальник центра научно-технических разработок, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), тел.: +7 913 593 43 89, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru 662972, Россия, Красноярский край, ЗАТО Железногорск, г. Железногорск, ул. Ленина, 55а

Олег К. Валишевский, ведущий инженер лаборатории трансформируемых конструкций, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), тел.: +7 913 582 21 41, e-mail: valishevsky@iss-reshetnev.ru 662972, Россия, Красноярский край, ЗАТО Железногорск, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

Поступила 17.03.2016

Новый международный терминологический стандарт по надежности

Виктор А. Нетес, Московский технический университет связи и информатизации, Москва, Россия, e-mail: vicnet@yandex.ru



Виктор А. Нетес

Резюме. В 2015 г. Международная электротехническая комиссия приняла новый международный стандарт IEC 60050-192, устанавливающий основные термины в области надежности и дающий их определения. Он был подготовлен ТК МЭК 56 «Надежность» под контролем ТК 1 «Терминология» и представляет собой Часть 192 Международного электротехнического словаря. Этот стандарт заменил принятый еще в 1990 г. предыдущий аналогичный стандарт IEC 60050-191. Статья посвящена IEC 60050-192, знакомство с которым необходимо всем специалистам в области надежности. Новый стандарт сравнивается как с прежним IEC 60050-191, так и с аналогичным отечественным ГОСТ 27.002–89. По сравнению с IEC 60050-191 в новом стандарте изменились заглавие и охват. Исключены разделы, содержащие термины, относящиеся к качеству услуг электросвязи и системам электроэнергетики. Исходя из этого, IEC 60050-192 озаглавлен просто «Надежность» (Dependability). Таким образом, он стал полностью соответствовать своему статусу горизонтального (т.е. межотраслевого, общетехнического) стандарта. Терминология в области надежности дается применительно к техническому объекту. Анализируются определение этого понятия, возможный состав объекта и ряд терминов, характеризующих виды объектов. В IEC 60050-192 дано новое определение понятия «надежность»: способность объекта функционировать как и когда требуется. Вокруг этого определения велись активные дискуссии, как в кругу экспертов МЭК, участвовавших в разработке стандарта, так и среди отечественных специалистов. Также изменилась и совокупность свойств, составляющих надежность, к которым стандарт относит: готовность, безотказность, восстанавливаемость, ремонтпригодность и обеспеченность технического обслуживания и ремонта, а в некоторых случаях также долговечность, безопасность и защищенность. Новым понятием здесь является «восстанавливаемость», которая определяется, как способность объекта восстанавливаться после отказа без ремонта. Рассматриваются разделы стандарта, посвященные состояниям объекта и временным понятиям, отказам и нарушениям, техническому обслуживанию и ремонту, показателям надежности, испытаниям, проектированию или конструированию, анализу и повышению надежности. При этом приводятся и при необходимости объясняются важнейшие термины, указываются новые термины, добавленные в стандарт, и термины, исключенные из него. Обращается внимание на отсутствие у некоторых терминов адекватных русских эквивалентов. Делается вывод, что хотя отечественная и международная терминология по надежности имеют много общего, между ними есть и существенные различия. Они обусловлены тем, что стандартизация терминология по надежности в нашей стране, начавшаяся полвека назад, многие годы шла в отрыве от аналогичной деятельности в международном масштабе. В силу указанных различий в настоящее время создание нового ГОСТ, гармонизированного с IEC 60050-192, не представляется возможным. Однако при этом надо стремиться к максимально возможному сближению отечественной и международной терминологии.

Ключевые слова: надежность, термины и определения, международный стандарт, Международная электротехническая комиссия.

Формат цитирования: Нетес В.А. Новый международный терминологический стандарт по надежности // Надежность. 2016. №3. С. 54-58. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-54-58

В начале 2015 г. Международная электротехническая комиссия (МЭК) приняла новый международный стандарт (МС) 60050-192, устанавливающий основные термины в области надежности и дающий их определения. Он представляет собой Часть 192 Международного электротехнического словаря (International Electrotechnical Vocabulary, IECV). Этот стандарт заменил принятый еще в 1990 году МС 60050-191, а также поправки к нему 1999 и 2002 годов. Вначале предполагалось, что новый стандарт будет второй редакцией МС 60050-191, но затем ему был дан иной номер (причина этого будут объяснена ниже).

МС 60050-192 был подготовлен Техническим комитетом (ТК) МЭК 56 «Надежность» под контролем ТК 1 «Терминология». Разработка шла довольно долго, ход этой работы был отражен в ряде публикаций на русском языке [1–3], однако основные цели этих статей были другими, и об этом стандарте в них говорилось достаточно кратко. Данная статья специально посвящена МС 60050-192, знакомство с которым необходимо всем специалистам в области надежности. Следует также обратить внимание на то, что некоторые понятия этого МС используются при создании нового межгосударственно-

го стандарта, который должен прийти на смену ГОСТ 27.002–89, и работа над которым идет полным ходом.

Конечно, в одной статье невозможно охватить все содержание МС 60050-192, поэтому здесь будут рассмотрены только наиболее важные моменты. При этом новый стандарт будет сравниваться как с прежним МС 60050-191, так и с аналогичным отечественным ГОСТ 27.002–89. По ходу изложения после первого упоминания терминов в скобках будут приводиться их английские эквиваленты из МС 60050-192.

С МС 60050-192, также как и с другими частями IECV, можно ознакомиться по онлайн-версии этого словаря, называемой «Электропедия» (www.electropedia.org/). Доступ к этому интернет-ресурсу свободный. Термины по надежности и их определения там даны на английском и французском языках, а только термины (без определений) еще и на арабском, немецком, испанском, японском, польском, португальском и китайском. Русской версии, к сожалению, нет (для МС 60050-191 она существовала, хотя и не была представлена в «Электропедии»). Полный текст МС на английском и французском языках в электронном виде или на бумаге можно приобрести через сайт МЭК (цена 310 швейцарских франков).

По сравнению с МС 60050-191 в новом стандарте изменились заглавие и охват. Исключены разделы, содержащие термины, относящиеся к качеству услуг электросвязи и системам электроэнергетики. Терминология по качеству услуг электросвязи содержится в Рекомендации E.800 Международного союза электросвязи [4], а терминам по надежности и качеству услуг систем электроэнергетики будет посвящен специальный МС 60050-692, разрабатываемый в настоящее время. Исходя из этого, МС 60050-192 озаглавлен просто «Надежность» (Dependability), тогда как МС 60050-191 назывался «Надежность и качество услуг» (Dependability and Quality of Service). Именно по этой причине был изменен и номер стандарта. Таким образом, МС 60050-192 стал полностью соответствовать своему статусу горизонтального (т.е. межотраслевого, общетехнического) стандарта, который должны использовать в своей работе все ТК по стандартизации.

Терминология в области надежности дается применительно к (техническому) объекту (item). В МС 60050-191 в определении этого термина просто перечислялись различные виды объектов: любая часть, компонент, устройство, подсистема, функциональная единица, аппаратура или система, которая может рассматриваться в отдельности. Однако вряд ли это исчерпывающий перечень всех возможных видов объектов. Поэтому в новом МС объект определен просто как предмет рассмотрения, а список указанных видов объектов перенесен в примечание. После этого даются определения терминам подобъект (sub item), система (system) и подсистема (subsystem).

В еще одном примечании указано, что объект может состоять из аппаратных средств, программного обеспечения, людей или любой их комбинации. Далее терминам «аппаратные средства» (hardware) и «программное

обеспечение» (software) даются определения. В стандарт включен также ряд терминов, характеризующих различные виды программного обеспечения (ПО): системное ПО (system software), прикладное ПО (application software), компьютерная программа (computer program), микропрограммное обеспечение (firmware), встроенное ПО (embedded software).

Термины «ремонтируемый / неремонтируемый объект» (repaired / non-repaired item), бывшие в прежнем МС, заменены на более точные «ремонтпригодный / неремонтпригодный объект» (repairable / non-repairable item). Дело в том, что словосочетание «ремонтируемый объект» может пониматься двояко: как объект, ремонт которого возможен, или как объект, ремонт которого осуществляется в данный момент. Чтобы исключить второе неверное понимание, термины и были заменены.

В МС 60050-191 определение ключевого термина «надежность» (dependability) фактически сводилось к перечислению составляющих его свойств: готовности (availability), безотказности (reliability), ремонтпригодности (maintainability) и обеспеченности технического обслуживания и ремонта (maintenance support performance). В МС 60050-192 дано новое определение надежности: способность объекта функционировать как и когда требуется (ability to perform as and when required). Вокруг этого определения велись активные дискуссии, как в кругу экспертов МЭК, участвовавших в разработке стандарта, так и среди отечественных специалистов. Анализ этого и других определений надежности была посвящена специальная статья [3], поэтому здесь этот вопрос не рассмотрен.

К этому определению дано примечание, в котором перечисляются свойства, составляющие надежность. К ним относятся: готовность, безотказность, восстанавливаемость (recoverability), ремонтпригодность и обеспеченность технического обслуживания и ремонта, а в некоторых случаях также долговечность (durability), безопасность и защищенность (safety and security). Готовность, безотказность, ремонтпригодность и обеспеченность технического обслуживания и ремонта, как уже было сказано, присутствовали и в МС 60050-191. Термин «долговечность» также был в МС 60050-191, однако там его связь с надежностью оставалась неясной. Хотя безопасность и защищенность и упомянуты в примечании, как самостоятельные термины, имеющие определения, они в МС 60050-192 отсутствуют.

Новый термин «восстанавливаемость» определяется, как способность объекта восстанавливаться после отказа без ремонта. Действительно, зачастую восстановление осуществляется, например, путем переключения на резерв или перезагрузки ПО. Эти действия нельзя относить к ремонту, поэтому способность к подобному восстановлению не охватывается понятием «ремонтпригодность», что потребовало введения нового термина. Частным случаем восстанавливаемости является самовосстанавливаемость, когда восстановление происходит без внешнего воздействия на объект. Эти термины, конечно, тесно связаны с понятием «восстановление», которое будет рассмотрено ниже.

Говоря о составляющих надежность свойств, напомним, что в соответствии с ГОСТ 27.002–89 надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. Термина «готовность» в явном виде в нашем стандарте нет, однако присутствуют показатели, количественно характеризующие это свойство: коэффициент готовности и коэффициент оперативной готовности. С другой стороны, в МС нет сохраняемости.

Из МС 60050-192 исключены бывшие в прежнем МС общие термины «эффективность» (effectiveness) и «производительность» (capability), как не относящиеся непосредственно к надежности.

В новом, как и в прежнем МС, есть раздел, посвященный состояниям объекта. В ГОСТ 27.002–89 определены две пары состояний: исправное – неисправное, работоспособное – неработоспособное (исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть и работоспособным, и неработоспособным; работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен). В МС нет эквивалентов исправному и неисправному состояниям, однако есть целый ряд других терминов, характеризующих различные состояния объекта. В частности, выделяются рабочее (operating) и нерабочее (non-operating) состояния. В первом из них объект выполняет какую-либо требуемую функцию, во втором – не выполняет никакой требуемой функции.

Для каждого состояния вводится время пребывания в этом состоянии. Далее определяются также времена, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом объекта. Разобраться во всем хитросплетении этих времен помогают приведенные в стандарте два рисунка. В числе временных понятий определяется срок службы (useful life), а также период ранних отказов (early life failure period, infant mortality period), период постоянной интенсивности отказов (constant failure intensity period) и период износовых отказов (wear-out failure period). Последние три характерны для объектов, имеющих U-образную кривую интенсивности отказов.

В разделе, посвященном отказам, исключен ряд терминов. Например, такие виды отказов, как критический (critical) и некритический (non-critical), внезапный (sudden) и постепенный (gradual), учитываемый (relevant) и неучитываемый (non-relevant), деградиционный (degradation) и др. В то же время остались такие виды отказов, как полный (complete) и частичный (partial), независимый (primary) и зависимый (secondary), систематический (systematic) и др., добавлен программный отказ (software failure).

Остались также термины «причина отказа» (failure cause), «механизм отказа» (failure mechanism), «отказы по общей причине» (common cause failures), «отказы общего вида» (common mode failures). Первые два из них достаточно понятны, приведем определения последних двух.

Отказы по общей причине – отказы различных объектов, возникающие по единой причине, которые без рассмотрения причин считались бы независимыми. Отказы общего вида – отказы различных объектов, характеризующиеся одним и тем же видом отказа. Лучшему пониманию этого термина способствует введение понятия «вид отказа» (failure mode), определяющегося как способ, которым отказ себя проявляет. Добавлены также термины «последствия отказа» (failure effect), рассматриваемые как внутри, так вне границ отказавшего объекта; «критичность» (criticality) – тяжесть последствий в соответствии с установленными критериями оценки.

Один из разделов МС посвящен понятию, которое напрямую не имеет аналога в сложившейся русскоязычной терминологии по надежности. По-английски оно выражается термином ‘fault’ и определяется следующим образом: неспособность объекта функционировать как требуется из-за его внутреннего состояния.

В русской версии МС 60050-191 fault перевели «существенная неисправность», в ГОСТ Р 27.002–2011 (изначально ГОСТ Р 53480–2009) – просто «неисправность». Однако подобный перевод вряд ли можно признать удачным, поскольку по многолетней традиции, закреплённой рядом стандартов, в частности ГОСТ 27.002–89, «неисправность» есть краткая форма термина «неисправное состояние». Между тем, согласно своему определению, fault не является состоянием. Кстати, подобная трактовка понятия «неисправность» в ГОСТ Р 27.002–2011 резко критиковалась специалистами [5, 6], поскольку согласно нашим стандартам неисправность вовсе не всегда приводит к неспособности объекта функционировать (поэтому при переводе МС 60050-191 и было добавлено «существенная»). Нельзя переводить fault и словом «отказ», хотя, как это будет видно из дальнейшего, эти понятия тесно связаны. В качестве рабочего русского эквивалента далее будет использоваться слово «нарушение» (автор с благодарностью рассмотрит и другие предложения на этот счет).

К определению нарушения даны несколько примечаний. Первое указывает, что нарушение может возникнуть в результате отказа или быть присуще самому объекту, или быть следствием недостатков более ранних стадий жизненного цикла, таких как задание технических требований к объекту, проектирование или конструирование, производство, техническое обслуживание и ремонт. Соответствующие уточняющие слова могут использоваться для указания причины нарушения: из-за ошибок при задании технических требований (specification), проектирования или конструирования (design), производства (manufacturing). Еще одно примечание говорит, что тип нарушения может ассоциироваться с типом отказа, например, износовое (wear-out) нарушение и износовый отказ. Указано также, что объект может иметь более одного нарушения.

В этом разделе исключены некоторые термины, характеризующие типы нарушений: критическое (critical) и некритическое (non-critical), существенное (major) и

несущественное (minor), полное (complete) и частичное (partial) и ряд других. Остались такие типы нарушений, как перемежающееся (intermittent), скрытое (latent), систематическое (systematic), программно чувствительное (programme-sensitive). Добавлены программное (software) и чувствительное к данным (data-sensitive) нарушения.

Еще одним термином МС, не имеющим непосредственного русского эквивалента в ГОСТ 27.002–89, является “maintenance”. Его можно перевести словосочетанием «техническое обслуживание и ремонт», включающим два самостоятельных в нашей терминологии понятия. В качестве обобщающего термина, эквивалентного английскому “maintenance”, можно предложить «техническое содержание», уже имеющееся в ГОСТ 31192–2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения».

Операции по техническому содержанию разделяются на предупредительные (preventive) и корректирующие (corrective). Первые проводятся для уменьшения деградации и снижения вероятности отказа, вторые выполняются после обнаружения нарушения для восстановления работоспособности. Выделяются также такие виды технического содержания, как плановое (scheduled) и неплановое (unscheduled), отложенное (deferred), по состоянию (condition-based), автоматическое (automatic), удаленное (remote) и др.

Добавлен мониторинг состояния (condition monitoring) – получение информации о физическом состоянии и эксплуатационных параметрах объекта. Он используется для определения потребности в предупредительных операциях технического содержания.

Ремонт (repair) относится к корректирующему техническому содержанию и определяется как непосредственное действие, предпринимаемое для восстановления. Он включает в себя локализацию нарушения (fault localization), диагностику нарушения (fault diagnosis), исправление нарушения (fault correction) и проверку функционирования (function checkout). Во время ремонта не включаются технические, административные и логистические задержки.

Восстановление (restoration) определяется в МС как событие возврата объекта в работоспособное состояние после отказа. Поэтому длительность периода неработоспособности после отказа называется «время до восстановления». В ГОСТ 27.002–89 под восстановлением понимается процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния, поэтому используется термин «время восстановления». Каждая из трактовки понятия «восстановление» – как событие и как процесс – имеет свои плюсы и минусы. В частности, подход МС дает удобную парность терминов: отказ – восстановление (оба события), время до отказа – время до восстановления.

В МС 60050-191 в качестве синонима термина “restoration” давалось слово “recovery”. Однако в МС 60050-192 оно введено как самостоятельный термин,

и ему придан несколько иной смысл: восстановление без корректирующего технического содержания. Его частным случаем является самовосстановление (self-recovery), происходящие без внешнего вмешательства.

Новым понятием является также «техническое содержание ПО» (software maintenance) – модификация ПО с целью устранения нарушения, адаптации к новым условиям или улучшения характеристик. Соответственно оно может быть корректирующим, адаптивным (adaptive) или совершенствующим (perfective).

Разделы, содержащие показатели надежности (measures), мало изменились. Отметим, что в отличие от ГОСТ 27.002–89 в МС для ряда показателей дается более глубокая дифференциация. Например, нет общего термина «коэффициент готовности», а определяются отдельно нестационарный (мгновенный) коэффициент готовности (instantaneous availability), усредненный коэффициент готовности (mean availability), стационарный коэффициент готовности (steady state availability). Аналогичным образом определяются и три коэффициента неготовности (unavailability).

Также различаются собственная (внутренняя) готовность (inherent availability) и эксплуатационная готовность (operational availability). Собственная готовность обеспечивается при разработке (конструировании, проектировании) для идеальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. При этом такие задержки, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом, как логистические и административные, исключаются. Эксплуатационная готовность определяется в реальных условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. При этом берется в расчет все время неработоспособности после отказа с учетом всех задержек за исключением только тех, которые обусловлены внешними причинами.

Раздел, посвященный испытаниям, значительно расширен, в него добавлен ряд новых терминов. В их числе: отбраковочные испытания (screening test), предназначенные для обнаружения и удаления из выборки дефектных объектов или объектов, подверженных риску ранних отказов; тестирование по принципу черного ящика (black-box testing), при котором используется только знание функциональных спецификаций испытуемого объекта; тестирование по принципу белого ящика (white-box testing), при котором используется знание внутренней структуры испытуемого объекта; цензурирование (censoring) – исключение при оценке данных, полученных после истечения установленной продолжительности или наступления данного числа событий, и др. Введены также специальные термины, относящиеся к испытаниям ПО, например, лабораторные испытания (альфа-тестирование) ПО (software alpha test), эксплуатационные испытания (бета-тестирование) ПО (software beta test) и др. Вместе с тем некоторые термины исключены. В частности, термин «контрольные испытания» (compliance test) остался, а «определяющие испытания» (determination test) – исключен.

Расширен раздел, содержащий понятия, относящиеся к проектированию или конструированию (design). В нем остались все термины из прежнего МС: резервирование (redundancy), постоянное резервирование (active redundancy), резервирование замещением (standby redundancy), отказобезопасность (fail-safe), устойчивость к нарушениям (fault tolerance), маскирование нарушений (fault masking). При этом некоторым из них даны новые более точные определения.

Добавлено несколько терминов, относящихся к резервированию, в частности, смешанное резервирование (diverse redundancy) и резервирование m из n (m out of n redundancy). Включен ряд терминов общего характера: системная реконфигурация (system reconfiguration), предупреждение нарушений (fault avoidance), самопроверка (self-checking), самотестирование (self-testing), а также ряд терминов, специфических для программных средств, в частности, N-версионное программирование (N-version programming), обратное восстановление (backward recovery), прямое восстановление (forward recovery). Последние два термина означают восстановление после ошибок соответственно путем возврата к предыдущему состоянию и путем перехода в новое состояние.

А вот раздел, посвященный анализу надежности, сокращен. Из него исключены термины, смысл которых ясен без определений, а также носящие частный характер. Остались такие термины, как прогнозирование (prediction), анализ видов и последствий отказов (failure modes and effects analysis); анализ видов, последствий и критичности отказов (failure modes, effects and criticality analysis); дерево нарушений (fault tree); анализ дерева нарушений (fault tree analysis); структурная схема надежности (reliability block diagram); диаграмма состояний и переходов (state-transition diagram). Отметим, что в первых двух из этих терминов в прежнем МС фигурировали не отказы, а нарушения (fault modes... analysis). Добавлены в раздел: распределение требований по надежности (allocation <of dependability requirements>), анализ дерева событий (event tree analysis), оценка стоимости жизненного цикла (life cycle costing).

Подобной же переработке подвергся и раздел с понятиями, относящимися к повышению надежности. Большинство терминов, бывших в этом разделе прежнего МС, исключены. Важные вновь включенные термины: система отчетности об отказах, анализа и корректирующих действий (failure reporting, analysis and corrective action system) – процесс замкнутого цикла, используемый для повышения надежности текущих и будущих разработок на основе данных тестирования, модификации и использования опыта; анализ первопричин (root cause analysis) – систематический процесс выявления причин нарушений, отказов и других нежелательных событий, направленный на исключение возможности их возникновения при проектировании / конструировании или путем изменения процесса или процедуры.

Подводя итоги, следует отметить, что хотя отечественная и международная терминология по надежности имеют много общего, есть между ними и существенные различия. Они обусловлены тем, что стандартизация терминология по надежности в нашей стране, начавшаяся полвека назад, многие годы шла в отрыве от аналогичной деятельности в международном масштабе. К сожалению, и до сих пор есть немало специалистов, не понимающих всей важности гармонизации отечественных стандартов с международными. В силу указанных различий в настоящее время создание нового межгосударственного стандарта (ГОСТ), гармонизированного с МС МЭК 60050-192, не представляется возможным. Однако при этом надо стремиться к максимально возможному сближению отечественной и международной терминологии.

Для достижения этого следует не только приближать наши стандарты к международным, но и вести работу по включению принятых у нас понятий и терминов в МС. Это требует активного участия наших специалистов в работе по созданию МС, причем не только заочного (по переписке), но и с поездками на заседания. Однако в очередной раз приходится констатировать, что вклад российских специалистов в разработку МС 60050-192 был весьма невелик. На ранних стадиях работы в ней участвовали наши эксперты (в частности, авторы [1]), но в последние лет пять, главным образом из-за отсутствия финансирования, такого участия не было.

Библиографический список

1. Богданова Г.А., Нетес В.А. МЭК/ТК 56: стандартизация для надежности // Методы менеджмента качества. 2009. № 5. С. 44–47.
2. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Актуальные вопросы стандартизации терминологии в области надежности // Надежность. 2014. № 2. С. 116–119.
3. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 3–14.
4. ITU-T Recommendation E.800 (09/08). Definitions of terms related to quality of service.
5. Нетес В.А., Резиновский А.Я., Тарасьев Ю.И., Ушаков И.А., Фишбейн Ф.И., Шпер В.Л. Дegradaция вместо гармонизации // Стандарты и качество. 2011. № 5.
6. Ушаков И.А. Незванный ГОСТ // Методы менеджмента качества. 2011. № 5.

Сведения об авторе

Виктор А. Нетес, доктор технических наук, профессор, Московский технический университет связи и информатизации, заместитель председателя Технического комитета по стандартизации № 119 «Надежность в технике», Москва, Россия

111024, Россия, Москва, ул.Авиамоторная, 8а, e-mail: vicnet@yandex.ru

Поступила 15.08.2016

Имитационная модель электромагнитной совместимости смежных сооружений инфраструктуры на участках тяжеловесного движения поездов

Валерий В. Польшов, кафедра «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: PolyanovVV@mail.ru

Валерий Е. Митрохин, кафедра «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: mitrokhin@list.ru



Валерий В.
Польшов



Валерий Е.
Митрохин

Резюме. В условиях постоянного повышения объемов движения и возрастания тяговых нагрузок увеличиваются нагрузки на инфраструктуру электроснабжения, что приводит к росту уровней электромагнитных излучений. За счёт этого возрастает вероятность аварийного режима функционирования контактной сети, вследствие которого токи достигают очень высоких величин и могут привести к серьезным авариям в смежных цепях хозяйств автоматики и телемеханики и связи. Такие аварии нередко становятся причиной различных отказов, влияющих на качество и безопасность перевозочного процесса, приводят к порче аппаратуры и могут служить причиной возгораний. Наиболее весомый вклад в общее количество аварий на кабельных линиях вносят электромагнитные влияния при прохождении тяжеловесных составов. Причем, прохождение такого состава вдоль линий связи с неисправным заземлением, привело к прожогу кабеля. На железнодорожной инфраструктуре ужесточаются требования по обеспечению электромагнитной совместимости объектов и сооружений, в том числе по соблюдению требований надежности и информационной безопасности систем связи и систем централизации и блокировки (СЦБ). Существующие методики определения наведенных токов и напряжений не учитывают нагрузок, возникающих при современных объемах движения, и не позволяют установить зависимость от параметров заземления объектов инфраструктуры. Не учитываются также параметры продольных сооружений, расположенных параллельно пути на всей протяженности железных дорог. Кроме того, параметры заземления изменяются в процессе движения тяжеловесных поездов по разным регионам. Поэтому актуальной является задача моделирования электромагнитных процессов в многопроводных системах с учетом собственных и взаимных параметров линий, а также параметров земли. Но математические модели электромагнитной совместимости на железнодорожном транспорте в силу своей сложности не всегда позволяют получить численные значения наведенных токов и напряжений в цепях связи и СЦБ. В статье предложен прикладной метод имитационного моделирования, позволяющий определить уровни наведенных токов и напряжений в продольных линиях связи и СЦБ на участках тяжеловесного движения поездов. Представлена методика имитационного моделирования, результаты моделирования для участка тяжеловесного движения и анализ влияния параметров заземления на величину наведенных напряжений. Результаты моделирования сопоставлены с данными эксперимента и признаны достоверными. Расчеты по предложенной методике позволили выявить ключевые зависимости наведенных токов и напряжений от параметров земли. Установлены нелинейные зависимости величины наведенного напряжения от сопротивления заземления, что является основой для дальнейших исследований и сопоставления полученных данных со статистикой, накопленной в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, тяжеловесное движение поездов, имитационное моделирование.

Формат цитирования: Польшов В.В., Митрохин В.Е. Имитационная модель электромагнитной совместимости смежных сооружений инфраструктуры на участках тяжеловесного движения поездов // Надежность. 2016. №3. С. 59-62. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-3-59-62

Мероприятия по повышению надежности на участках тяжеловесного движения

В связи с вводом в регулярное обращение поездов массой 6-12 тыс. тонн, на участках железных дорог в несколько раз возрастают тяговые нагрузки в системе

электроснабжения. Такие нагрузки нередко приводят к повреждению аппаратуры и линий электроснабжения и продольных сооружений. Это является причиной для совершенствования конфигурации тяговой сети, включающей в себя:

— создание более мощного силового оборудования, увеличение сечения фидеров контактной сети (до 5А-185);

– разработку систем тягового электроснабжения повышенной нагрузочной способности;

– повышение расчетной мощности трехфазного короткого замыкания на вводах тяговой подстанции до 1500 МВ*А;

– разработку и применение эффективных устройств автоматики, управления и защиты оборудования тяговых подстанций и контактной сети от токов короткого замыкания и недопустимой нагрузки (ЦЗАФ-3,3кВ, ЦЗАФ-27,5кВ).

– применение конструкций контактной сети для участков тяжеловесного движения, включающей замену контактных проводов (ПБСМ-95 на М-120), подвеску усиливающих проводов (А-185, 2А-185, М-120) и экранирующих проводов.

С учетом перечисленных требований конфигурация контактной сети над каждым главным путём перегонов включает в себя [1,2]:

– на участках постоянного тока – два контактных провода, сечением не менее 120 мм² каждый, согласно ГОСТ 2584-86 [3], один медный несущий трос сечением не менее 120 мм² и два усиливающих алюминиевых (сталеалюминевых) провода сечением не менее 185 мм² каждый согласно ГОСТ 839-80 [4];

– на участках переменного тока – два контактных провода сечением не менее 100 мм², медный несущий трос сечением не менее 120 мм², один алюминиевый (сталеалюминевый) экранирующий провод сечением не менее 185 мм².

Схемы расположения линейных сооружений инфраструктуры участков обращения тяжеловесных поездов изображены на рисунке 1.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: К – контактный провод, Н – несущий трос, У – усиливающий провод, Р – рельсы, ПРС – направляющая линия поездной радиосвязи 2,13 МГц, ВЛ-10 – воздушная линия 10кВ, ВСЛ – высоковольтно-сигнальные линии СЦБ, ДПР – линия «два провода – рельс», Э – экранирующий провод, КЛ – кабельная линия.

Математической моделью, описывающей процесс распространения токов и напряжений, вызванных магнитным влиянием контактной сети, в каждой линии

является система дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от числа линий, входящих в единую электромагнитную систему:

$$\begin{cases} -\frac{dU_K}{dx} = (R_K + j\omega L_K) \cdot I_K + \sum_{i=1}^n I_i \cdot j\omega M_{iK} - j\omega M_{K-кк} \cdot I_{кк} \cdot e^{-\gamma x} \\ -\frac{dI_K}{dx} = (G_K + j\omega C_K) \cdot U_K + \sum_{i=1}^n (G_{iK} + j\omega C_{iK})(U_i - U_K), \end{cases}$$

где R_k, L_k, G_k, C_k – собственные параметры k -го провода, M_{ik}, G_{ik}, C_{ik} – взаимные параметры между i -м и k -м проводами системы, рассчитанные в спектре частот;

$M_{K-кк}$ – взаимная индуктивность между k -м проводом и контактной сетью,

U_k, I_k, U_i, I_i – токи и напряжения в i -м и k -м проводах системы,

$I_{кк}$ – ток контактной сети.

При неизменных параметрах и геометрических соотношениях в линейных сооружениях инфраструктуры величина наведенных токов и напряжений зависит от граничных условий, определяемых нагрузкой в начале и конце линии. Поэтому важной задачей является составление имитационной модели для определения граничных условий с учётом параметров заземления кабельных линий и проводимости грунта на участках тяжеловесного движения поездов.

Составление имитационной модели

Имитационное моделирование процесса распространения токов и напряжений в линейных сооружениях проведено в программной среде Simulink (Matlab) по схеме на рисунке 2.

Моделирование проведено с учетом линейных сооружений инфраструктуры – контактная сеть, рельсы, жила и оболочка магистральной кабельной линии.

В соответствии с требованиями к тяжеловесному движению [1, 2], инфраструктура железнодорожного транспорта должна обеспечивать пропуск пакета из 3 тяжеловесных поездов 6300-9000-6300 т с интервалом 10 минут при условии движения поездов графического веса по соседнему пути. В соответствии с техническими ха-

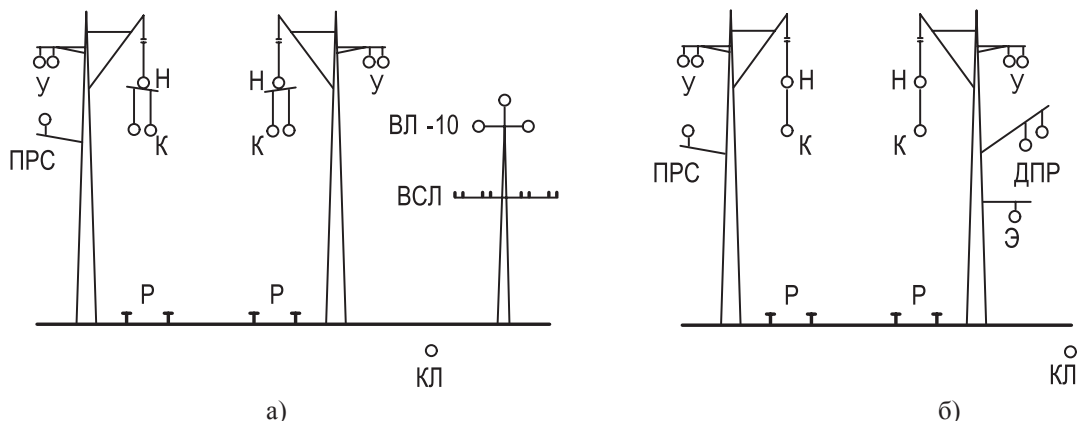


Рис. 1. Схемы линейных сооружений инфраструктуры участков тяжеловесного движения, электрифицированных а) – постоянным током, б) – переменным током.

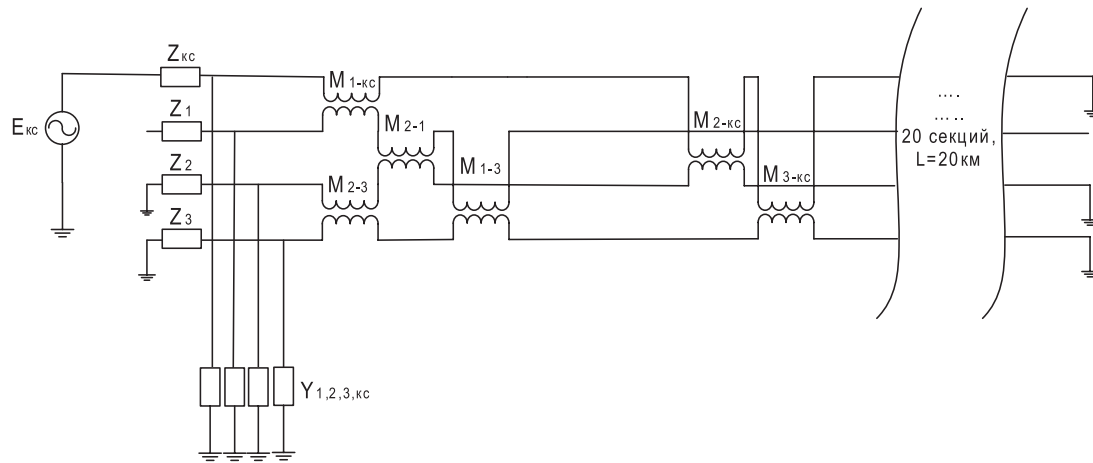


Рис. 2. Схема имитационного моделирования

рактическими локомотивов ВЛ-80 (С, К) [5] при работе в режиме многих единиц максимальный ток составляет 110 А для поезда графического веса, 155 А – для поезда 6300 т, 192 А – для поезда 9000 т. В качестве максимального эквивалентного тока контактной сети принят ток пуска всех поездов на участке 932 А. В результате получены значения для токов и напряжений на частоте 50 Гц.

На рисунке 3 приведены осциллограммы токов и напряжений на концах жилы и оболочки кабеля при условии тяжеловесного движения поездов.

Анализ влияния параметров заземления на величину наведенных напряжений

Особенностью участков тяжеловесного движения на полигоне Западно-Сибирской железной дороги является то, что грунт на этих участках имеет высокое удельное сопротивление (300-1500 Ом·м). Кроме того, тяжеловесные перевозки носят круглогодичный характер, а в течение года параметры грунта меняются в широких пределах. Проведем моделирование для участка тяжеловесного движения

длиной 20 км, с суммарным током 932 А (50 Гц) с учетом особенностей заземления линейных сооружений.

Примем к расчету заземление металлопокрывов кабеля в виде четырех вертикальных штырей, углубленных в грунт на 5 м. Для расчета воспользуемся формулами для определения сопротивления заземления. Сопротивление растеканию тока одного вертикального заземлителя (стержня) [6, 7]:

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{экр}}}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{2L}{d} \right) + 0,5 \ln \left(\frac{4T+L}{4T-L} \right) \right),$$

где $\rho_{\text{экр}}$ – эквивалентное удельное сопротивление грунта, Ом·м;

L – длина стержня, м;

d – его диаметр, мм;

T – расстояние от поверхности земли до середины стержня, м.

Заглубление горизонтального заземлителя можно найти по формуле [6, 7]:

$$T = \left(\frac{L}{2} \right) + t,$$

где t – заглубление вертикального заземлителя.

Полное сопротивление растеканию тока вертикальных заземлителей определяется по формуле [6, 7]:

$$R = \frac{R_0}{4 \cdot \eta},$$

где η – коэффициент спроса вертикальных заземлителей.

Получим значение наведенного напряжения в цепи «жила-оболочка» ($U_{\text{ж-об}}$) в начале линии при изменении удельного сопротивления грунта (с учетом изменения величины взаимной индукции между цепями).

Помимо сопротивления грунта важно учитывать особенности сооружения заземления оболочки на вводе в здания. Нормативными документами [8] регламентируется величина сопротивления заземления оболочки кабельной линии – 4 Ом и сопротивление металлосвязи цепи «металлопокрывы-ГЗШ-земля» – 0,1 Ом. Измерения параметров производятся дважды в год. Однако в течение года величина сопротивления и металлосвязи

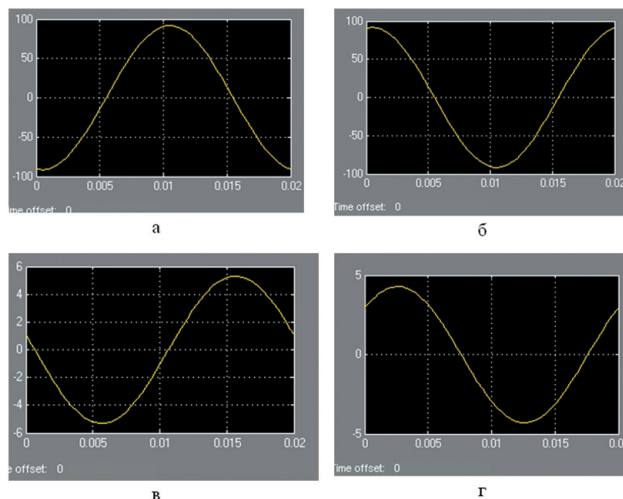


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при движении пакета тяжеловесных поездов: а) напряжение жилы в начале линии $U_{\text{ж-Н}}$, В; б) напряжение жилы в конце линии $U_{\text{ж-К}}$, В; в) ток оболочки в начале линии $I_{\text{ж-Н}}$, А; г) ток оболочки в конце линии $I_{\text{ж-К}}$, А.

Таблица 1. Зависимость напряжения в жиле кабеля от удельного сопротивления грунта

ρ , Ом*м	0	50	80	100	150	200	250	300	350	400	500	1000	1500	2000
$U_{ж-об}$, В	160	210	221	229	259	289	316	343	370	400	438	600	710	783

$R_{мет}$, Ом	0,1	1	2	3	4	5	10	50	100	1 к	10 к	100 к	1 М
$U_{ж-об}$, В	245	260	277	293	310	325	396	674	776	900	915	919	919



Рис. 4. График напряжения в жиле кабеля от удельного сопротивления грунта

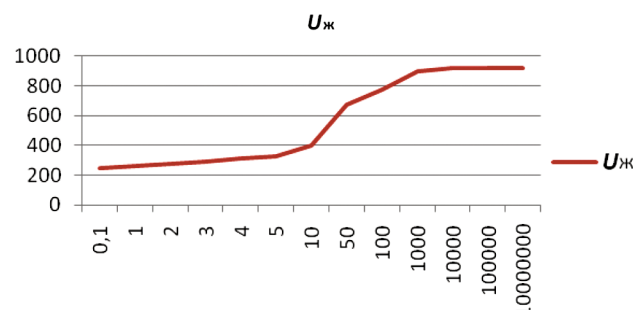


Рис. 5. Зависимость напряжения «жила-оболочка» от сопротивления заземления металлопокрывов кабеля

может изменяться в очень широких пределах. Это связано с климатическими факторами и электрохимической коррозией, в условиях которой функционируют кабельные линии связи (КЛС). Часто причиной заброса потенциалов на КЛС является разрушение токоведущих частей или пайки металлосвязи.

Проведем моделирование с учетом особенностей монтажа заземления кабеля. Измерялось значение $U_{ж-об}$ в начале линии при изменении сопротивления заземления и металлосвязи в начале линии (в конце линии величина равна норме – 4,1 Ом).

Из рисунка видно, что при увеличении сопротивления земли свыше 10 Ом начинается выраженный рост напряжения в жиле, который заканчивается на отметке 0,9 кВ. Очень высокие значения сопротивления заземления (выше 1 кОм) соответствуют случаям повреждения или обрыва заземляющих проводников или монтажа.

Заключение

На основе составленной имитационной модели электромагнитной совместимости проведены вычисления уровней наведенных токов и напряжений в условиях тяжеловесного движения. Выявлены ключевые зави-

сисмотности величины наведенных токов и напряжений от параметров земли в диапазоне удельного сопротивления 0 – 2000 Ом*м при влияющем токе 932 А (50 Гц). Проведено моделирование в зависимости от сопротивления заземлителя и металлопокрывов, установлено, что превышение нормы 4 Ом приводит к нелинейному росту наведенного напряжения, а превышение значения 10 Ом даёт резкий рост напряжения. Это позволяет сформулировать чёткие требования к качеству монтажа и параметрам заземления сооружений связи и СЦБ и повысить надежность их функционирования.

Библиографический список

1. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования. Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» №1704р от 28.08.12г. Москва, 2012, 64с.
2. Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования. Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» №2412р от 25.11.10г. Москва, 2010, 37 с.
3. ГОСТ 2584-86 «Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия». Москва, 1997, 9с.
4. ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия». Москва, 1981г., 26с.
5. Василько Н.М., Козельский Н.П. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1982 г., 454 с.
6. Базелян Э.М. Вопросы практической молниезащиты. М.: «ИМАГ», 2015, 208с.
7. Рудольф Карякин. Нормы устройства сетей заземления. М.: Энергосервис, 2006, 360с.
8. Правила устройства электроустановок ПУЭ. Издание 7. Утверждены приказом Минэнерго России №204 от 08.07.12г. Москва, 2012.

Сведения об авторах

Валерий В. Полянов, аспирант, кафедра «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: PolyanovVV@mail.ru

Валерий Е. Митрохин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, e-mail: mitrokhin@list.ru

Поступила 21.03.2016



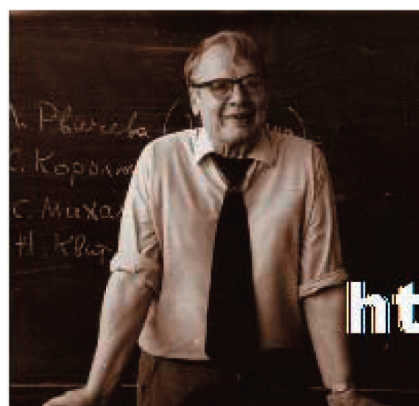
**Дзиркал Эрнест Вальтерович
(1935 – 2016)**

На 81 году ушел из жизни один из старейшин в области теории и практики надежности в России, член редколлегии журнала «Надежность», кандидат технических наук Э.В. Дзиркал. Это был всесторонне образованный ученый и инженер. Эрнест Вальтерович родился в 1935г. в Москве, закончил физический факультет МГУ им. Ломоносова и с 1959г. до 2000г. возглавлял лабораторию промышленной надежности одного из ведущих институтов радиопромышленности СССР – московского научно – исследовательского института приборной автоматики (МНИИПА). Затем работал в Ассоциации TEST-SDM в должности заместителя директора и руководил работами по контролю качества и испытаниями сложных технических систем на всех стадиях их жизненного цикла – систем с механическими, электронными и программными компонентами.

В течение длительного времени (более 30 лет) Дзиркал принимал активное участие в разработке национальных стандартов в области качества и надежности технических систем. Награжден двумя государственными наградами за достижения в области качества и надежности продукции. Опубликовал свыше 60 научных статей и несколько книг. В течение ряда лет Э.В. Дзиркал руководил Советом в кабинете качества и надежности при московском Политехническом музее, в центральном лицее музея прочитал несколько курсов лекций.

Эрнест Вальтерович был принципиальным, но вместе с тем доброжелательным и сердечным человеком. Его жизнь была отдана любимой науке – надежности

Редколлегия журнала «Надежность»



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

Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» (“Reliability: Theory & Applications”).

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.



**Вступайте в Форум
Гнеденко!**

Добро

пожаловать!

В наших рядах уже более

500 специалистов

из **44** стран мира.

Для вступления в
Форум присылайте
фото и краткое резюме
по адресу:

к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Письмо от организации, где работает автор(ы), либо лично от автора(ов) с предложением о публикации статьи направляется в редакцию журнала по фактическому адресу: 107078, г.Москва, Орликов переулок, д.5, офис 755 ООО «ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ» или по адресу e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru (в отсканированном виде).

К письму прилагается в электронном виде (на CD или по приведенному выше E-mail) текст статьи с аннотацией и ключевыми словами, информацией об авторах, с пристатейным библиографическим списком, предоставляется с одним комплектом рисунков

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

Информация о каждом авторе должна содержать следующие стандартные сведения:

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

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется. Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter. Текст статьи набирается через полтора интервала на странице формата А4; слева должно быть поле 2 см; страницы нумеруются, «красная строка» обязательна.

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

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

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

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

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

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

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

Вниманию авторов, публикующихся в журналах IDT Publishers.

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

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

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

Подписаться на журнал можно:

- Через агентство «Роспечать» — индекс 81733;

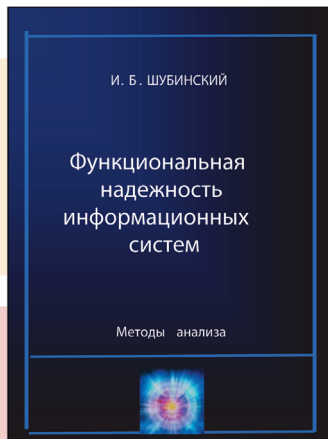
- По каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» — индекс 11804;

- Через редакцию на любой срок
тел.: 8-916-105-81-31
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

НАДЁЖНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Приобрести издание
можно через редакцию
ООО «Журнал «Надежность»

8 (495) 967-77-05, доб.186
8-916-105-81-31
(Патрикеева Евгения)

E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

ООО «Журнал «Надежность»,
109029, г. Москва,
ул.Нижегородская, д.27, стр.1, офис 209
Тел./факс: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

Шубинский Игорь Борисович

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
Методы анализа

Редактор: Патрикеева Евгения Владимировна
Компьютерная верстка: Куртиш Борис Сергеевич
Корректор: Комарова Екатерина Евгеньевна

Подписано в печать 12.07.2012. Формат издания 70х100/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24,05.
Тираж 700 экз. Заказ № 1453.

И.Б.Шубинский «Функциональная надежность информационных систем» 2012г.

В книге впервые представлена теория функциональной надежности информационных систем как составная часть общей теории надежности. Она включает понятия и определения; основные угрозы нарушения функциональной надежности информационных систем; систему показателей; методы оценки функциональной надежности цифровых устройств; методы и модели оценки функциональной надежности программного обеспечения. В отдельной главе рассмотрена функциональная надежность критически важных информационных систем, в том числе понятие критически важной системы, особенности оценки сбойных ошибок, оценки функциональной надежности операторов, оценки опасных отказов и рисков, требования к функциональной надежности и к архитектуре программного обеспечения критически важных информационных систем.

В конце каждой главы содержатся контрольные вопросы по наиболее сложному и значимому материалу главы.

Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по разработке, производству, эксплуатации и модификации информационных технологий и информационных систем. Она предназначена научным работникам в области надежности программно – аппаратных средств информационных систем, преподавательскому составу, аспирантам и студентам, специализирующимся в области информационных технологий, а также в области автоматизированных систем управления.

Приобрести издание можно через редакцию журнала «Надежность»
по тел. 8 (495) 967-77-05, доб.186; 8-916-105-81-31 (Патрикеева Евгения),
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

И.Б.Шубинский «Структурная надежность информационных систем» 2012г.

В книге приведены основные понятия и показатели структурной надежности информационных систем, показана общность и специфические отличия показателей надежности, применяемых в отечественных и международных стандартах. Отражены недавние изменения в подходах к моделированию надежности. Подробно описаны Марковские модели надежности и графовые полумарковские методы расчета надежности, которые проиллюстрированы многочисленными примерами. Значительное внимание уделено инженерным методам расчета и приближенного прогнозирования структурной надежности информационных систем, оценкам погрешностей расчетов, а также статистической оценке показателей надежности. В конце каждой главы содержатся контрольные вопросы по наиболее сложному и значимому материалу главы.

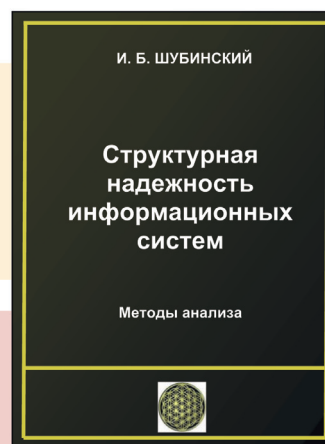
Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по разработке, производству, эксплуатации и модификации информационных систем. Она предназначена научным работникам в области структурной надежности различных дискретных систем, преподавательскому составу, аспирантам и студентам, специализирующимся в области информационных систем, а также в области автоматизированных систем управления.

Приобрести издание можно через редакцию журнала «Надежность»
по тел. 8 (495) 967-77-05, доб.186; 8-916-105-81-31 (Патрикеева Евгения),
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

НАДЁЖНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Приобрести издание
можно через редакцию
ООО «Журнал «Надежность»

8 (495) 967-77-05, доб.186
8-916-105-81-31
(Патрикеева Евгения)

E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

Шубинский Игорь Борисович

СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
Методы анализа

Редактор: Патрикеева Евгения Владимировна
Компьютерная верстка: Куртиш Борис Сергеевич
Корректор: Комарова Екатерина Евгеньевна

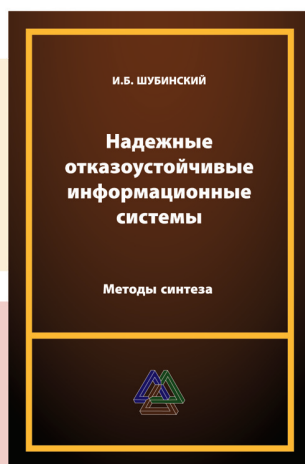
Подписано в печать 12.07.2012. Формат издания 70х100/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 17,55.
Тираж 700 экз. Заказ № 1452.

ООО «Журнал «Надежность»,
109029, г. Москва,
ул.Нижегородская, д.27, стр.1, офис 209
Тел./факс: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

НАДЁЖНОСТЬ

ISSN 1758-2442
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Приобрести издание
можно через редакцию
ООО «Журнал «Надежность»

8 (495) 967-77-05, доб.186
8-916-105-81-31
(Патрикеева Евгения)

E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

ООО «Журнал «Надежность»,
109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д.27, стр.1, офис 209
Тел./факс: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

Шубинский Игорь Борисович

**НАДЕЖНЫЕ ОТКАЗООУСТОЙЧИВЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**
Методы синтеза

Подписано в печать 12.02.2016. Формат издания 70х100/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 17,55.
Тираж 700 экз. Заказ № 1452.

И.Б.Шубинский «Надежные отказоустойчивые информационные системы» 2016 г.

В книге приведены концептуальные положения обеспечения структурной и функциональной надежности информационных систем на всех этапах их жизненного цикла. Различные виды структурного резервирования рассмотрены с учетом ограничений в обнаружении отказов. При этих условиях оценена их эффективность и установлены предельные возможности структурного резервирования в предположении бесконечного количества резервных устройств. Рассмотрены способы обеспечения функциональной надежности программных средств, в том числе приведены рекомендации по разработке спецификации требований к программам, описана технология разработки архитектуры надежной программы, приведены хорошо апробированные правила и рекомендации по проектированию надежного программного обеспечения и его реализации, а также интеграции с аппаратными средствами системы.

Представлены теоретические и практические положения адаптивной отказоустойчивости (активной защиты) информационных систем, в том числе методы и дисциплины активной защиты, способы ее практической реализации. Предложен метод синтеза активной защиты, а также результаты исследования надежности информационных систем с различными дисциплинами активной защиты. Оценена ее эффективность по отношению к традиционным методам структурного резервирования.

Рассмотрены принципы обеспечения функциональной безопасности информационных систем, обоснована возможность перезапуска независимых каналов в двухканальных безопасных системах, разработаны правила определения допустимого времени гарантированного обнаружения одиночных и двойных отказов, одиночных и двойных отказов, разработан метод синтеза комбинированной двухуровневой информационной системы, к которой предъявлены повышенные требования по функциональной безопасности.

Для подтверждения соответствия надежности и функциональной безопасности разработан метод ускоренных натурных испытаний информационной системы и приведен пример его практической реализации, развиты методики сертификационных испытаний по требованиям безопасности информации и декларирования соответствия программных средств.

В конце каждой главы содержатся контрольные вопросы по наиболее сложному и значимому материалу главы. Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по разработке, производству, эксплуатации и модификации информационных систем. Она предназначена научным работникам в области структурной надежности различных дискретных систем, преподавательскому составу, аспирантам и студентам, специализирующимся в области информационных систем, а также в области автоматизированных систем управления.

Приобрести издание можно через редакцию журнала «Надежность»
по тел.: 8 (495) 967-77-05, доб.186; 8-916-105-81-31 (Патрикеева Евгения),
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-
КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(ОАО «НИИАС»)



ОАО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог



Цели:

- ☐ эффективность,
- ☐ безопасность
- ☐ надежность перевозок



Основные направления деятельности

- Интеллектуальные системы управления
- Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- Системы автоматики и телемеханики
- Центры автоматизированного управления
- Информационные системы
- Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- Системы транспортной безопасности
- Системы управления инфраструктурой
- Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- Испытания, сертификация и экспертиза
- Информационная безопасность
- Нормативно-правовое обеспечение



www.vniias.ru