

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, главный научный сотрудник Государственного научно-технического центра 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 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 – профессор, доктор технических наук, научный руководитель – заведующий НИЛ «Безопасность и ЭМС технических средств (БЭМС ТС), УО «Белорусский государственный университет транспорта» (Гомель, Белоруссия)

Гапанович Валентин Александрович – кандидат технических наук, старший советник президента ОАО «РЖД» (Москва, Россия)

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

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

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

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

Соколов Борис Владимирович – Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), (Санкт-Петербург, Россия)

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

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

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»
Генеральный директор

Дубровская А.З.
Адрес: 109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, оф. 209
ООО «Журнал «Надежность»
www.dependability.ru
Отпечатано в ОАО «Областная типография
«Печатный двор». 432049, г. Ульяновск,
ул. Пушкирева, 27.

Подписано в печать 30.11.2017
Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60х90/8, Бумага глянец

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

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ 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

Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов	3
Сороколетов Е.П. Пример расчета дерева отказов с логическими петлями	10
Кривопалов Д.М., Юркевич Е.В. Механизм построения аналитического решения при вычислении вероятности безотказной работы системы с ненагруженным резервированием при неоднотипных элементах (ч.1)	16
Колобов А.Ю., Дикун Е.В. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов	23
Нетес В.А. Соглашение об уровне обслуживания и надежность	27
Денисов И.В., Смирнов А.А. Исследование эксплуатационной надежности систем автомобиля Lada Kalina, влияющих на безопасность дорожного движения	31

Функциональная безопасность. Теория и практика

Климов С.М., Купин С.В., Купин Д.С. Модели вредоносных программ и отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей	36
--	----

Сообщения

Горбань М.В., Павленко Е.А. Методы оценки и способы повышения эксплуатационной надежности датчиков массового расхода воздуха двигателем	44
Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Катасонов А.О., Маликов В.Н., Сагалаков А.М. Исследование проводящих материалов с помощью многочастотной измерительной системы на основе сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей	49
Гнеденко –Форум	53

Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов

Леонид А. Баранов, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), Москва, Россия

Юрий А. Ермолин, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), Москва, Россия



Леонид А. Баранов



Юрий А. Ермолин

Резюме. Среди многообразия и степени значимости факторов, влияющих на формирование потока отказов объекта, всегда существует один – его «старение», который приводит к изменению количества отказов в единицу времени, что делает объект нестационарным (в смысле надежности). В этих условиях разработка дисциплины обслуживания приобретает наиболее актуальное значение, особенно когда речь идет об объектах с продолжительным жизненным циклом. **Методики** нахождения показателей надежности стационарных объектов известны и широко используются на практике. Однако в отношении нестационарных объектов общепринятых подходов к определению их показателей надежности, удобных для применения в инженерных расчетах, практически не существует. Между тем, анализ публикаций по этой теме, проведенный в статье, показывает актуальность и потенциальную востребованность таких методик в различных областях техники. **Цель** настоящей статьи – разработка аналитической методики оценки показателей надежности нестационарных объектов, удобной для решения практических задач. Основная идея предлагаемого в статье подхода состоит в замене реального нестационарного объекта его виртуальным фиктивным аналогом, поток отказов которого стационарен, т.е. осуществляется формальная стационаризация (в смысле надежности) объекта, что легитимизирует применение хорошо разработанных методик решения стационарных задач, распространяя их на случаи нестационарных объектов. Подход является приближенным. При этом основной проблемой становится нахождение значения постоянной интенсивности потока отказов фиктивного объекта, выраженной через параметры характеристики «старения» реального (нестационарного) объекта от времени, полагаемой в статье известной. В порядке повышения общности рассмотрения определение эквивалентной интенсивности отказов (или элементарно связанного с ней среднего времени наработки до отказа) осуществлено в статье для трех случаев: 1) Реальный объект является «стареющим», т.е. интенсивность его отказов – возрастающая функция времени. Предложено два подхода к определению эквивалентной интенсивности отказов: а) из условия равенства средних времен наработки до отказа обоих объектов (реального и фиктивного); б) из условия равенства функций надежности объектов к наперед заданному времени прогноза. Для некоторых законов «старения» задача решена аналитически в замкнутом виде. Используя численный пример, произведена оценка сравнительной точности подходов. 2) Объект характеризуется периодической кусочно-постоянной интенсивностью отказов, типичной для систем и устройств, работающих в условиях «открытой» окружающей среды (посезонно изменяющаяся интенсивность отказов). Получены как точные, так и приближенные (в линейном приближении) выражения для функции надежности и среднего времени наработки до отказа для такого объекта. 3) Зависимость интенсивности отказов объекта – кусочно-постоянная непериодическая функция времени. Такая модель является достаточно универсальной, поскольку к ней, после временной дискретизации и кусочно-постоянной аппроксимации, выполненной с заданной точностью, могут быть сведены многие аналитические зависимости интенсивности отказов от времени. Методологически задача решается аналогично п. 2), рассматривая непериодический процесс как периодический с бесконечно большим периодом. При введенном в статье условии практической целесообразности эксплуатации объекта (например, по экономическим соображениям) выведены выражения для функции надежности и среднего времени наработки до отказа. Полученные в статье результаты могут быть полезны при решении надежности задач для нестационарных технических объектов.

Ключевые слова: надежность; поток отказов; нестационарность; периодичность состояний объекта.

Формат цитирования: Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 3-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9

Одним из существенных критериев качества функционирования систем (объектов) являются показатели надежности – вероятность безотказной работы за заданное время $p(t)$ и среднее время наработки на отказ $\bar{t}$ [1]. Исходной информацией для определения этих показателей является интенсивность отказов $\lambda(t)$. Так, при известной $\lambda(t)$

$$p(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (1)$$

и

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} p(t) dt. \quad (2)$$

Большинство существующих инженерных методик расчета показателей надежности объекта базируется на гипотезе о его стационарности [1-4], т.е. исходит из предположения, что интенсивность потока отказов $\lambda(t)$ не изменяется с течением времени ($\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$). В этом случае формулы (1) и (2) трансформируются к виду:

$$p(t) = \exp(-\lambda_0 t); \quad (3)$$

$$\bar{t} = 1 / \lambda_0. \quad (4)$$

Среди многообразия и степени значимости факторов, влияющих на формирование потока отказов объекта, непременно присутствует один – его «старение», который приводит к возрастанию количества отказов в единицу времени. При продолжительной эксплуатации объекта это обстоятельство нельзя игнорировать: λ перестает быть константой и становится возрастающей функцией времени $\lambda(t)$, а объект, по существу, переходит в класс нестационарных («стареющих»). В этих условиях разработка дисциплины обслуживания приобретает наиболее актуальное значение, особенно когда речь идет об объектах и системах с продолжительным жизненным циклом. Свидетельством этого служат появляющиеся в последние годы публикации по оценкам надежности таких, например, социально-значимых объектов как водо-хозяйственные комплексы крупных городов [5], атомные электростанции [6], строительные сооружения из композитных материалов [7] и другие.

Ряд систем (объектов) работает в периодически изменяющихся условиях. В частности, для систем каналов сточных вод характерна зависимость интенсивности отказов от сезона эксплуатации, для систем электро-снабжения нагрузка является функцией различных временных интервалов суток. Следовательно, и в этом случае интенсивность отказов изменяется в течение суток. В периодически изменяющихся условиях работает подвижной состав различных видов транспорта, подземные магистральные трубопроводы и т.д.

В принципе, решение любой надежности задачи для нестационарного объекта алгоритмически не отличается от аналогичной задачи, когда объект стационарен. Трудности, однако, заключаются в том, что в процессе

вычислений приходится сталкиваться с необходимостью выполнения некоторых математических операций (например, интегрирования), которые в элементарных функциях неосуществимы. В подобных случаях в прикладной теории надежности для достижения искомого результата вынужденно вводятся некоторые упрощающие допущения, позволяющие получить решение в приближенном аналитическом виде, удобном для дальнейшего анализа. Условно такие допущения объединяемы в несколько видов. Судя по последним публикациям [8-11], можно считать сформировавшимися в отдельный вид допущения, суть которых сводится к формальной замене потока отказов реального нестационарного объекта другим – фиктивным, в некотором смысле эквивалентным исходному, и удобным для решения конкретной поставленной задачи.

В настоящей статье приводятся методы расчета показателей надежности для объектов с нестационарным потоком отказов. Рассмотрены «стареющие» объекты, интенсивность λ потока отказов которых возрастает с течением времени, объекты с периодической кусочно-постоянной интенсивностью отказов, объекты, интенсивность отказов которых может быть представлена непериодической кусочно-постоянной функцией. Последний случай достаточно общий, так как результаты обработки статистических данных отказов первично удобно представлять в указанном виде. Кроме того, аналитически заданная функция $\lambda(t)$ всегда с заданной точностью после дискретизации по времени может быть представлена кусочно-постоянной функцией времени.

Для стареющих объектов, интенсивность отказов которых со временем увеличивается, основная идея метода состоит в замене реального нестационарного объекта его виртуальным фиктивным аналогом, поток отказов которого стационарен и характеризуется некоторой постоянной интенсивностью λ_c . Таким образом, осуществляется формальная стационаризация объекта, что легитимизирует применение хорошо разработанных методик решения стационарных надежности задач, распространяя их на случаи нестационарных объектов. При этом значение λ_c должно «увязываться» с параметрами «закона старения» реального объекта $\lambda(t)$ и определяться из некоторых дополнительных соображений.

Рассмотрим два возможных подхода к определению λ_c для стареющих объектов.

Подход 1. В соответствии с этим подходом λ_c предлагается находить из условия $\bar{t}_c = \bar{t}$, где $\bar{t}_c$ – среднее время наработки до отказа эквивалентного, а $\bar{t}$ – реального стареющего объекта. Если $\bar{t}$ выражено через параметры $\lambda_0, \alpha, \beta, \dots$ характеристики старения, то, с учетом (4), из этого равенства сразу получаем:

$$\lambda_c = \frac{1}{\bar{t}(\lambda_0, \alpha, \beta, \dots)}. \quad (5)$$

Для демонстрации использования этого подхода рассмотрим нестационарный объект, интенсив-

ность отказов которого изменяется со временем по закону:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t, \quad (6)$$

где λ_0 – начальная интенсивность отказов; α – коэффициент старения объекта ($\alpha > 0$).

Для этого случая в [12] получено точное значение среднего времени наработки до отказа $\bar{t}$, выраженное через параметры закона старения (6):

$$\bar{t}(\lambda_0, \alpha) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot e^{\frac{\lambda_0^2}{2\alpha}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{2\alpha}}\right) \right], \quad (7)$$

где $\Phi(\cdot)$ – интеграл вероятности.

Подставляя это выражение в (5), для интенсивности отказов фиктивного стационарного объекта λ_c имеем:

$$\lambda_c = \frac{\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot e^{\frac{\lambda_0^2}{2\alpha}}}{1 - \Phi\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{2\alpha}}\right)}. \quad (8)$$

Как видно из (8), численное значение λ_c связано с λ_0 и α весьма сложной зависимостью, трудно интерпретируемой с физической точки зрения. Чтобы «почувствовать» характерные особенности этой зависимости, найдем коэффициент:

$$\gamma = \frac{\bar{t}_0}{\bar{t}(\lambda_0, \alpha)}, \quad (9)$$

где $\bar{t}(\lambda_0, \alpha)$ рассчитывается по (7), а $\bar{t}_0 = 1/\lambda_0$ – среднее время жизни объекта, «стареющего» по закону (6), но при условии $\alpha=0$ (т.е., по существу, стационарного объекта с интенсивностью отказов λ_0). Теперь физический смысл γ становится понятным: этот коэффициент показывает во сколько раз уменьшается среднее время наработки до отказа стареющего объекта по сравнению со средним временем наработки до отказа стационарного объекта с такой же начальной интенсивностью отказов. Подставляя эти выражения в (9), после несложных преобразований получим:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{e^{\frac{\lambda_0^2}{2\alpha}}}{\frac{\lambda_0}{\sqrt{2\alpha}} \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{2\alpha}}\right) \right]}. \quad (10)$$

Видно, что γ является функцией только безразмерной переменной $\frac{\lambda_0}{\sqrt{2\alpha}}$, что дает возможность представить эту зависимость одним графиком (рисунок 1).

Из этого графика видно, что с увеличением значения аргумента кривая стремится к единице, что вполне объяснимо: чем больше начальная интенсивность отказов λ_0 , тем меньшее влияние (при прочих равных условиях) оказывает на среднее время наработки объекта на отказ коэффициент его старения.

Некоторое представление о сути процедуры стационаризации дает рисунок 2, построенный для случая линейно-стареющего объекта со значениями параметров $\lambda_0 = 0,2$ [1/год] и $\alpha = 0,02$ [1/год²].

На рисунке 2 показаны графики функций надежности реального (стареющего) объекта $p(t)$, построенной с использованием выражения (1) с учетом (6):

$$p(t) = \exp\left[-\int_0^t (\lambda_0 + \alpha t) dt\right] = \exp\left[-\left(\lambda_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2\right)\right], \quad (11)$$

и фиктивного стационарного $p_c(t)$:

$$p_c(t) = \exp(-\lambda_c t), \quad (12)$$

где λ_c рассчитывается по (8).

Приведенные на рисунке 2 графики с физической точки зрения можно прокомментировать следующим образом. Если среднее время наработки объекта на отказ трактовать как некий технический ресурс, то из рисунка 2 видно, что при стационаризации происходит как бы формальное перераспределение вероятностей «расходования» его частей по мере эксплуатации объекта. Представление о том, как именно происходит это пере-

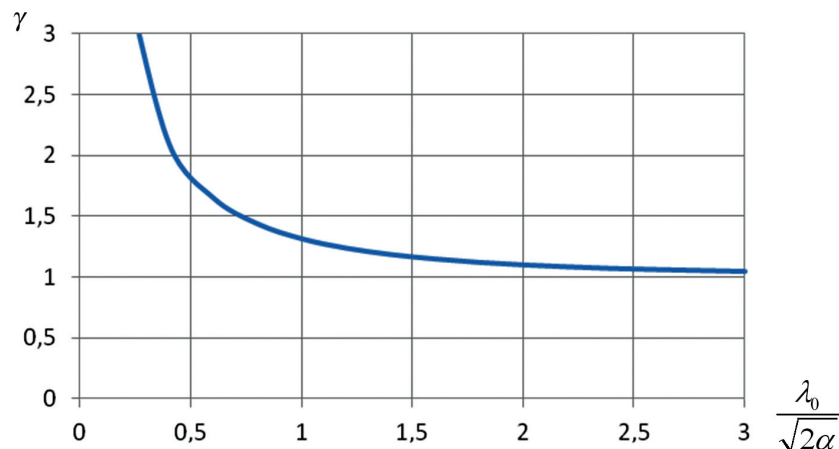


Рисунок – 1. Зависимость $\gamma = \gamma\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2\alpha}}\right)$

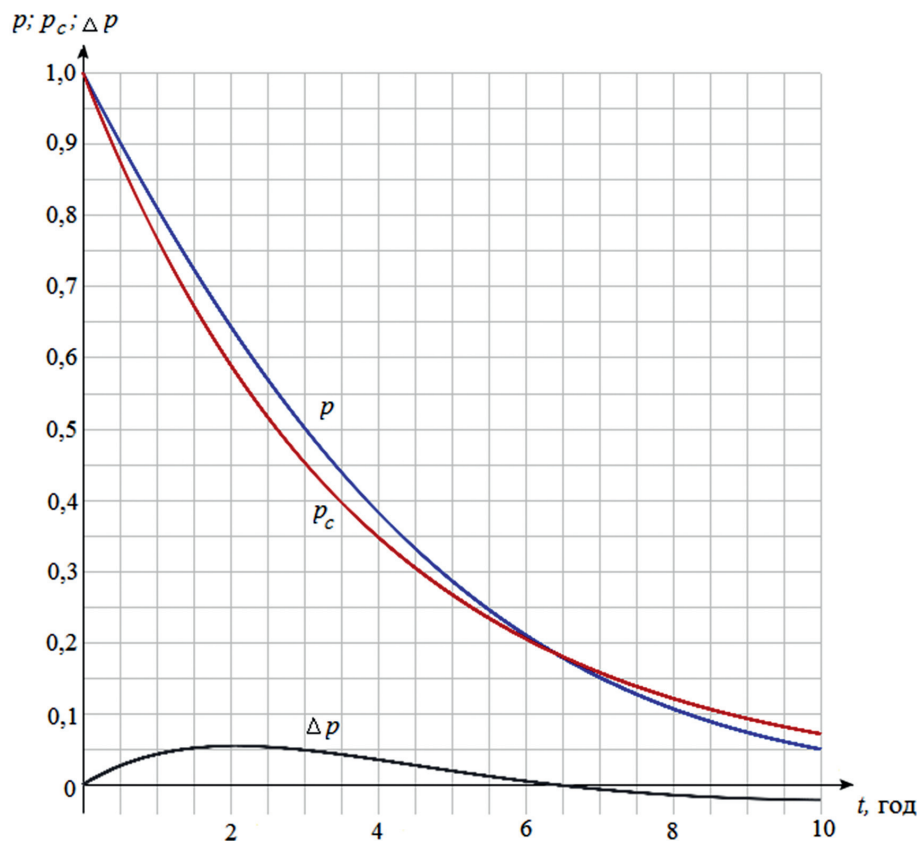


Рисунок – 2. Функции надежности реального и фиктивного объектов и различие между ними

распределение, дает график зависимости $\Delta p(t) = p(t) - p_c(t)$, построенный на этом же рисунке 2.

При всей логической оправданности этого подхода воспользоваться им удастся далеко не всегда. Дело в том, что рассмотренный линейно-стареющий объект является одним из весьма редких примеров, для которых среднее время наработки объекта на отказ можно выразить через параметры характеристики его старения в аналитическом виде. Поэтому далее предлагается иной подход к определению λ_c , лишенный подобных трудностей.

Подход 2. Значение интенсивности отказов λ_c определяется из соотношения:

$$p(t_{\text{зад}}) = p_c(t_{\text{зад}}), \quad (13)$$

т.е. из условия равенства вероятностей безотказной работы реального («стареющего») и фиктивного (стационарного) объектов в заданный момент времени $t_{\text{зад}}$.

Обычно надежность объекта оценивается не вообще, а для некоторого интервала $T_{\text{пр}}$ – времени прогноза по отношению к настоящему моменту. Тогда с учетом (1) и (10) соотношение (13) приводится к виду:

$$\int_0^{T_{\text{пр}}} \lambda(t) dt = \lambda_c T_{\text{пр}}, \quad (14)$$

откуда получаем:

$$\lambda_c = \frac{1}{T_{\text{пр}}} \int_0^{T_{\text{пр}}} \lambda(t) dt, \quad (15)$$

т.е. интенсивность отказов фиктивного объекта определяется как среднее значение $\lambda(t)$ за время прогноза.

В качестве примера выясним, как будут выглядеть выражения для λ_c при двух законах старения объекта: 1) в виде параболы n -го порядка и 2) в виде нарастающей экспоненты.

Случай 1. Интенсивность отказов нестационарного объекта имеет вид:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t^n. \quad (16)$$

Подставляя эту зависимость в (15), имеем:

$$\lambda_c = \lambda_0 + \frac{\alpha T_{\text{пр}}}{n+1} \quad (17)$$

В частности, при $n = 1$ (объект, рассмотренный в подходе 1) выражение (17) приобретает вид;

$$\lambda_c = \lambda_0 + \frac{\alpha}{2} T_{\text{пр}}. \quad (18)$$

Случай 2. Объект «стареет» по закону:

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{\alpha t}. \quad (19)$$

Тогда из (15) следует:

$$\lambda_c = \frac{\lambda_0}{\alpha T_{\text{пр}}} (e^{\alpha T_{\text{пр}}} - 1). \quad (20)$$

Из выражений (17), (18) и (20) видно, что при таком подходе λ_c зависит не только от параметров характеристики старения объекта, но и от времени прогноза $T_{\text{пр}}$.

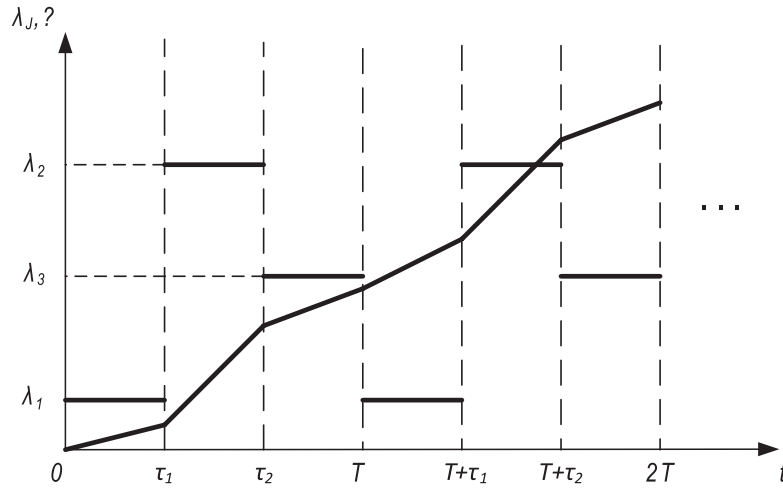


Рисунок 3. Модель интенсивности отказов

Оценка среднего времени наработки на отказ фиктивного стационарного объекта $\bar{t}_c$, как это вытекает из (5), теперь также становится функцией от T_{np} и равна:

для случая 1:

$$\bar{t}_c = \frac{n+1}{(n+1)\lambda_0 + \alpha T_{np}}; \quad (21)$$

для случая 2:

$$\bar{t}_c = \frac{\alpha T_{np}}{\lambda_0 (e^{\alpha T_{np}} - 1)}. \quad (22)$$

Оценим допускаемую при этом погрешность в определении среднего времени наработки до отказа $\bar{t}$ реального объекта для случая линейно-старееющего объекта, для которого $\bar{t}$ дается формулой (7) [12]. Степень близости $\bar{t}_c$ к реальному значению $\bar{t}$ оценим относительной приведенной погрешностью δT , вычисляемой по выражению:

$$\delta \bar{t} = \left(\frac{\bar{t} - \bar{t}_c}{\bar{t}} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}} \right) \cdot 100\%, \quad (23)$$

где $\bar{t}_c$ рассчитывается по (21) (при $n = 1$).

При данных рассмотренного выше числового примера ($\lambda_0 = 0,2$ [1/год]; $\alpha = 0,02$ [1/год²]) по (7) получаем $\bar{t} = 3,79$ года. Оценка для $\bar{t}_c$ при этих параметрах (по (21)) $\bar{t}_c = \frac{2}{0,4 + 0,02 \cdot T_{np}}$. Подставляя эти значения в (23), получаем:

$$\delta \bar{t} = \left[1 - \frac{2}{3,79(0,4 + 0,02 T_{np})} \right] \cdot 100\%. \quad (24)$$

Как видно, относительная приведенная погрешность зависит от времени прогноза T_{np} . Представление о величине этой погрешности дает таблица 1.

Таблица 1

T_{np} , ГОДЫ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta \bar{t}$, %	-25,64	-19,93	-14,72	-9,94	-5,54	-1,48	2,28	5,76	9,02

Из приведенных в таблице 1 данных видно, что по мере увеличения времени прогноза относительная приведенная погрешность в определении среднего времени наработки на отказ меняет знак и может достигать достаточно больших значений.

Перейдем далее к рассмотрению функции надежности и среднего времени наработки на отказ объекта с периодической кусочно-постоянной интенсивностью отказов.

Пусть T – период изменений интенсивности отказов, состоящий из l в общем случае различных временных интервалов (рисунок 3, где $l = 3$), τ_i – отрезок времени между началом n -го периода и окончанием i -го интервала в этом периоде.

Для удобства принято $\tau_0 = 0$, $\tau_i = T$, $i = 0, 1, \dots, l$. В этом случае λ_i – интенсивность отказов, $\tau_i - \tau_{i-1}$ – длительность i -го интервала в n -м периоде. В работе авторов [13] при такой модели изменения интенсивности отказов получены выражения функции надежности $p(t)$ и среднего времени $\bar{t}$ наработки на отказ:

$$p(t) = e^{-[(n-1)A + B_{i-1} + \lambda_{i-1}\{t - [(n-1)T + \tau_{i-1}]\}]} \text{ при } (n-1)T + \tau_{i-1} < t \leq (n-1)T + \tau_i, \quad (25)$$

где

$$A = \sum_{j=1}^{j=l} \lambda_j (\tau_j - \tau_{j-1});$$

$$B_{i-1} = \begin{cases} 0, & \text{при } i = 1; \\ \sum_{j=1}^{j=i-1} \lambda_j (\tau_j - \tau_{j-1}), & \text{при } i > 1. \end{cases}$$

$$\bar{t} = \frac{1}{1 - e^{-A}} \sum_{j=1}^{j=l} \frac{1}{\lambda_j} \left[1 - e^{-\lambda_j (\tau_j - \tau_{j-1})} \right]. \quad (26)$$

При практически оправданном допущении $\lambda T \ll 1$ после разложения экспонент в ряд Маклорена при линейном приближении получаем:

$$p(t) = 1 - \{(n-1)A + B_{i-1} + \lambda_{i-1}[t - [(n-1)T + \tau_{i-1}]]\} \text{ при } (n-1)T + \tau_{i-1} < t \leq (n-1)T + \tau_i; \quad (27)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{1 - \left[1 - \sum_{j=1}^{j=i} \lambda_j (\tau_j - \tau_{j-1}) \right]} \sum_{j=1}^{j=i} \frac{1}{\lambda_j} \{ 1 - [1 - \lambda_j (\tau_j - \tau_{j-1})] \} = \frac{1}{\bar{\lambda}}, \quad (28)$$

где $\bar{\lambda} = \sum_{j=1}^i \lambda_j \frac{\tau_j - \tau_{j-1}}{T}$ – средняя за период T интенсивность отказов.

После ряда преобразований выражения (25) и (27) можно представить в виде:

$$p(t) = e^{-\left\{ (n-1)\bar{\lambda}T + \bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i \{ t - [(n-1)T + \tau_{i-1}] \} \right\}}, \quad (29)$$

$$p(t) = 1 - \{ (n-1)\bar{\lambda}T + \bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i [t - [(n-1)T + \tau_{i-1}]] \}, \quad (30)$$

где $\bar{\lambda}_{i-1}$ – средняя интенсивность отказов за время, равное $(i-1)$ -му интервалу (в отличие от $\bar{\lambda}$ – средней интенсивности отказов по периоду T).

В формулах функции надежности $(n-1)T + \tau_{i-1} < t \leq (n-1)T + \tau_i$ слагаемое $\bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1}$ отлично от нуля только при $i > 1$.

Для расчета вероятности безотказной работы за фиксированное время $t = T_\phi$ по этим формулам величина T_ϕ представляется в виде:

$$t = T = (n-1)T + \tau_{i-1} + \Delta t, \quad (31)$$

где $0 \leq \Delta t \leq \tau_i - \tau_{i-1}$.

Так, для частного случая, когда T делится на два интервала (на первом из которых интенсивность отказов равна λ_1 , на втором – λ_2) и $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \alpha$, $\frac{\tau_1}{T} = \beta$, среднее время наработки до отказа определяется выражением:

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda_2(\alpha\beta + 1 - \beta)}.$$

При получении этого выражения из (28) принято $\lambda_{\max} T \ll 1$, где $\max_j = \lambda_j$.

Результаты расчета $\bar{t} = f(\beta)$ при фиксированном λ_2 приведены на рисунке 4. При $\alpha=1$ имеет место стационарный поток отказов.

Перейдем далее к общему случаю, когда зависимость $\lambda(t)$ задана кусочно-постоянной непериодической функцией. Как уже указывалось ранее, модель интенсивности отказов достаточно универсальна.

Так как непериодический процесс можно рассматривать как периодический с бесконечно большим периодом, то функцию надежности для этого случая получаем из (29) при $n = 1$. Действительно, величина T может быть выбрана достаточно большой и равной времени прогноза T_{np} , в течение которого, как указывалось выше, представляет интерес значение функции надежности. Величина $p(t=T_{np})$ настолько мала, что использование объекта при $t > T_{np}$ не представляет никакого практического интереса. В этих условиях

$$p(t) = e^{-\bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i(t - \tau_{i-1})} \text{ при } \tau_{i-1} < t \leq \tau_i = T_{np}. \quad (32)$$

Остается открытым вопрос, при каком $\tau_{i-1} < t \leq \tau_i$ практическая полезность вычислений теряет смысл. Пусть $p(T_{np}) = p_k$ – вероятность безотказной работы, при которой заканчивается эксплуатация неремонтируемого объекта или он направляется на ремонт в случае восстанавливаемого объекта. Тогда длительность прогно-

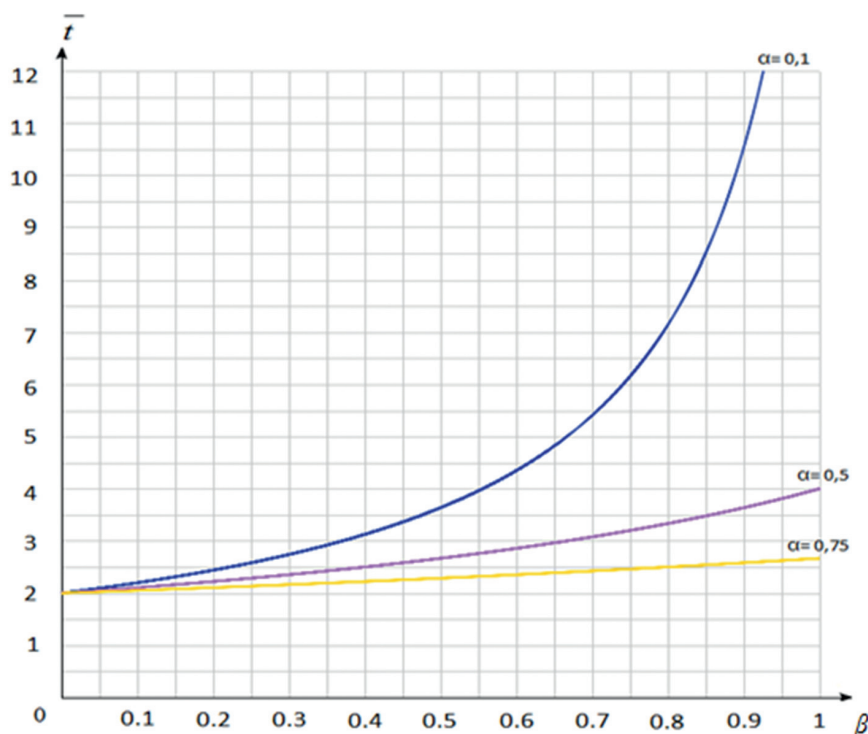


Рисунок – 4. Зависимость $\bar{t} = f(\beta)$ при различных значениях α

зируемого отрезка времени $T_{пр}$ с учетом (28) находится из уравнения:

$$p_k = e^{-[\bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i(T_{пр} - \tau_{i-1})]}. \quad (33)$$

Откуда

$$\ln p_k = -[\bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i(T_{пр} - \tau_{i-1})]$$

и

$$T_{пр} = \frac{1}{\lambda_i}(-\bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i\tau_{i-1} - \ln p_k) \quad (34)$$

Следовательно, на отрезке времени от начала функционирования объекта до $t=T_{пр}$ функция надежности определяется выражением (33). Если требуется рассчитать вероятность безотказной работы за фиксированное время $T_{ф} < T_{пр}$, величина $T_{ф}$ представляется в виде $t = \tau_{i-1} + \Delta t$, где $0 \leq \Delta t < T_{пр} - \tau_{i-1}$.

Линейное приближение $p(t)$ при $\lambda_{\max} T_{ф} \ll 1$, где $\lambda_{\max} = \max_i \lambda_i$, имеет вид:

$$p(t) = 1 - [\bar{\lambda}_{i-1}\tau_{i-1} + \lambda_i(t - \tau_{i-1})].$$

Среднее время наработки на отказ при этом определяется выражением

$$\bar{t} = \frac{1}{\bar{\lambda}},$$

где $\bar{\lambda}$ – среднее значение интенсивностей отказа за время $T_{пр}$.

Если не использовать линейное приближение, то выражение среднего времени наработки до отказа $\bar{t}$ вычисляется по формуле (26), в которой l равно числу интервалов постоянства интенсивности отказов за время $T_{пр}$.

Заключение

1. Приведены решения задач определения среднего времени наработки до отказа и функции надежности для различных нестационарных потоков отказов.

2. Описаны модели «стареющих» объектов, интенсивность отказов которых задается функцией, возрастающей во времени, модели объектов с периодической кусочно-постоянной интенсивностью отказов, модели объектов с непериодической кусочно-постоянной интенсивностью отказов. К последней модели, после временной дискретизации и кусочно-постоянной аппроксимацией зависимости интенсивности отказов от времени, выполненной с заданной точностью, сводятся решения задач для различных нестационарных потоков отказов.

3. Приведенные результаты решения удобны для использования в расчетах надежности технических объектов.

Библиографический список

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.
2. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. – Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012.

3. Zhao X., Al-Khalifa K.N., Nakagawa T. “Approximate methods for optimal replacement, maintenance, and inspection policies” // Journal of Reliability Engineering & System Safety, Volume 144, p.p. 68-73, (December 2015).

4. Ke H., Yao K. “Block replacement policy with uncertain lifetimes” // Journal of Reliability Engineering & System Safety, Volume 148, p.p. 119-124, (April 2016).

5. Ermolin Yu. A. “Reliability estimation of urban wastewater disposal networks”. In: Reliability Engineering Advances (ed. Gregory I. Hayworth), New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009.

6. Kancev D., Giorgiev B., Volkanovski A., Gepin M. “Time-dependent unavailability of equipment in an ageing NPP: sensitivity study of a developed model” // Journal of Reliability Engineering & System Safety, Volume 149, p.p. 107-120, (May 2016).

7. Chiachio J., Chiachio M., Sankararaman S., Saxena A., Goebel K. “Condition-based prediction of time-dependent reliability in composites” // Journal of Reliability Engineering & System Safety, Volume 142, p.p. 134-137, (October 2015).

8. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Надежность сетей и сооружений систем водоотведения. – М.: Издательство АСВ, 2015.

9. Ермолин Ю. А., Алексеев М. И. Учет «старения» объекта при оценке его надежности // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 5. – С. 68-71.

10. Wang Z., Chen W. “Time-variant reliability assessment through equivalent stochastic process transformation” // Journal of Reliability Engineering & System Safety, Volume 152, p.p. 166-175, (August 2016).

11. Eryilmaz S. “A reliability model for a three-state degraded system having random degradation rates” // Journal of Reliability Engineering & System Safety, Volume 156, p.p. 59-63, (December 2016).

12. Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Оценка показателей надежности «линейно-стареющего» объекта // Надежность, – 2015. – № 4. – С. 57-60.

13. Баранов Л. А., Ермолин Ю. А. Надежность систем с периодической кусочно-постоянной интенсивностью отказов // Электротехника (в печати).

Сведения об авторах

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и защита информации», Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), Москва, Россия, e-mail: baranov.miit@gmail.com

Ермолин Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации», Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), Москва, Россия, e-mail: ermolin.y@yandex.ru

Поступила 21.07.2017

Пример расчета дерева отказов с логическими петлями

Евгений П. Сороколетов, ГК «Би Питрон», Санкт-Петербург, Россия



Евгений П.
Сороколетов

Цель. При проведении анализа отказобезопасности сложных технических систем с использованием метода деревьев отказов могут возникать логические петли, когда, с точки зрения структуры дерева отказов, система поддерживает саму себя. Рекурсия в структуре дерева отказов нарушает логическое уравнение и не позволяет провести расчет и соответствующий анализ. Под сложной понимается система, выполняющая множество функций, обладающая свойствами отказоустойчивости за счет различных видов резервирования, наличием межсистемных связей и высокой степенью интеграции аппаратных и программных компонентов. В настоящей статье разбирается частный случай решения проблемы логической зацикленности дерева отказов, произошедшей при анализе системы электроснабжения воздушного судна на соответствие нормам летной годности и авиационным правилам. **Метод.** В рамках работы проводится обзор известных способов решения поставленной задачи (как ручных, так и автоматических), описываются достоинства и недостатки, применимость и, в конечном счете, дается их сравнительная оценка по результатам расчета вероятности наступления различных отказов системы электроснабжения воздушного судна. Представленный в настоящей работе метод разрешения зацикленности дерева отказов основан на выявлении в структуре дерева рекурсивных элементов и последующем сведении циклической связи в форму сужающейся спирали посредством моделирования начального состояния анализируемой системы. **Результаты.** Расчет исследуемого в статье дерева отказов осуществлялся как посредством представленного в работе метода, так и наиболее применимых в конкретном случае известных способов разрешения зацикленности. Помимо этого демонстрируются сравнительные результаты расчета других особых ситуаций, не являющихся объектом рассмотрения настоящей работы, но демонстрирующих особенности работы различных методов. Результаты расчета показывают, что наибольшее расхождение между методами регистрируется при наличии в системе резерва и обратных связей. **Выводы.** Представленный в статье метод был апробирован при анализе отказобезопасности системы электроснабжения воздушного судна. Разработанный способ позволяет в ручном режиме разрешить в некоторых случаях проблему логических петель в дереве отказов без существенного увеличения вычислительных ресурсов и с сохранением аналитического решения (минимальные сечения дерева отказов). С другой стороны, данный способ решения может вызвать стремительный рост размерности дерева отказов при анализе на межсистемном уровне. В частных случаях может произойти смешение в структуре дерева отказов несовместных событий типа «работоспособность» и «отказ», что приводит к необходимости использования инверсии через оператор «НЕ» и, соответственно, к кратному увеличению времени расчета. Другим ограничением на использование метода могут быть ситуации, когда невозможно выделить «исходное» или «нормальное» состояние анализируемой системы. С учетом всего вышесказанного, представленный метод классифицирован автором как инженерный метод ограниченного применения.

Ключевые слова: анализ дерева отказов, логические петли, рекурсивные ссылки, анализ отказобезопасности, система электроснабжения.

Формат цитирования: Сороколетов Е.П. Пример расчета дерева отказов с логическими петлями // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 10-15. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-10-15

Введение

При проведении анализа деревьев отказов (АДО) сложных технических систем могут возникать рекурсивные ссылки. Это характерно для тех случаев, когда анализу подвергаются отказоустойчивые системы, в результате чего, с точки зрения логики и структуры АДО, система поддерживает саму себя. Настоящей проблеме посвящен ряд публикаций [1, 2, 3]. В инженерной практике чаще всего проблема логических петель встречается при оценке безопасности систем гражданской авиации и атомной промышленности, так

как, во-первых, к этим объектам выдвигаются высокие требования по надёжности и отказобезопасности и, во-вторых, в этих отраслях метод АДО является одним из базовых в процедурах доказательства безопасности [4, 5]. Логические петли в основном возникают при анализе распределенных систем с резервированием и множеством межсистемных связей, таких, как системы электроснабжения (СЭС), системы гидропитания (ГС), системы кондиционирования и вентиляции (СКВ) и т.д. Также рекурсивные ссылки могут возникать при анализе высокоинтегрированных систем и систем с обратной связью. Наиболее высокая вероятность по-

явления логической петли существует при проведении межсистемного анализа (рисунок 1).



Рисунок – 1. Пример логической петли на межсистемном уровне

Исходные данные и постановка задачи

Рассмотрим упрощенный пример анализа отказо-безопасности системы электроснабжения воздушного судна, в результате которого, в частном порядке, была решена проблема логической заикленности структуры дерева отказов.

Анализ отказобезопасности авиационных систем [5, 6] в общих словах заключается в определении возможных функциональных отказов (ФО) систем, оценке степени опасности ФО (на основании чего формируются требования и бюджеты вероятности), анализе возможных причин и соответствующем расчете вероятности наступления ФО. В качестве метода расчета в зависимости от ситуации может применяться табличный метод, метод логических схем, марковский анализ или деревья отказов. Последние получили наибольшее распространение благодаря хорошей наглядности и мощным аналитическим возможностям.

Объектом анализа выступает система электроснабжения воздушного судна. Рассматриваемая система с функциональной точки зрения относится к классу типовых двухканальных систем электроснабжения. Поэтому для общего описания функционирования можно воспользоваться открытыми источниками [7]. Первичная СЭС переменным током (АС) состоит из двух каналов генерирования (по числу маршевых двигателей), которые могут работать раздельно или параллельно, а также резервного канала генерирования от вспомогательной силовой установки (ВСУ). Вторичная СЭС постоянным током (DC) также состоит из двух каналов и включает в себя выпрямительные устройства (ВУ), преобразующие переменный ток в постоянный, аккумуляторные батареи (АБ), которые используются в качестве источника аварийного питания, а также преобразователи постоянного

тока в переменный для аварийного питания потребителей переменного тока от АБ. Каждый канал системы переменного и постоянного тока состоит из подсистемы генерирования и распределения соответственно переменного и постоянного тока. Система распределения состоит из центральных распределительных устройств (ЦРУ), подключенных к соответствующим каналам генерирования, и нескольких шин распределительных устройств (РУ), от которых осуществляется питание потребителей.

В нормальных условиях питание электроэнергией обеспечивается двумя основными каналами генерирования переменного и постоянного тока. В случае отказа одного или двух основных каналов генерирования производится объединение шин ЦРУ, снижение воздушного судна на высоту запуска ВСУ и включение соответствующего канала генерирования ВСУ. Запуск ВСУ осуществляется от шины аккумуляторных батарей, запитываемой в нормальных условиях от вторичной СЭС постоянным током, а при аварийном питании от аккумуляторных батарей.

С учетом вышесказанного, в рамках анализа отказо-безопасности СЭС, в частности, проводится оценка вероятности обесточивания потребителей переменного и постоянного тока, что на системном уровне выражается в обесточивании соответствующих шин распределительных устройств. Рассмотрим упрощенную схему СЭС из одного основного канала генерирования (привод-генератор), резервного канала ВСУ (рисунок 2) и механизм образования логической петли при проведении дедуктивного анализа.

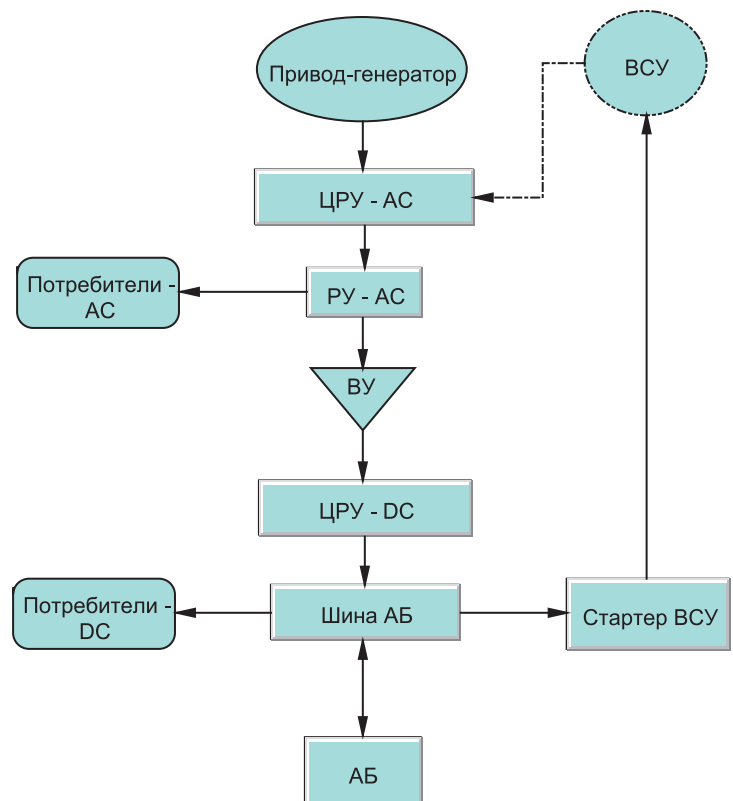


Рисунок – 2. Упрощенная схема одного из каналов генерирования СЭС воздушного судна

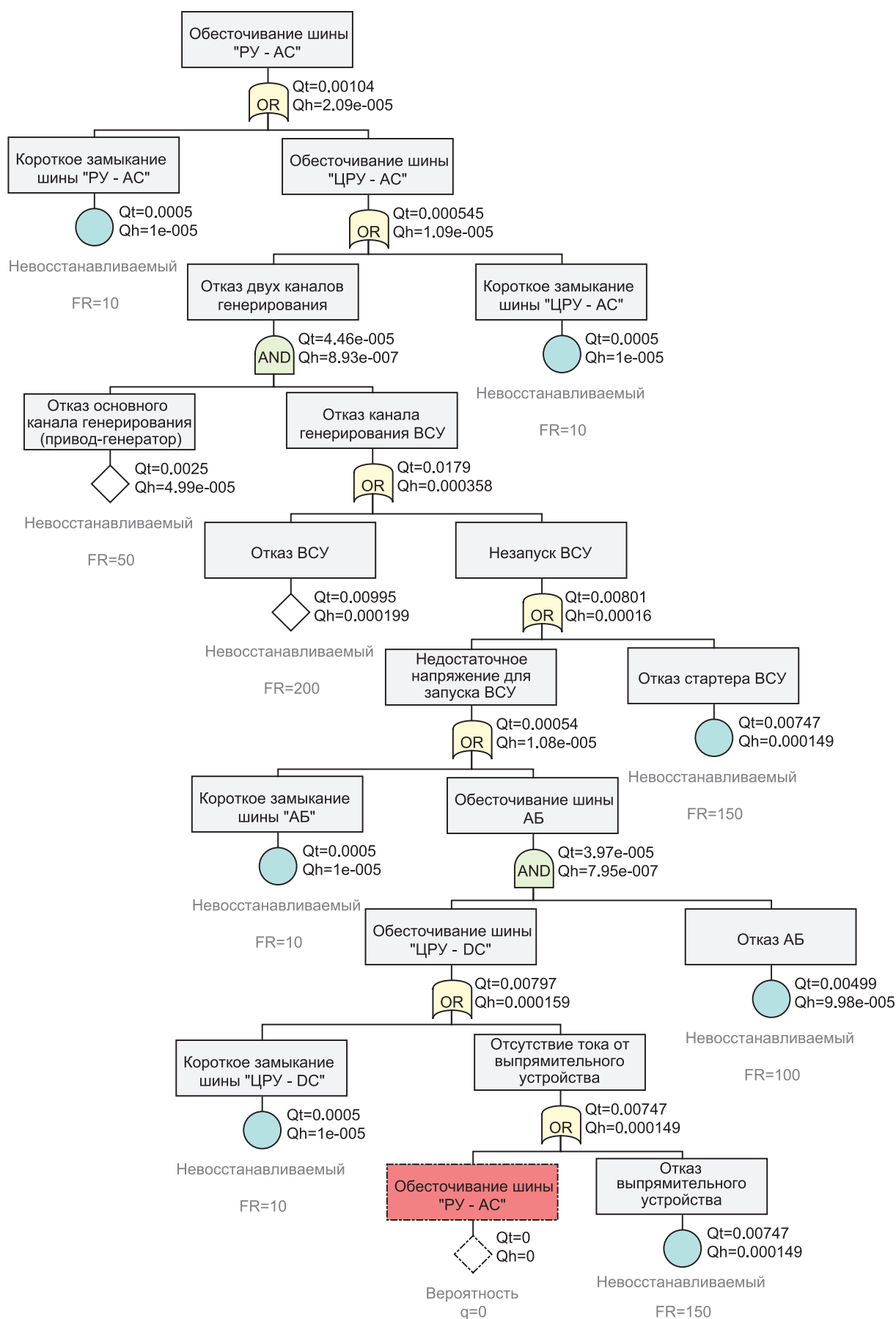


Рисунок – 3. Дерево отказов «Обесточивание шины РУ – АС»

К примеру, разберемся в причинах обесточивания потребителей переменного тока (АС) и, соответственно, шины «РУ – АС» (рисунок 3). Как видно из схемы СЭС и дерева отказов, канал генерирования ВСУ является ненагруженным резервом, надёжное функционирование которого, в том числе, зависит от состояния самих резервируемых элементов. Таким образом, при рассмотрении надёжности резервных элементов, в корне дерева отказов (выделено) появляется рекурсивная ссылка на его вершину. Обозначения, основные логические операторы и соответствующие формулы дерева отказов в соответствии с [8].

Базовые элементы дерева отказов представлены невосстанавливаемыми, так как расчет проводится на временной интервал одного полета воздушного судна. Каждый базовый элемент имеет соответствующую постоянную интенсивность отказов FR (Failure Rate, λ) с размерностью 10^{-6} (1/ч). Для дерева отказов проводится расчет двух показателей: вероятность отказа (неготовность) Q_i и вероятность отказа на 1 полетный час Q_h :

$$Q_i = 1 - (1 - q) \times e^{-\lambda t};$$

$$Q_h = Q_i / t.$$

Обзор методов расчета дерева отказов с логическими петлями

В различных методах расчета АДО с логическими петлями [2, 3, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] предлагается как ручной, так и автоматический способ решения. Самые простые модели предлагают разрывать циклические связи через удаление рекурсивного элемента. Так, в работе [2] предлагается проводить анализ межсистемных связей и относительно слабые из них разрывать, что позволяет получить независимые деревья отказов. Слабая связь подразумевает, что вклад системы в вероятность наступления рассматриваемого события пренебрежимо мал. На месте этой связи создается нулевое или абсолютное событие. Задача аналитика сводится к расчету и сравнению силы связей и определению разрываемого участка логической петли к замене соответственно на «0» или «1». Схожий алгоритм, но уже автоматический, предложен в [16], однако, там замене подвергается не конкретное событие, а целое логическое выражение И/ИЛИ, в которое это событие входит.

Простое удаление элементов логической петли позволяет быстро решить проблему, однако, негативно сказывается на точности расчета и возможности более глубокого исследования, например, с помощью анализа отказов по общей причине [5, 6]. Также стоит отметить, что в отличие от представленного усеченного примера, в реальной системе присутствует второй основной канал генерирования, подключаемый через шины ЦРУ, таким образом, удаляя рекурсивную ссылку, мы отсекаем сразу все источники резервирования для промежуточных уровней дерева отказов.

Другой подход разрешения проблемы циклов базируется, в том или ином виде, на моделировании «исходного» состояния системы [13], а также на жестком регламентировании порядка реализации отказов и

соответствующих последствий [10]. Последнее достигается через добавление в структуру дерева отказов динамического логического элемента «Sequence gate», который бы задавал требуемую последовательность, и последующим расчетом посредством имитационного моделирования методом Монте-Карло. В текущем исследовании этот способ был отброшен по причине очень высокой требовательности к вычислительным ресурсам, невалидности результатов имитационного моделирования на коротких временных интервалах, соответствующих времени одного полета, а также невозможности получить аналитическое решение с целью дальнейшего анализа отказов по общей причине (что является требованием сертифицирующих органов).

Метод и описание решения

Для решения описанной ситуации в авиационной отрасли был принят неформальный подход, заключающийся в разделении множества отказов СЭС на группы «До запуска ВСУ» и «После запуска ВСУ». Однако при такой логике возникают трудности с корректным учетом события возможного незапуска ВСУ, вероятность которого просто доумножалась к вероятностям соответствующих отказов из группы «После запуска ВСУ», предполагая что это независимые события. Самой собой, полученный таким образом результат можно смело классифицировать как «оптимистический». Для более точного результата требовался другой подход, позволяющий учесть множество общих причин отказов без нарушения логики анализа.

Смысл предлагаемого решения дерева отказов с логическими петлями заключается в сведении циклической связи в форму спирали. Для этого проводится моделирование «нормального» состояния системы и последующая вставка этой модели на место рекурсивного элемента. После этого формируется новое дерево отказов с учетом как рекурсивного элемента, так и начального дерева первого цикла. Таким образом, на месте цикла формируется спираль расчета. Возвращаясь к рассматриваемой системе, нормальное состояние заключается в успешном функционировании основного канала генерирования при отключенном канале ВСУ (рисунок 4). Для логического разделения проводится граница конфигурации АДО по критерию «С учетом ВСУ» и «Без учета ВСУ» (выделенная часть ДО).

Заключение

Представим некоторые результаты расчета особых ситуаций двухканальной СЭС воздушного судна с использованием различных методов решения проблемы циклов АДО

Как видно из таблицы 1, результат расчета при том или ином методе разрешения логических петель зависит не столько от способа замены, сколько от сложности анализируемого события. Так, наибольшее расхождение достигается при анализе совместных отказов шин сразу

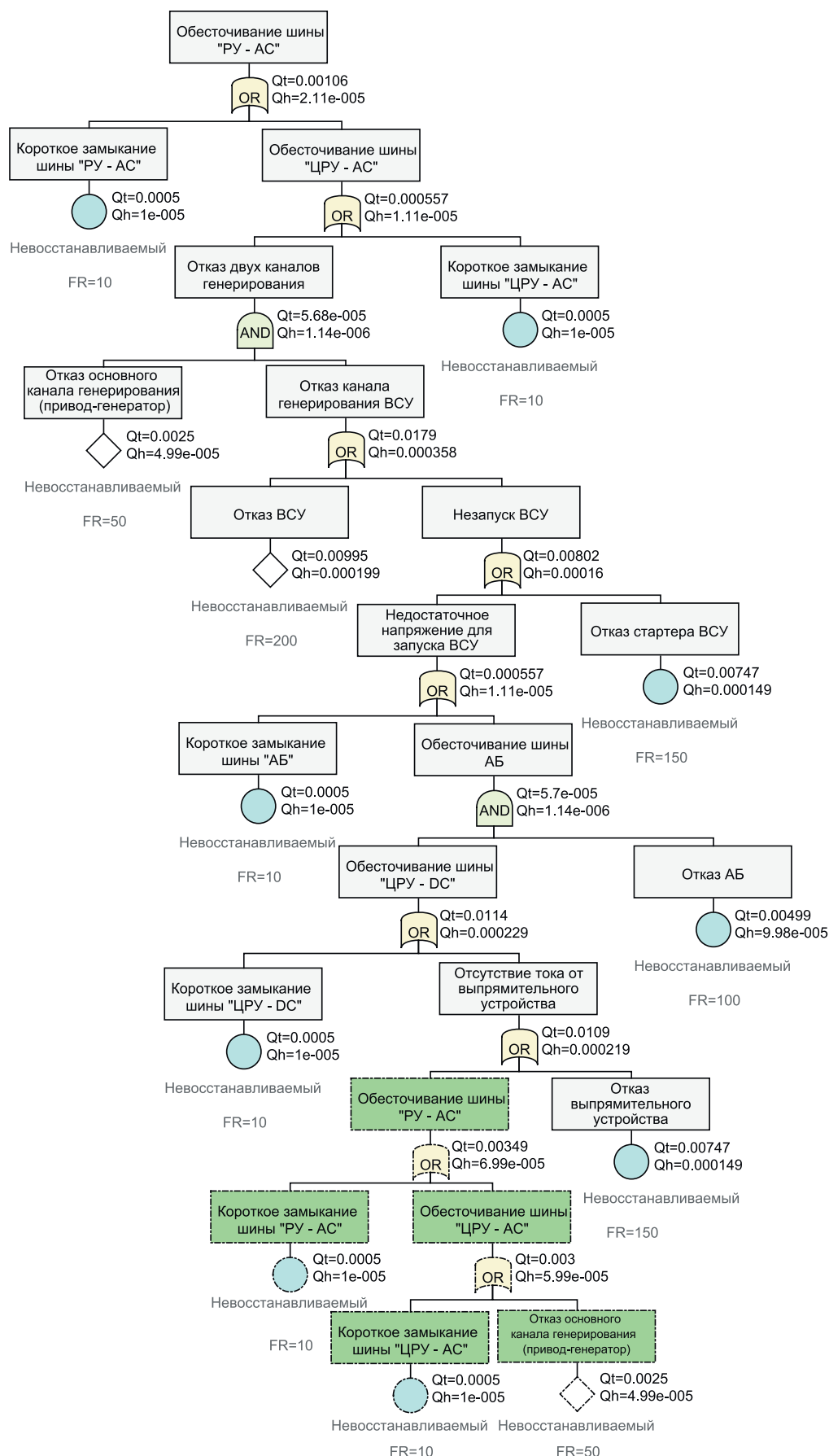


Рисунок – 4. Выделение «нормального» состояния системы и его перенос на место рекурсивного элемента

Таблица 1 – Сравнение методов решения логических петель АДО

Особая ситуация	Метод замены рекурсивного элемента		
	«0»	«1»	Моделирование исходного состояния
Обесточивание ЦРУ1	$Q_i = 1,06 \times 10^{-7}$	$Q_i = 0,99 \times 10^{-7}$	$Q_i = 1 \times 10^{-7}$
Обесточивание ЦРУ1 и ЦРУ2. Аварийное питание потребителей переменного тока	$Q_i = 4,91 \times 10^{-8}$	$Q_i = 8,85 \times 10^{-7}$	$Q_i = 1,52 \times 10^{-11}$
Обесточивание шины ВУ1	$Q_i = 3,89 \times 10^{-8}$	$Q_i = 3,89 \times 10^{-8}$	$Q_i = 3,89 \times 10^{-8}$
Обесточивание шин ВУ1 и ВУ2. Переход на аварийное питание потребителей постоянного тока	$Q_i = 6,81 \times 10^{-9}$	$Q_i = 1,94 \times 10^{-8}$	$Q_i = 1,68 \times 10^{-9}$

двух каналов генерирования, как уже было отмечено, в таких случаях замена рекурсивного элемента на «1» или «0» помимо прочего отсекает и все возможные источники резервирования.

Представленный метод позволяет в ручном режиме решить в некоторых случаях проблему логических петель в АДО без существенного увеличения вычислительных ресурсов и с сохранением аналитического решения.

Следует оговориться, что представленный способ был разработан и апробирован в частном порядке анализа СЭС и не применим для тех случаев, когда невозможно выделить «исходное» или «нормальное» состояние анализируемой системы. Иными словами, метод следует отнести к разряду инженерных.

Представленный способ в ряде случаев имеет недостаток, вызванный возможным смещением в структуре АДО состояний «работоспособность» и «отказ». Для коррекции этого влияния может потребоваться инверсия событий с помощью логического оператора «НЕ», что приводит к кратному увеличению времени расчета, а также повышает требования к четкому формулированию рассматриваемых событий.

Метод также приводит к увеличению размерности деревьев отказов, что может быть ограничением к его применению на межсистемном уровне.

Библиографический список

1. ASME Standard for probabilistic risk assessment for nuclear power plant application, – The American Society of Mechanical Engineers – NY, 2002.
2. Coles G.A., Powers T.B. Breaking the logical loop to complete the probabilistic risk assessment // Proceeding of PSA 89: International Topical Meeting Probability, Reliability, and Safety Assessment. PA, USA, 1989. P. 1155–1160.
3. Demichela M., Piccinini N., Ciarambino I., Contini S. How to avoid the generation of logic loops in the construction of fault tree // Reliability Engineering and System Safety. 2004. Vol 84. P. 197–207.
4. NUREG-0492 Fault tree hand-book, – US Nuclear Regulatory Commission – Washington, D.C., 1981.
5. SAE ARP4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment, – SAE International – PA, 1996.

6. SAE ARP4754A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems- SAE International – PA, 2010.

7. ГОСТ 24898-81 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Методика расчета показателей безотказности. – Введ. 1983-01-01. – М. Изд-во стандартов, 1982. – 45 с.

8. ГОСТ Р 27.302-2009 Надёжность в технике. Анализ дерева неисправностей. – Введ. 15-12-2009. – М. Стандартинформ, 2011. – 27 с.

9. Ciarambino I., Contini S., Demichela M., Piccinini N. How to avoid the generation of loops in the construction of fault tree Proceedings on RAMS – Seattle, 2002.

10. Han, S. H., Lim, H. Top event probability evaluation of a fault tree having circular logics by using Monte Carlo method // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol 243. P. 336–340.

11. Jung W.S., Han S.H. Development of an analytical method to break logical loops at the system level // Reliability Engineering and System Safety. 2005. Vol. 90. P. 37–44.

12. Lim H.G., Jang S.C. An analytic solution for a fault tree with CLs in which the systems are linearly interrelated // Reliability Engineering and System Safety. 2007. Vol. 92. P. 804–807.

13. Lim H.G., Jang S.C. Systematic treatment of circular logics in a fault tree analysis // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 245. P. 172–179.

14. Matsuoka T. An exact method for solving logical loops in reliability analysis // Reliability Engineering and System Safety. 2009. Vol. 94. P. 1282–1288.

15. Vaurio J. A recursive method for breaking complex logic loops in Boolean system models // Reliability Engineering and System Safety. 2007. Vol. 92. P. 1473–1475.

16. Yang J.E., Han S.H., Park J.H., Jin Y.H. Analytic method to break logical loops automatically in PSA // Reliability Engineering and System Safety. 1997. Vol. 56. P. 101–105.

Сведения об авторах

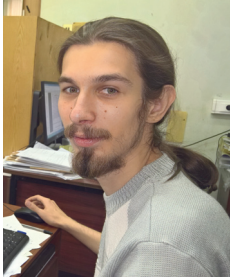
Евгений П. Сороколетов – руководитель направления отказобезопасность ГК «Би Питрон», аспирант кафедры приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: sorokoletov.john@gmail.com

Поступила 25.05.2017

Механизм построения аналитического решения при вычислении вероятности безотказной работы системы с ненагруженным резервированием при неоднотипных элементах (ч. 1)

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

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



Дмитрий М.
Кривопапов



Евгений В.
Юркевич

Резюме. Вычисление вероятности безотказной работы системы является неотъемлемым этапом надежностного проектирования. С ростом числа типов и количества задействованных элементов процесс вычислений надежности усложняется и занимает все большее время. Для упрощения расчетов принимаются допущения, например, в системах с резервированием используются однотипные элементы. Однако такой подход не позволяет оценить надежность системы, где применены принципиально различные элементы. Подобного рода задачи возникают при необходимости вычисления вероятности безотказного выполнения функции – оценке функциональной надежности. В этом случае возможна оценка надежности численными методами с применением приближенных вычислений на ЭВМ при интегрировании и дифференцировании. Приближенность результата таких вычислений определяется как точностью самой ЭВМ, так и сложностью исследуемой системы. При надежностном проектировании, когда процесс перерасчета производится многократно, этот недостаток является критичным. Аналитические решения могут быть представлены в матричном виде, что очень удобно для расположения в памяти ЭВМ. Для полной автоматизации процесса вычисления ВБР необходимо вывести механизмы определения коэффициентов матрицы. Для этого требуется рассмотреть их изменения при дифференцировании и интегрировании согласно основным расчетным формулам. Для совершенствования технологий надежностного проектирования сложных технических систем выведен и математически обоснован алгоритм, позволяющий с помощью рекуррентных процедур формировать аналитическое выражение для вычисления временной безотказной работы системы, включающей любое число принципиально различных элементов с ненагруженным типом резервирования. **Методы.** Предлагаемый алгоритм оценки надежности использует численные методы с применением вычислений на ЭВМ, состоящих из пересчета коэффициентов матрицы по обобщенным формулам вместо вычислений производных и интегралов, что позволяет значительно ускорить вычисления и повысить точность получаемых результатов. Объединяя полученные формулы для случаев, когда подключаемый элемент совпадает или не совпадает с каким либо из типов элементов в исходной системе, получается аналитическое решение для данной итерации в соответствии с разработанной алгоритмической схемой. **Выводы.** Выведен и математически обоснован алгоритм, позволяющий в рекуррентном виде формировать аналитическое выражение для вычисления вероятности безотказной работы системы из любого числа элементов, находящихся в ненагруженном резерве. Процесс формирования решения состоит из пересчета коэффициентов матрицы по обобщенным формулам вместо вычислений производных и интегралов численным способом, что позволяет значительно ускорить вычисления и повысить точность результатов.

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

Формат цитирования: Кривопапов Д.М., Юркевич Е.В. Механизм построения аналитического решения при вычислении вероятности безотказной работы системы с ненагруженным резервированием при неоднотипных элементах // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 16-22. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-16-22

Введение

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

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

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

В работе [4] было показано, что аналитические решения могут быть представлены в матричном виде, что очень удобно для расположения в памяти ЭВМ. Для полной автоматизации процесса вычисления ВБР необходимо вывести механизмы определения коэффициентов матрицы. Для этого требуется рассмотреть их изменения при дифференцировании и интегрировании согласно основным расчетным формулам.

Изменение коэффициентов при дифференцировании

Рассмотрим произвольную систему из четырех элементов

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

Функции $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ представляют собой многочлены по степени t , количество слагаемых которых определяется количеством соответствующих одинаковых элементов системы.

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

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

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

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

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

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

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

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

Тогда расчетная формула ВБР при подключении 5-го элемента будет иметь вид:

$$P_5(T) = P_4(T) + \int_0^T p_5(\tau, T) \cdot f_4(\tau) d\tau,$$

где $P_4(T)$ – ВБР системы из четырех элементов в течение времени T ;

$p_5(\tau, T)$ – ВБР 5-го (подключаемого) элемента в течение периода времени от τ до T ;

$f_4(\tau)$ – плотность распределения отказов системы из четырех элементов для момента времени τ .

В расчетной формуле необходимо определить плотность распределения

$$\begin{aligned} f_4(t) &= -\frac{P_4(t)}{dt} = \\ &= -(A(t) \cdot e^{-\lambda_1 t} + B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t}) \cdot \frac{1}{dt} = \\ &= (-A(t) \cdot e^{-\lambda_1 t}) \cdot \frac{1}{dt} + (-B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t}) \cdot \frac{1}{dt} + \\ &+ (-C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t}) \cdot \frac{1}{dt} + (-D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t}) \cdot \frac{1}{dt}. \end{aligned}$$

Рассмотрим слагаемые отдельно.

$$\begin{aligned} (-A(t) \cdot e^{-\lambda_1 t}) \cdot \frac{1}{dt} &= -(a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) \cdot e^{-\lambda_1 t} \cdot \frac{1}{dt} = \\ &= ((\lambda_1 a_0 - a_1) + (\lambda_1 a_1 - 2a_2)t + (\lambda_1 a_2 - 3a_3)t^2 + (\lambda_1 a_3) t^3) \cdot e^{-\lambda_1 t}. \end{aligned}$$

Аналогичным образом дифференцируются остальные слагаемые.

Как и ранее, результат дифференцирования представим в виде матрицы

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
	----	----	----	----
t^0	$\lambda_1 a_0 - a_1$	$\lambda_2 b_0 - b_1$	$\lambda_3 c_0 - c_1$	$\lambda_4 d_0 - d_1$
t^1	$\lambda_1 a_1 - 2a_2$	$\lambda_2 b_1 - 2b_2$	$\lambda_3 c_1 - 2c_2$	$\lambda_4 d_1 - 2d_2$
t^2	$\lambda_1 a_2 - 3a_3$	$\lambda_2 b_2 - 3b_3$	$\lambda_3 c_2 - 3c_3$	$\lambda_4 d_2 - 3d_3$
t^3	$\lambda_1 a_3$	$\lambda_2 b_3$	$\lambda_3 c_3$	$\lambda_4 d_3$

Обозначим как матрицу коэффициентов плотности распределения вероятности B

$$B = \begin{pmatrix} \lambda_1 a_0 - a_1 & \lambda_2 b_0 - b_1 & \lambda_3 c_0 - c_1 & \lambda_4 d_0 - d_1 \\ \lambda_1 a_1 - 2a_2 & \lambda_2 b_1 - 2b_2 & \lambda_3 c_1 - 2c_2 & \lambda_4 d_1 - 2d_2 \\ \lambda_1 a_2 - 3a_3 & \lambda_2 b_2 - 3b_3 & \lambda_3 c_2 - 3c_3 & \lambda_4 d_2 - 3d_3 \\ \lambda_1 a_3 & \lambda_2 b_3 & \lambda_3 c_3 & \lambda_4 d_3 \end{pmatrix}.$$

Поскольку вычисления предполагается выполнять на ЭВМ, то необходимо задать общую формулу, по которой может быть вычислен любой элемент матрицы B в зависимости от его индекса строки и столбца. Для этой цели дополним матрицу A еще одной дополнительной строкой нулей

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{pmatrix}.$$

Тогда вычисление матрицы B будет преобразовано

$$B = \begin{pmatrix} \lambda_1 a_0 - a_1 & \lambda_2 b_0 - b_1 & \lambda_3 c_0 - c_1 & \lambda_4 d_0 - d_1 \\ \lambda_1 a_1 - 2a_2 & \lambda_2 b_1 - 2b_2 & \lambda_3 c_1 - 2c_2 & \lambda_4 d_1 - 2d_2 \\ \lambda_1 a_2 - 3a_3 & \lambda_2 b_2 - 3b_3 & \lambda_3 c_2 - 3c_3 & \lambda_4 d_2 - 3d_3 \\ \lambda_1 a_3 - 4 \cdot 0 & \lambda_2 b_3 - 4 \cdot 0 & \lambda_3 c_3 - 4 \cdot 0 & \lambda_4 d_3 - 4 \cdot 0 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \lambda_1 a_0 - 1a_1 & \lambda_2 b_0 - 1b_1 & \lambda_3 c_0 - 1c_1 & \lambda_4 d_0 - 1d_1 \\ \lambda_1 a_1 - 2a_2 & \lambda_2 b_1 - 2b_2 & \lambda_3 c_1 - 2c_2 & \lambda_4 d_1 - 2d_2 \\ \lambda_1 a_2 - 3a_3 & \lambda_2 b_2 - 3b_3 & \lambda_3 c_2 - 3c_3 & \lambda_4 d_2 - 3d_3 \\ \lambda_1 a_3 - 4a_4 & \lambda_2 b_3 - 4b_4 & \lambda_3 c_3 - 4c_4 & \lambda_4 d_3 - 4d_4 \end{pmatrix},$$

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

Замечание. Аналогичный результат получается и при наличии коэффициентов a_p, b_p, c_p, d_p в соответствующих многочленах $A(t), B(t), C(t), D(t)$.

Таким образом, процесс дифференцирования принимает вид:

$$f_4(t) = -\frac{P_4(t)}{dt} = -\frac{A^T \cdot T \cdot F(\Lambda, t)^T}{dt} = B^T \cdot T \cdot F(\Lambda, t)^T;$$

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{pmatrix} \Rightarrow B = \begin{pmatrix} a_0' & b_0' & c_0' & d_0' \\ a_1' & b_1' & c_1' & d_1' \\ a_2' & b_2' & c_2' & d_2' \\ a_3' & b_3' & c_3' & d_3' \end{pmatrix}.$$

Дифференцирование заменено на вычисление коэффициентов матрицы B из матрицы A и элементов матрицы Λ , что является гораздо более простой операцией с точки зрения машинных вычислений. Общая формула для вычисления элементов матрицы B :

$$B_{i,j} = \Lambda_j \cdot A_{i,j} - i \cdot A_{i+1,j}, \quad i = 1..N, \quad j = 1..N,$$

где i – индекс строки в соответствующей матрице;

j – индекс столбца в соответствующей матрице;

N – число элементов в начальной системе.

Изменение коэффициентов при интегрировании

Следующим этапом вычислений является интегрирование:

$$\int_0^t p_5(\tau, t) f_4(\tau) d\tau =$$

$$= \int_0^t e^{-\lambda_5(t-\tau)} \cdot \left(A'(\tau) \cdot e^{-\lambda_1\tau} + B'(\tau) \cdot e^{-\lambda_2\tau} + \right. \\ \left. + C'(\tau) \cdot e^{-\lambda_3\tau} + D'(\tau) \cdot e^{-\lambda_4\tau} \right) d\tau =$$

$$= e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau +$$

$$+ e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau.$$

Возможны два принципиально различных случая: λ_5 может либо численно совпадать с одной из 4-х интенсивностей отказов, либо не совпадать. В зависимости от этого подынтегральное выражение значительно изменится.

Рассмотрим случай, когда интенсивность отказа подключаемого элемента совпадает с интенсивностью отказа одного из элемента рассматриваемой системы, например, первого.

$$\lambda_5 = \lambda_1$$

Тогда соответствующий интеграл упростится

$$e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = e^{-\lambda_1 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) d\tau =$$

$$= e^{-\lambda_1 t} \cdot \int_0^t (a_0' + a_1' \tau + a_2' \tau^2 + a_3' \tau^3) d\tau =$$

$$= \left(a_0' t + \frac{a_1'}{2} t^2 + \frac{a_2'}{3} t^3 + \frac{a_3'}{4} t^4 \right) \cdot e^{-\lambda_1 t}.$$

Остальные интегралы рассмотрим ниже.

ВБР системы из 5 элементов складывается из суммы ВБР системы из 4 элементов и результата интегрирования. Запишем, как изменятся коэффициенты в случае совпадения для одного из типов элементов (λ_1):

$$P_5(t) = P_4(t) + \int_0^t p_5(\tau, t) f_4(\tau) d\tau =$$

$$= A(t) \cdot e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau +$$

$$+ B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau +$$

$$+ C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau +$$

$$+ D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau =$$

$$= \left(a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \right) \cdot e^{-\lambda_1 t} +$$

$$+ \left(a_0' t + \frac{a_1'}{2} t^2 + \frac{a_2'}{3} t^3 + \frac{a_3'}{4} t^4 \right) \cdot e^{-\lambda_1 t} +$$

$$\begin{aligned}
 & +B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau + \\
 & +C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau + \\
 & +D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau = \\
 & = \left(a_0 + (a_1 + a_0')t + \left(a_2 + \frac{a_1'}{2} \right) t^2 + \right. \\
 & \quad \left. + \left(a_3 + \frac{a_2'}{3} \right) t^3 + \left(a_4 + \frac{a_3'}{4} \right) t^4 \right) \cdot e^{-\lambda_1 t} + \\
 & +B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau + \\
 & +C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau + \\
 & +D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau.
 \end{aligned}$$

То есть, исходная матрица A преобразуется так, что к определенным элементам матрицы добавятся определенные слагаемые

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{pmatrix} \Rightarrow A = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & d_0 \\ a_1 + a_0' & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 + \frac{a_1'}{2} & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 + \frac{a_2'}{3} & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 + \frac{a_3'}{4} & b_4 & c_4 & d_4 \end{pmatrix}.$$

Общая формула вычисления коэффициентов в совпадающей части имеет вид:

$$A_{i+1,j} = A_{i+1,j} + \frac{B_{i,j}}{i}, \text{ если } \Lambda_j = \lambda_k, i = 1..N, j = 1..N,$$

где i – индекс строки в соответствующей матрице;
 j – индекс столбца в соответствующей матрице;
 k – индекс подключаемого элемента матрицы Λ ;
 N – число элементов в начальной системе.

Рассмотрим случай, когда интенсивность отказа подключаемого элемента не совпадает ни с одной из интенсивностей отказов элементов в системе.

$$\lambda_5 \neq \lambda_1, \lambda_5 \neq \lambda_2, \lambda_5 \neq \lambda_3, \lambda_5 \neq \lambda_4.$$

Тогда взятие интеграла примет более сложный характер:

$$\begin{aligned}
 & e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_0' \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau + \\
 & + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_1' \tau \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau + \\
 & + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_2' \tau^2 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_3' \tau^3 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau.
 \end{aligned}$$

Возьмем каждый интеграл в сумме отдельно:

$$\begin{aligned}
 & \blacksquare e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_0' \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = a_0' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = \\
 & = a_0' \cdot e^{-\lambda_5 t} \left(\frac{1}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} - \frac{1}{\lambda_5 - \lambda_1} \right) = \\
 & = \frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} - \frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_5 t};
 \end{aligned}$$

$$\blacksquare e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_1' \tau \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = a_1' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t \tau \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau =$$

$$= a_1' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} - \frac{1}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} + \frac{1}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \right) =$$

$$= \frac{a_1'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t \cdot e^{-\lambda_1 t} - \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot e^{-\lambda_5 t};$$

$$\blacksquare e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_2' \tau^2 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = a_2' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t \tau^2 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau =$$

$$= a_2' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t^2 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} - \frac{2}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot t \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} + \right. \\
 \left. + \frac{2}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} - \frac{2}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \right) =$$

$$\begin{aligned}
 & = \frac{a_2'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t^2 \cdot e^{-\lambda_1 t} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot t \cdot e^{-\lambda_1 t} + \\
 & + \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \cdot e^{-\lambda_1 t} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \cdot e^{-\lambda_5 t};
 \end{aligned}$$

$$\blacksquare e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t a_3' \tau^3 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau = a_3' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t \tau^3 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau =$$

$$= a_3' \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t^3 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} - \frac{3}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot t^2 \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} + \right. \\
 \left. + \frac{6}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \cdot t \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} - \frac{6}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)t} + \frac{6}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) =$$

$$= \frac{a_3'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t^3 \cdot e^{-\lambda_1 t} - \frac{3a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \cdot t^2 \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \cdot t \cdot e^{-\lambda_1 t} -$$

$$- \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \cdot e^{-\lambda_1 t} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \cdot e^{-\lambda_5 t}.$$

Просуммируем результаты интегрирования, сгруппировав слагаемые:

$$e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau =$$

$$= \left[\left(\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} - \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) + \right.$$

$$+ \left(\frac{a_1'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \right) \cdot t +$$

$$\left. + \left(\frac{a_2'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{3a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \right) \cdot t^2 + \frac{a_3'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t^3 \right] \cdot e^{-\lambda_1 t} +$$

$$+ \left(-\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} + \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) \cdot e^{-\lambda_5 t}.$$

Интегралы с другими многочленами вычисляются аналогичным образом.

ВБР системы из 5 элементов складывается из суммы ВБР системы из 4 элементов и результата интегрирования. Запишем, как изменятся коэффициенты в случае несовпадения для одного из типов элементов (λ_1):

$$P_5(t) = P_4(t) + \int_0^t p_5(\tau, t) \cdot f_4(\tau) d\tau =$$

$$= A(t) \cdot e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t A'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_1)\tau} d\tau + B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} +$$

$$+ e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau + C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot$$

$$\int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau + D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau =$$

$$= (a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) \cdot e^{-\lambda_1 t} +$$

$$+ \left[\left(\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} - \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) + \right.$$

$$+ \left(\frac{a_1'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \right) \cdot t +$$

$$\left. + \left(\frac{a_2'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{3a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \right) \cdot t^2 + \frac{a_3'}{\lambda_5 - \lambda_1} \cdot t^3 \right] \cdot e^{-\lambda_1 t} +$$

$$+ \left(-\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} + \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) \cdot e^{-\lambda_5 t} +$$

$$+ B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau + C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot$$

$$\int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau + D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau =$$

$$= \left[\left(a_0 + \frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} - \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) + \right.$$

$$+ \left(a_1 + \frac{a_1'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} \right) \cdot t +$$

$$\left. + \left(a_2 + \frac{a_2'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{3a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} \right) \cdot t^2 + \left(a_3 + \frac{a_3'}{\lambda_5 - \lambda_1} \right) \cdot t^3 \right] \cdot e^{-\lambda_1 t} +$$

$$+ \left(-\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} + \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) \cdot e^{-\lambda_5 t} +$$

$$+ B(t) \cdot e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t B'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_2)\tau} d\tau + C(t) \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot$$

$$\int_0^t C'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_3)\tau} d\tau + D(t) \cdot e^{-\lambda_4 t} + e^{-\lambda_5 t} \cdot \int_0^t D'(\tau) \cdot e^{(\lambda_5 - \lambda_4)\tau} d\tau.$$

В результате подключения дополнительного элемента с интенсивностью отказов $\lambda_5 \neq \lambda_1$ коэффициенты при экспоненте $-\lambda_1 t$ перестроились определенным образом. При этом повышения степени многочлена $A(t)$ не произошло. Кроме того, при интегрировании сформировалось слагаемое, которое войдет в сумму коэффициента для новой экспоненты $-\lambda_5 t$. Запишем полный результат при суммировании в матричном виде:

$$P_5(t) = P_4(t) + \int_0^t p_5(\tau, t) \cdot f_4(\tau) d\tau;$$

$$P_5(t) = A^T \cdot T \cdot F(\Lambda, t)^T;$$

$$\Lambda = (\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5);$$

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

$$A = \begin{pmatrix} a_0 + \frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} - \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} + \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} - \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} & \left(-\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} + \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4} \right) + \\ & + \left(-\frac{b_0'}{\lambda_5 - \lambda_2} + \frac{b_1'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^2} - \frac{2b_2'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^3} + \frac{6b_3'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^4} \right) + \\ & + \left(-\frac{c_0'}{\lambda_5 - \lambda_3} + \frac{c_1'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^2} - \frac{2c_2'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^3} + \frac{6c_3'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^4} \right) + \\ & + \left(-\frac{d_0'}{\lambda_5 - \lambda_4} + \frac{d_1'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^2} - \frac{2d_2'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^3} + \frac{6d_3'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^4} \right) \\ & 0 \\ & 0 \\ & 0 \\ b_0 + \frac{b_0'}{\lambda_5 - \lambda_2} - \frac{b_1'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^2} + \frac{2b_2'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^3} - \frac{6b_3'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^4} & \\ b_1 + \frac{b_1'}{\lambda_5 - \lambda_2} - \frac{2b_2'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^2} + \frac{6b_3'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^3} & \\ b_2 + \frac{b_2'}{\lambda_5 - \lambda_2} - \frac{3b_3'}{(\lambda_5 - \lambda_2)^2} & \\ b_3 + \frac{b_3'}{\lambda_5 - \lambda_2} & \\ c_0 + \frac{c_0'}{\lambda_5 - \lambda_3} - \frac{c_1'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^2} + \frac{2c_2'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^3} - \frac{6c_3'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^4} & \\ c_1 + \frac{c_1'}{\lambda_5 - \lambda_3} - \frac{2c_2'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^2} + \frac{6c_3'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^3} & \\ c_2 + \frac{c_2'}{\lambda_5 - \lambda_3} - \frac{3c_3'}{(\lambda_5 - \lambda_3)^2} & \\ c_3 + \frac{c_3'}{\lambda_5 - \lambda_3} & \\ d_0 + \frac{d_0'}{\lambda_5 - \lambda_4} - \frac{d_1'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^2} + \frac{2d_2'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^3} - \frac{6d_3'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^4} & \\ d_1 + \frac{d_1'}{\lambda_5 - \lambda_4} - \frac{2d_2'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^2} + \frac{6d_3'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^3} & \\ d_2 + \frac{d_2'}{\lambda_5 - \lambda_4} - \frac{3d_3'}{(\lambda_5 - \lambda_4)^2} & \\ d_3 + \frac{d_3'}{\lambda_5 - \lambda_4} & \end{pmatrix}$$

Таким образом, процесс вычисления интеграла при подключении очередного элемента может быть сведен к преобразованию матрицы A : ее расширению и соответствующему пересчету коэффициентов. Общая формула для вычисления коэффициентов для несовпадающей части матрицы имеет вид:

$$A_{i,j} = A_{i,j} + \frac{B_{i,j}}{\Lambda_k - \Lambda_j} + \sum_{m=1}^{N-i} \frac{(-1)^m \cdot B_{i+m,j} \cdot (m+i-1)!}{(\Lambda_k - \Lambda_j)^{m+1} \cdot (i-1)!},$$

если $\Lambda_j \neq \lambda_k$, $i = 1..N$, $j = 1..N$,
где i – индекс строки в соответствующей матрице;
 j – индекс столбца в соответствующей матрице;
 k – индекс подключаемого элемента матрицы Λ ;
 N – число элементов в начальной системе.

Также необходима общая формула для слагаемых, которые в сумме составят новый коэффициент для экспоненты интенсивности отказов подключаемого элемента, то есть для формулы:

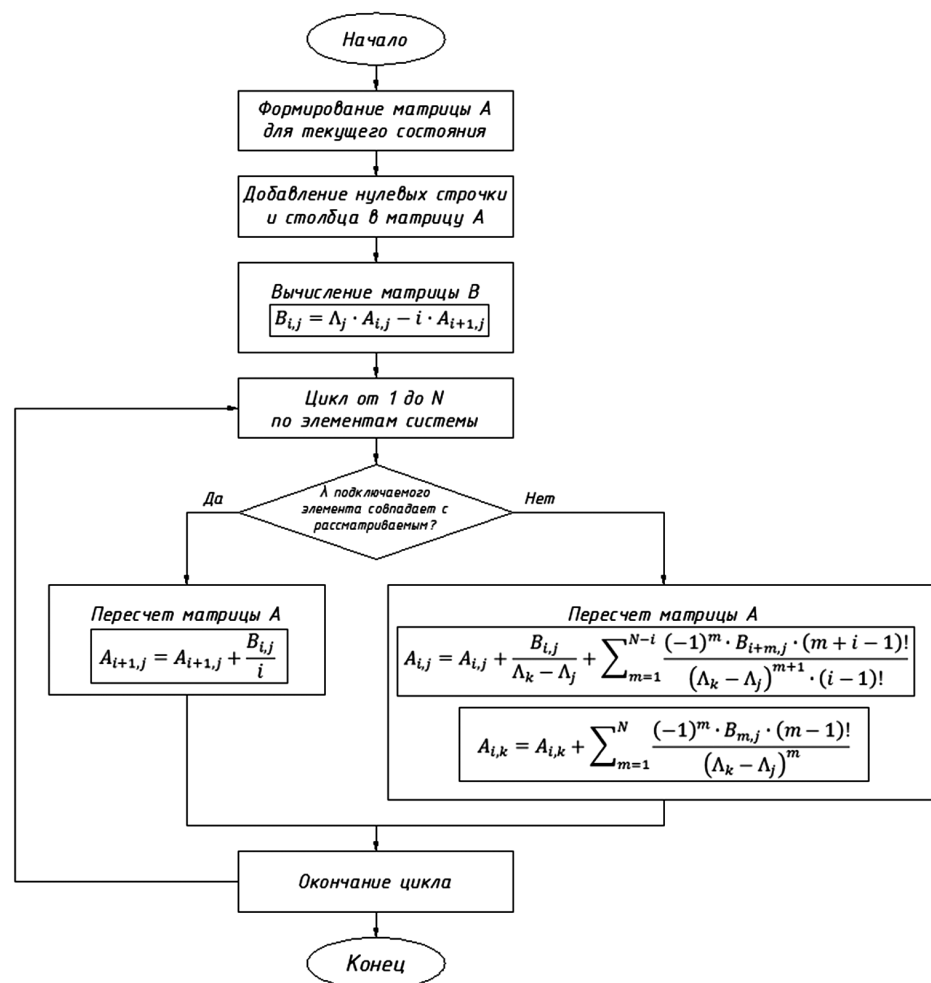
$$-\frac{a_0'}{\lambda_5 - \lambda_1} + \frac{a_1'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^2} - \frac{2a_2'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^3} + \frac{6a_3'}{(\lambda_5 - \lambda_1)^4}.$$

$$A_{i,k} = A_{i,k} + \sum_{m=1}^N \frac{(-1)^m \cdot B_{m,j} \cdot (m-1)!}{(\Lambda_k - \Lambda_j)^m},$$

если $\Lambda_j \neq \lambda_k$, $i = 1..N$, $j = 1..N$,
где i – индекс строки в соответствующей матрице;
 j – индекс столбца в соответствующей матрице;
 k – индекс подключаемого элемента матрицы Λ ;
 N – число элементов в начальной системе.

Схема алгоритма построения аналитического решения

Объединяя полученные формулы для случаев, когда подключаемый элемент совпадает или не совпадает с



Обозначения:

 i – индекс строки в соответствующей матрице; j – индекс столбца в соответствующей матрице; k – индекс подключаемого элемента матрицы Λ ; N – число элементов в начальной системе.

Рисунок – 1. Схема алгоритма построения аналитического решения

каким либо из типов элементов в исходной системе, аналитическое решение для данной итерации может быть получено по схеме, представленной на рисунке 1.

Выводы

Выведен и математически обоснован алгоритм, позволяющий в рекуррентном виде формировать аналитическое выражение для вычисления ВБР системы из любого числа элементов, находящихся в ненагруженном резерве. Процесс формирования решения состоит из пересчета коэффициентов матрицы по обобщенным формулам вместо вычислений производных и интегралов численным способом, что позволяет значительно

ускорить вычисления и повысить точность результатов. По форме представления данных алгоритм адаптирован для вычислений на ЭВМ.

Библиографический список

1. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа/ М.: ООО «Журнал «Надежность» 2012 -295с.

2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. / СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704с.

3. Кривопапов Д.М. Доклад «Особенности динамического программирования в надежности проектировании программно-технических систем космических аппаратов». Пятая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва 2017 г.

4. Кривопапов Д.М.; Юркевич Е. В. Получение функций ВБР в матричном виде для систем с ненагруженным резервированием при неоднотипных элементах // Надежность.

Сведения об авторах

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

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

Поступила 29.08.2017

Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов

Анатолий Ю. Колобов, ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина, Химки, Россия

Евгений В. Дикун, ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина, Химки, Россия



Анатолий Ю. Колобов



Евгений В. Дикун

Резюме. Цель. Большое количество изделий космической техники относится к классу единичных (уникальных) или изготавливается малыми партиями в 3 – 5 изделий. В соответствии с нормативной документацией при проведении опытно-конструкторских работ в космической отрасли требуется проводить контроль надежности продукции с получением интервальных оценок показателей надежности. Однако для уникальных космических аппаратов в единичном исполнении, доля которых в общем объеме продукции космической отрасли является заметной, получение таких оценок связано с проблемой получения статистических исходных данных. Это связано с высокой стоимостью как самого космического аппарата, так и его испытаний, что не позволяет при отработке космического аппарата испытывать большое количество образцов. В условиях существования финансовых ограничений в космической отрасли сложилась практика однократного проведения каждого из запланированных видов испытаний на одном образце. При этом опытные образцы имеют различную комплектацию и различное исполнение составных частей (габаритно-массовые макеты, тепловые аналоги и др.). В этом случае невозможно получить однородные статистические данные для подтверждения требований надежности. **Результаты.** В статье предлагается методика интервальной оценки вероятности безотказной работы единичного космического корабля по результатам летных испытаний с использованием априорной информации, полученной на этапах предъявительских и приемосдаточных испытаний. Проведено сравнение возможностей использования расчетных, экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов оценки показателей надежности космических аппаратов. В качестве исходных данных используются результаты электрорадиотехнических и термовакуумных испытаний летного образца космического аппарата. Учет результатов только электрорадиотехнических испытаний объясняется тем, что надежность космических аппаратов в первую очередь определяется надежностью радиоэлектронной аппаратуры. При этом объем испытаний (в среднем около 50 для одного космического аппарата) позволяет получить оценки с высокими достоверностью и информативностью. Методику можно использовать и на этапе эксплуатации для оценки и контроля надежности, например, по результатам годовой эксплуатации. Корректность объединения априорной информации с информацией, полученной на рассматриваемом этапе проверяется с использованием Z-критерия Фишера. **Выводы.** Предлагаемая методика позволяет получать оценки точного значения вероятности безотказной работы единичного космического аппарата, нижней доверительной границы и среднеквадратического отклонения вероятности безотказной работы на этапах предъявительских и приемосдаточных испытаний, летных испытаний и эксплуатации с использованием априорной информации. Приведен пример интервальной оценки вероятности безотказной работы единичного космического аппарата по результатам летной эксплуатации с использованием априорной информации, полученной на этапах предъявительских и приемосдаточных испытаний.

Ключевые слова: единичный космический аппарат, космический аппарат, априорная информация, интервальные оценки, вероятность безотказной работы, нижняя доверительная граница, летные испытания.

Формат цитирования: Колобов А.Ю., Дикун Е.В. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 23-26. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-23-26

Введение

Нормативная документация в области надежности требует выполнять интервальные оценки показателей надежности (ПН) технических объектов. Для большинства изделий машиностроения получение таких оценок не вызывает трудностей, так как всегда можно набрать необходимый объем статистических данных, позволяющий получить корректные оценки ПН.

Однако большое количество изделий космической техники является единичными (уникальными) или изготавливается малыми партиями в 3 – 5 изделий.

Высокая стоимость как самого КА, так и его испытаний не позволяет при отработке КА испытывать большое количество образцов. При существующих финансовых ограничениях в космической отрасли сложилась практика однократного проведения каждого из

запланированных видов испытаний на одном образце. При этом невозможно получить статистические данные для подтверждения требований надежности [1,2].

Предлагается при оценке безотказности единичных космических аппаратов применять байесовские методы с использованием априорной информации.

Сравнение методов оценки ПН

В соответствии с нормативной документацией при подтверждении надежности можно использовать расчетные, расчетно-экспериментальные и экспериментальные методы. При этом каждый метод имеет свои достоинства и недостатки.

Расчетный метод основан на использовании статистических данных об интенсивностях отказов электро-радиоизделий (ЭРИ), агрегатов, комплектующих как конкретных моделей, так и их аналогов.

Расчетному методу присущи следующие недостатки [2]:

- малая детализация структурных схем надежности радиоэлектронных приборов при большом количестве ЭРИ (количество ЭРИ в КА достигает 120000 шт.);
- использование обобщенных данных об интенсивностях отказов комплектующих элементов, а не для конкретных партий ЭРИ;
- из-за устаревания данных об интенсивностях отказов ЭРИ оценки безотказности радиоэлектронных приборов получаются заниженными, что усложняет подтверждение заданных требований к надежности изделия;
- отсутствие справочных данных о дисперсиях интенсивностях отказов составных элементов не позволяет получить интервальные оценки безотказности КА;
- оценка производится по проектной документации. При этом отсутствует привязка к конкретному объекту исследований.

Главной проблемой экспериментальных методов (расчетно-экспериментальных) является проблема с набором презентативной выборки исходных данных.

Из-за невозможности получения достаточных объемов статистических однородных данных в условиях финансовых ограничений экспериментальные методы

для подтверждения требований надежности единичных КА неприменимы.

Расчетно-экспериментальные методы хотя и имеют свои недостатки, однако освобождены от ряда перечисленных недостатков расчетного и экспериментального методов.

Методология расчетно-экспериментальной оценки ПН с учетом априорной информации

Предлагается методика поэтапного расчетно-экспериментального подтверждения вероятности безотказной работы (ВБР) единичных КА с учетом априорной информации.

Алгоритм поэтапной оценки и контроля надежности с учетом априорной информации единичных КА представлен на рисунке 1. При оценке ВБР по этой методике на каждом этапе оценок используются оценки, полученные на предыдущем этапе. То есть используются оценки по объединенной информации. Корректность такого объединения данных оценивается по Z-критерию Фишера.

В качестве априорной информации для этапа летных испытаний (ЛИ) используются оценки показателя надежности, полученные на этапах предъявительских (ПРИ) и приемо-сдаточных (ПСИ) испытаний КА. При этом в качестве исходной информации для определения ВБР и ее среднеквадратического отклонения используется информация о результатах электрорадиотехнических испытаний (включая испытания в вакууме) КА на этапах ПРИ и ПСИ.

Учет результатов только электрорадиотехнических испытаний объясняется тем, что надежность сложных технических систем, эксплуатируемых в жестких условиях (таких как КА), в первую очередь определяется надежностью радиоэлектронной аппаратуры. При этом объем испытаний (в среднем около 50 для одного КА) позволяет получить оценки с высокими достоверностью и информативностью.

Неисправностями, приводящими к отказу КА, считаются неисправности:

- вызвавшие полную потерю работоспособности КА;

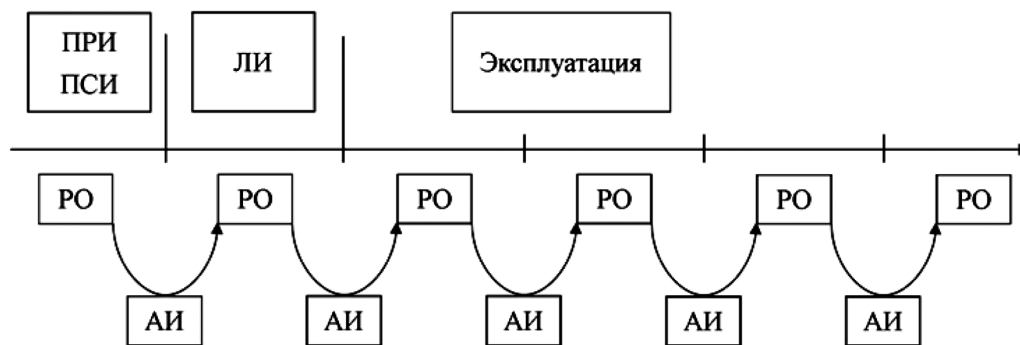


Рисунок – 1. Алгоритм поэтапной оценки и контроля надежности
ПРИ – предъявительские испытания; ПСИ – приемо-сдаточные испытания; ЛИ – летные испытания;
РО – результаты оценок; АИ – априорная информация

- обусловленные выходом основных эксплуатационных параметров за пределы допусков, установленных в технических условиях (ТУ).

В случае одновременного обнаружения нескольких неисправностей при оценке надежности, они учитываются как один отказ. Не допускается рассматривать как одну неисправность неоднократно повторяющиеся неисправности КА по вине одного и того же элемента.

Случайные сбои программного обеспечения рассматриваются как самоустраняющиеся нарушения работоспособности КА и в расчетах не учитываются.

Незачетными считаются следующие отказы:

- возникшие в результате действия другого отказа;
- обусловленные окончанием расходных материалов за пределами, установленными ТУ;
- вызванные нарушениями Инструкций по эксплуатации;
- вызванные воздействием внешних факторов, не предусмотренных ТУ на изделие;
- связанные с проведением различных экспериментов и обусловленные увеличением интенсивности внешних воздействий по сравнению с условиями, заданными в ТУ;
- обусловленные эффектом старения.

Оценка ПН по результатам n испытаний на этапах ПРИ и ПСИ

Определение вероятности безотказной работы (ВБР) КА P_0 и её среднеквадратического отклонения (СКО) σ_{P_0} по результатам n испытаний на этапах ПРИ и ПСИ осуществляется по следующим формулам [3]

$$\hat{P}_0 = 1 - \frac{1}{2(n+2)};$$

$$\sigma_{P_0} = \frac{1}{2(n+2)} \sqrt{\frac{5n+7}{n+3}}.$$

При наличии зачетных отказов в ходе испытаний ($m \neq 0$) оценку надежности выполняют по формулам [4]

$$\hat{P}_0 = 1 - \frac{m}{n};$$

$$\sigma_{P_0} = \sqrt{\frac{\hat{P}_0(1-\hat{P}_0)}{n}}.$$

Нижнюю доверительную границу P_n для ВБР при заданной доверительной вероятности γ можно определить как

$$\underline{P} = \hat{P}_0 - t_p \cdot \sigma_{P_0},$$

где t_p – квантиль распределения Стьюдента для γ и n .

Оценка вероятности безотказной работы КА на этапе ЛИ

С учетом предварительной информации, полученной на этапах ПРИ и ПСИ, точечное значение ВБР КА $\hat{P}$ и её среднее квадратическое отклонение σ_P вычисляются по формулам:

$$\hat{P} = \hat{P}_0 + K_0 K_b |\hat{P}_1 - \hat{P}_0|;$$

$$\sigma_P = \sqrt{(K_0 K_b)^2 \sigma_{P_1}^2 + (1 - K_0 K_b)^2 \sigma_{P_0}^2};$$

$$K_0 = 1 - (\Phi(Z));$$

$$K_b = \frac{\sigma_{P_0}^2}{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_0}^2},$$

где $\hat{P}$ и σ_P – значение ВБР КА и её СКО, определяемое по результатам ЛИ с учетом предварительной информации;

$\hat{P}_1$ и σ_{P_1} – значения ВБР и её СКО, вычисленные по результатам ЛИ без учета предварительной информации;

$\hat{P}_0$ и σ_{P_0} – значения ВБР и её СКО, вычисленные с учетом только предварительной информации;

$\Phi(Z)$ – табличная функция нормального распределения [6];

Z – Z -критерий Фишера:

$$Z = \frac{|\hat{P}_1 - \hat{P}_0|}{\sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_0}^2}}.$$

Статистическая однородность предварительной информации и результатов ЛИ, а также возможность получения корректной объединенной оценки ВБР, оценивается по Z -критерию Фишера. Проверяется выполнение условия $Z \leq 1,6$.

Нижняя доверительная граница ПН с доверительной вероятностью γ определяется как

$$\underline{P} = \hat{P} - t_p \sigma_P.$$

В качестве предварительной информации для этапа ЛИ используются оценки показателя надежности, полученные на этапах ПРИ и ПСИ космического аппарата, т.е. значения $\hat{P}_0$ и σ_{P_0} .

Оценка ВБР КА на этапе ЛИ без учета предварительной информации

Оценки ПН в соответствии с производятся по следующим формулам

$$\hat{P}_1 = \frac{n^* - m + 1}{n^* + 2};$$

$$\sigma_{P_1}^2 = \frac{n^* \hat{P}_1 (1 - \hat{P}_1) + n^* + 1}{(n^* + 3)(n^* + 2)^2},$$

где m – количество зачетных отказов за время наблюдения.

n^* – эквивалентное количество наблюдаемых КА:

$$n^* = \frac{24KN + \sum_{i=1}^N t_i (1 - K)}{365 [24K + t_{mp} (1 - K)]},$$

где N – количество суток, отработанных КА;

t_i – продолжительность выполнения целевой задачи КА в i -ые сутки;

t_{mp} – заданная средняя продолжительность выполнения целевой задачи в течение суток;

$$K = \frac{t_{mp}}{24 - t_{mp}}.$$

На последующих контрольных этапах ПН оценка ПН производится по схеме, представленной на рисунке 1. При этом в качестве априорной информации принимается оценка на предыдущем этапе.

Пример. В ходе электрорадиотехнических испытаний КА на этапах ПРИ и ПСИ было проведено 47 сеансов. В ходе 7 сеансов были зафиксированы отказы.

Длительность ЛИ – 180 суток. В течение суток КА в среднем выполнял целевую задачу в течение 5 час.

Решение. Для этапа ПРИ и ПСИ

$$\hat{P}_0 = 1 - \frac{7}{47} = 0,85, \sigma_{P_0}^2 = \frac{0,85(1 - 0,85)}{47} = 0,0027.$$

При $\gamma=0,9$ $\underline{P} = 0,85 - 1,68 \cdot \sqrt{0,0027} = 0,76$.

Для этапа ЛИ без учета априорной информации

$$K = \frac{5}{24 - 5} = 0,263,$$

$$n^* = \frac{180 [24 \cdot 0,263 + 5(1 - 0,263)]}{365 [24 \cdot 0,263 + 5(1 - 0,263)]} = 0,49.$$

Для этапа ЛИ с учетом априорной информации

$$Z = \frac{|0,5984 - 0,85|}{\sqrt{0,0027 + 0,071}} = 0,92671,6, \Phi(Z) = 0,822;$$

$$K_0 = 1 - 0,822 = 0,178; K_b = \frac{0,0027}{0,0027 + 0,071} = 0,0366;$$

$$\hat{P} = 0,85 + 0,178 \cdot 0,0366 \cdot 0,256 = 0,8516;$$

$$\sigma_P = \sqrt{(0,178 \cdot 0,0366)^2 \cdot 0,2664 + \frac{0,0027}{(1 - 0,178 \cdot 0,0366)^2 \cdot 0,0027}} = 0,0517.$$

При $\gamma=0,9$ и $n=1$ квантиль распределения Стьюдента $t_m = 6,314$.

Нижняя граница ВБР КА при доверительной вероятности $\gamma=0,9$ по результатам ЛИ

$$\underline{P} = 0,8516 - 6,314 \cdot 0,0517 = 0,5251.$$

Библиографический список

1. Колобов А.Ю., Дикун Е.В. Обеспечение надежности КА длительного функционирования // Системные проблемы высокой надёжности, математического моделирования и инновационных технологий изделий ответственного назначения (ИННОВАТИКА-2015) / Труды международной конференции и Российской научной школы. Часть 1 – М. 2015 – С.16-18.

2. Колобов А.Ю., Корчагин Е.Н. Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надежности КА длительного функционирования // Труды международной конференции и Российской научной школы ИННОВАТИКА-2014. Часть 1 – М.

3. Дикун Е.В., Колобов А.Ю., Бодров А.В. Оценка надежности разгонного блока «Фрегат» // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – ISSN 2310-0818. – 2016. Том 4, №3. С.73-77. (<http://industrial-engineering.ru/issues/2016/2016-3-13.pdf>)

4. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / В.С. Авдеевский и др. – М.: Машиностроение, 1989. Т.6.

5. Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг. Учёт априорной информации при оценке надёжности пиротехнических систем управления по выборочным испытаниям // Вестник Санкт-Петербургского института Государственной противопожарной службы. – 2005 №3 [10]. – С. 85-87.

6. Волков Л.И., Шишкевич А.М. / Надежность летательных аппаратов. – М., «Высш. Школа», 1975. – 296 с.

7. Лукин В. Л., Сухорученков Б.И. Способ контроля вероятности безотказной работы технических систем по результатам испытаний с учетом возможных дефектов // Двойные технологии – 2014. – №2.

Сведения об авторах

Анатолий Ю. Колобов, кандидат технических наук, доцент, главный специалист ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина, Химки, Россия, e-mail: kolobov@laspace.ru

Евгений В. Дикун, заместитель начальника отдела ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Химки, Россия, e-mail: dev@laspace.ru

Поступила 03.08.2017

Соглашение об уровне обслуживания и надежность

Виктор А. Нетес, Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ), Москва, Россия



Виктор А. Нетес

Резюме. Соглашение об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA) – эффективный и апробированный инструмент регулирования взаимоотношений между поставщиком и потребителем услуг, направленный на обеспечение качества услуг. Такие соглашения хорошо известны и успешно используются в отраслях информационных и коммуникационных технологий. Их применение целесообразно и в других областях. Суть SLA состоит в том, что в нем устанавливаются определенные требования к уровню обслуживания, выполнение которых гарантируется поставщиком услуг. При нарушении SLA поставщик услуг обычно несет материальную ответственность. Как правило, в таких случаях потребителю предоставляется компенсация в виде скидки на обслуживание в следующем расчетном периоде. Важное место в SLA занимают требования к надежности. Цель статьи – ознакомить широкий круг специалистов разных отраслей с общими вопросами применения SLA и особенностями задания в них требований к надежности. В статье указаны действующие в этой области документы международных организаций по стандартизации (МСЭ, ИСО/МЭК, ETSI, TMForum) и российские стандарты. Даются рекомендации по выбору включаемых в SLA показателей надежности и нормативов для них, а также по определению размеров компенсаций, выплачиваемых поставщиками услуг потребителям в случаях нарушения требований к коэффициенту готовности. В качестве основного показателя надежности в SLA обычно используется коэффициент готовности, определяющий допустимое суммарное время неработоспособности за установленный расчетный период (например, месяц). Помимо этого клиенту бывает важно ограничить и продолжительность каждого отдельного простоя. С этой целью может задаваться также гарантированное время восстановления, превышение которого будет считаться нарушением SLA. Выбор нормативных значений для включения в SLA представляет собой поиск компромисса между желанием удовлетворить требования пользователей и опередить конкурентов, с одной стороны, и необходимостью обеспечить реальную достижимость взятых на себя обязательств и минимизировать риск нарушений SLA, влекущих финансовые и репутационные потери, с другой. Поэтому прежде чем предлагать своим клиентам SLA, поставщик услуг должен тщательно проанализировать свои реальные возможности, чтобы убедиться, что вероятность нарушения требований, включаемых в SLA, достаточно мала. Для ее оценки предлагается применение расчетного или расчетно-экспериментального методов. Размер компенсации при нарушении зависит от его серьезности, т.е. разницы между реально достигнутым и нормативным значениями показателя. На практике эта зависимость обычно выражается ступенчатой (кусочно-постоянной) функцией. Предложена формула, выражающая теоретическую зависимость относительного размера компенсации за нарушение требования к коэффициенту готовности от серьезности нарушения и от нормативного уровня этого показателя. Она может использоваться для определения технически обоснованного ориентира при выработке и оценке условий SLA, знание которого будет полезно как поставщикам, так и потребителям услуг.

Ключевые слова: соглашение об уровне обслуживания, стандарты, показатели надежности, готовность, компенсация.

Формат цитирования: Нетес В.А. Соглашение об уровне обслуживания и надежность // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 27-30. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-27-30

Соглашение об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA) – инструмент регулирования взаимоотношений между поставщиком и потребителем услуг, направленный на обеспечение качества услуг. Такие соглашения хорошо известны и успешно используются в отраслях информационных и коммуникационных технологий (ИКТ). Суть SLA состоит в том, что в нем устанавливаются определенные требования к качеству обслуживания, выполнение которых гарантируется поставщиком (провайдером) услуг. В их числе, как правило, фигурируют и требования к надежности.

Применению SLA в ИКТ посвящено множество публикаций (в частности, несколько статей автора [1–6]). Однако подобные соглашения могут применяться не только в ИКТ, но и в других областях. В частности, в [7] указана целесообразность их использования в сфере ЖКХ, в [8] – для услуг электроснабжения. Тем не менее, в целом за пределами ИКТ SLA малоизвестны.

Целью настоящей статьи является ознакомление широкого круга специалистов разных отраслей с общими вопросами применения SLA, действующими в этой области международными и российскими нормативными

документами, особенностями задания в SLA требований к надежности. В частности, даются рекомендации по выбору включаемых в SLA показателей надежности и нормативов для них, а также по определению размеров компенсаций, выплачиваемых поставщиками услуг потребителям в случаях нарушения установленных требований.

Применению SLA в телекоммуникациях посвящены следующие документы отраслевых международных организаций: Рекомендации Международного союза электросвязи (International Telecommunications Union, ITU) E.860 [9] и M.3342 [10], руководство Европейского института стандартов электросвязи (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) EG 202 009-3 [11], руководство ТМ Форума (TM Forum, ранее TeleManagement Forum) GB917 [12]. С использованием этих документов и изложенных в [2] соображений был разработан российский стандарт [13].

В области информационных технологий (ИТ) широкое распространение получила так называемая библиотека инфраструктуры ИТ (Information Technology Infrastructure Library, ITIL). Она была создана во второй половине 1980-х годов по заказу правительства Великобритании и описывает лучшие из применяемых на практике способов организации работы подразделений или компаний, занимающихся предоставлением услуг в области ИТ. Использованный при этом процессный подход соответствует стандартам серии ИСО 9000. В семи томах библиотеки описан весь набор процессов, необходимых для обеспечения качества ИТ-сервисов и удовлетворенности их пользователей. В их числе и применение SLA.

На основе ITIL был разработан британский стандарт BSI 15000, который затем почти без изменений был принят как международный стандарт ISO/IEC 20000. Этот стандарт состоит из несколько частей, для первых двух из которых имеются идентичные российские стандарты [14, 15] ([15] является переводом версии стандарта ISO/IEC 2005 года, замененной в 2012 году на новую).

К сожалению, к стандартам [14, 15] можно сделать ряд терминологических замечаний. Во-первых, они не вполне согласованы между собой, что видно даже по их названиям: в [14] словосочетание *service management* переведено как «управление услугами», а в [15] – «менеджмент услуг». Во-вторых, в них SLA названо по-русски «соглашение об уровне услуги», что представляется менее логичным и не совпадает с ранее принятым в области телекоммуникаций термином, закрепленным стандартом [13]. Попутно отметим, что в некоторых публикациях для SLA используется и третий вариант перевода: *соглашение об уровне сервиса*. Еще один терминологический недостаток [14, 15] будет рассмотрен ниже.

Как уже отмечалось, в состав SLA обычно включаются требования к надежности. Здесь надо обратить внимание на определенную нестыковку: SLA посвящены услугам, а надежность в отечественном [16] и между-

народном [17] стандартах определяется как свойство технического объекта. Мнение о том, что в современных условиях понятие «надежность» стоит распространить и на услуги, уже не раз высказывалось (см., например, [18]). О надежности услуг фактически говорится в стандарте ISO/IEC 20000 и в ряде Рекомендаций ITU, в нашей стране официально определены показатели надежности услуг по транспортировке газа [19].

Однако, оставаясь в рамках действующих стандартов, мы должны, рассматривая надежность, привязываться к какому-либо объекту. Выход из этой ситуации был предложен в [20], и он состоит в следующем. Для каждой услуги выделяется так называемый контур обслуживания – совокупность технических средств, участвующих в оказании данной услуги. Именно он и представляет собой объект, надежность которого следует рассматривать. Заметим, что это не есть чисто формальный прием, поскольку выделение контура обслуживания все равно нужно, в частности, для расчета надежности на этапе проектирования.

Основным показателем надежности, используемым в SLA, является коэффициент готовности (K_r). Его можно рассматривать, как долю времени работоспособности в течение периода оценки. Пусть, например, установлено нормативное значение $K_{rn} = 0,995$, а период оценки составляет месяц (30 дней). Тогда допустимое время простоя (неработоспособности) за месяц составит $30 \cdot 24 \cdot (1 - 0,995) \text{ ч} = 3,6 \text{ ч}$. Таким образом, если суммарное время простоя за месяц не превышает 3,6 ч, то установленное в SLA требование к коэффициенту готовности считается выполненным, если же оно больше этого значения, то имеет место нарушение SLA.

При этом из рассмотрения обычно исключаются заранее запланированные периоды, предназначенные для выполнения профилактических работ, измерений, переключений, обновления ПО и т.п. Это соответствует определению коэффициента готовности [16], в примечании к которому специально сказано, что из рассмотрения могут исключаться планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Это обстоятельство следует иметь в виду при составлении SLA, оговаривая в нем частоту и длительность таких плановых перерывов в работе.

Говоря о коэффициенте готовности, следует обратить внимание на еще одну терминологическую нестыковку. Во многих публикациях на русском языке соответствующий английский термин *availability* ошибочно переводится словом «доступность». В общей лексике такой перевод вполне возможен, однако в теории надежности в качестве русского эквивалента этого термина давно уже закреплены термины «готовность» применительно к свойству и «коэффициент готовности» для показателя (правда, свойство «готовность» ранее в явном виде отсутствовало в наших терминологических стандартах, что, возможно, и послужило одной из причин указанной ошибки). Кроме того, в телекоммуникациях известен также английский термин *accessibility*, который никак

иначе как «доступность» на русский язык перевести нельзя, наличие же для двух разных понятий одинакового термина ведет к путанице. Подробно это терминологическое недоразумение рассмотрено в [21].

К сожалению, термин «доступность» использован и в стандартах [14, 15]. Попутно можно высказать упрек и разработчикам стандарта ISO/IEC 20000, в котором следовало бы не придумывать собственное определение понятия «готовность» (availability), а использовать, как это предписывают правила стандартизации, определение из международного терминологического стандарта по надежности со ссылкой на него (на момент разработки ISO/IEC 20000 таким стандартом был IEC 60050-191:1990 – предшественник [17]).

Помимо суммарного времени простоя, характеризующего готовность, клиенту часто важно ограничить и продолжительность каждого отдельного простоя. С этой целью может задаваться гарантированное время восстановления, превышение которого также считается нарушением SLA. Подчас для ограничения длительности простоев предлагается использовать среднее время восстановления, однако этот показатель имеет серьезный недостаток, присущий многим средним характеристикам: длительный простой может быть скомпенсирован большим числом коротких. Более того, нормирование среднего времени восстановления может спровоцировать поставщика услуг специально устроить несколько коротких перерывов для подобной компенсации уже происшедшего длительного простоя. На нежелательность использования среднего времени восстановления в качестве нормируемого показателя надежности указывалось в [22].

Примерный алгоритм выбора нормативных значений для включения в SLA был дан в [2]. Решение этой задачи представляет собой поиск компромисса между двумя противоположными устремлениями. С одной стороны, желание удовлетворить требования пользователей и опередить конкурентов подталкивает поставщиков услуг к установлению высоких норм, с другой стороны, необходимо обеспечить реальную достижимость взятых на себя обязательств и минимизировать риск нарушений SLA, влекущих финансовые и репутационные потери.

Поэтому прежде чем предлагать своим клиентам SLA, поставщик услуг должен тщательно проанализировать свои реальные возможности. При этом важно иметь возможность оценить вероятность или частоту нарушений каждого требования, которое предполагается включить в SLA, чтобы убедиться, что она достаточно мала. Если же эти характеристики оказываются неприемлемыми, то придется или ослабить требования, или предпринять меры по повышению надежности. Поскольку в хорошо работающей системе отказы возникают достаточно редко, прямая экспериментальная оценка вероятности нарушений может потребовать слишком много времени. Поэтому в этом случае целесообразно применение расчетных или расчетно-экспериментальных оценок, для чего могут использоваться предложенные в [3] соотношения.

За выполнение установленных в SLA требований обычно предусматривается материальная ответственность. Как правило, в случае нарушения потребителю предоставляется компенсация в виде скидки на обслуживание в следующем расчетном периоде. Ее размер тем больше, чем серьезней нарушение, т.е. чем больше отличается реально достигнутое значение показателя от нормативного. На практике зависимость размера компенсации от серьезности нарушения обычно выражается ступенчатой (кусочно-постоянной) функцией. Скажем, в руководстве [9] приведен такой пример: если разница между нормативным и реальным значениями коэффициента готовности, выраженными в процентах, менее 2 %, то скидка составит 15 % от тарифа, если эта разница от 2 до 4 %, скидка будет 30 %, при разнице более 4 % скидка достигнет 50 %.

Размеры компенсаций, предусмотренные в применяемых на практике SLA, существенно различаются у разных поставщиков услуг (конкретные примеры для услуг связи приведены в [2]). В значительной мере они определяются маркетинговой политикой и рыночной конъюнктурой. Тем не менее, полезно иметь возможность определить технически обоснованные размеры компенсаций, которые могли бы служить ориентирами при выработке и оценке условий SLA. Их знание будет полезно как поставщикам, так и потребителям услуг. В [4] выведена формула, выражающая зависимость размера компенсации за нарушение требований к готовности от серьезности нарушения и от нормативного уровня готовности, которая может быть представлена в следующем виде:

$$p = [1 - \log(1 - K_r) / \log(1 - K_{rn})] \cdot 100\%,$$

где p – относительная скидка в процентах, K_r и K_{rn} – реально полученное и нормативное значения коэффициента готовности ($0 < K_r \leq K_{rn} < 1$), логарифмы могут быть взяты по любому основанию. Например, если $K_{rn} = 0,99$, а $K_r = 0,98$, то $p = 15\%$.

В заключение сформулируем основные выводы:

SLA являются эффективным и апробированным инструментом регулирования отношений между поставщиками и потребителями услуг, направленным на обеспечение качества услуг. Порядок их применения установлен в ряде международных и российских стандартов.

Суть SLA состоит в том, что в нем устанавливаются определенные требования к уровню обслуживания, выполнение которых гарантируется поставщиком услуг. В случаях нарушения этих требований поставщик услуг несет материальную ответственность.

Важное место в SLA занимают требования к надежности. В качестве основного показателя надежности обычно используется коэффициент готовности, определяющий допустимое суммарное время простоя за установленный период оценки. В дополнение к нему может задаваться гарантированное время восстановления.

Предложенная в статье формула, выражающая зависимость относительного размера компенсации за нарушение требования к готовности от серьезности нарушения и от нормативного уровня готовности, может использоваться в качестве технически обоснованного ориентира при выработке и оценке условий SLA.

Библиографический список

1. Нетес В.А. Соглашения об уровне обслуживания при аренде цифровых каналов // Сети и системы связи. 2000. № 11. С. 86–91.
2. Нетес В.А. Соглашения об уровне обслуживания: стандарты и реалии // Вестник связи. 2003. № 8. С. 72–79.
3. Нетес В.А. Задание требований по надежности в соглашениях об уровне обслуживания // Электросвязь. 2004. № 4. С. 37–39.
4. Нетес В.А. Размеры штрафов за нарушения требований к готовности в SLA // Электросвязь. 2008. № 3. С. 37–40.
5. Нетес В.А. SLA для VPN // Вестник связи. 2011. № 4. С. 26–29.
6. Нетес В.А. Что нужно для успешного применения SLA // T-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 7. С. 16–20.
7. Зеленцов Л.Б., Жерневский К.В., Рыльков В.И. Управление предоставлением и поддержкой сервисов в ЖКХ // Экономические науки. 2010. № 1. С. 329–333.
8. Крупский А.В. Комплексный маркетинг энергосбытовой компании на основе согласованного уровня предоставления услуг и анализа клиентской рентабельности // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-2. С. 424–428.
9. ITU-T Recommendation E.860 (06/2002). Framework of a service level agreement.
10. ITU-T Recommendation M.3342 (07/2006). Guidelines for the definition of SLA representation templates.
11. EG 202009-3. User Group; Quality of telecom services; Part 3: Template for Service Level Agreements (SLA). 2007.
12. TM Forum GB917. SLA Management Handbook. Rel. 3.1, v. 1.2. 2012.
13. ГОСТ Р 55389–2012. Система национальных стандартов в области качества услуг связи. Соглашение об уровне обслуживания (SLA).
14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-1–2013. Информационная технология. Управление услугами. Часть 1. Требования к системе управления услугами.
15. ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-2–2010. Информационная технология. Менеджмент услуг. Часть 2. Кодекс практической деятельности.
16. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения.
17. IEC 60050-192:2015. International electrotechnical vocabulary – Part 192: Dependability.
18. Шубинский И.Б. От главного редактора // Надежность. 2015. № 1. С. 3–4.
19. Правила определения показателей надежности и качества услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям. Утверждены постановлением Правительства РФ от 18.10.2014 № 1074.
20. Нетес В.А. Виртуализация, облачные услуги и надежность // Вестник связи. 2016. № 8. С. 7–9.
21. Нетес В.А. Готовность и доступность – почувствуйте разницу // Вестник связи. 2005. № 8. С. 22–26.
22. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. – М.: Радио и связь, 1981. – 176 с.

Сведения об авторах

Виктор А. Нетес – доктор технических наук, профессор, Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ), Москва, Россия, e-mail: vicnet@yandex.ru

Поступила 09.06.2017

Исследование эксплуатационной надежности систем автомобиля *Lada Kalina*, влияющих на безопасность дорожного движения

Илья В. Денисов, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия

Алексей А. Смирнов, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия



Илья В. Денисов



Алексей А.
Смирнов

Резюме. Рост уровня автомобилизации населения Российской Федерации способствует вовлечению в транспортный процесс большого количества автотранспортных средств с различными эксплуатационными свойствами, к одним из которых относится надежность, являющаяся ключевой характеристикой качества. Эксплуатация транспортной машины является главной проверкой ее надежности, показатели которой зависят от принятых инженером конструктивных решений и технологии производства изделия. Ошибки проектирования и несоответствия выполнения технологических процессов на различных этапах изготовления автомобильной техники существенно влияют на показатели надежности. Необходимо отметить, что автотранспортное средство является источником повышенной опасности. Линейный отказ транспортной машины в процессе выполнения работы, вызванный производственными дефектами или нарушениями условий эксплуатации, может стать причиной возникновения аварийной ситуации. Поэтому крайне важно обладать сведениями о реализуемых показателях безотказности систем, влияющих на активную безопасность транспортной машины. В этой связи вопросы исследования надежности автомобильной техники в эксплуатации являются актуальной научной задачей, решение которой позволит управлять техническим состоянием машин и обеспечить безопасность транспортного процесса. **Цель** настоящего исследования состояла в оценке уровня эксплуатационной надежности систем, непосредственно влияющих на безопасность дорожного движения автомобиля *Lada Kalina*, для последующего использования полученных сведений при разработке автоматизированной системы управления техническим состоянием автомобильной техники в эксплуатации. **Методы** исследования базируются на теоретических основах технической эксплуатации автомобилей, теории вероятностей и математической статистике, теории планирования эксперимента. Применялись стандартные методики обработки статистической информации об эксплуатационной надежности транспортных машин, полученные на базе официальных дилеров ОАО «АвтоВАЗ» во Владимирской области. В результате исследования эксплуатационной надежности систем, непосредственно влияющих на безопасность дорожного движения автомобиля *Lada Kalina*, выявлена номенклатура дефектных элементов в рулевом управлении, тормозной системе, ходовой части и средств освещения и сигнализации. Установлены наработки на отказ деталей, узлов и агрегатов, лимитирующих надежность транспортных машин, а также основные числовые характеристики их распределения. Выявленные на малых наработках дефекты свидетельствуют о наличии конструктивных просчетов и несовершенстве технологий производства автотранспортного средства *Lada Kalina*. **Выводы:** В настоящей статье авторами представлены результаты исследования дефектов систем автомобиля *Lada Kalina*, непосредственно влияющих на безопасность дорожного движения. Данная информация получена путем анализа отказов автотранспортных средств в гарантийный период эксплуатации, зарегистрированных на основании обращений автовладельцев на предприятия сервисно-сбытовой сети ОАО «АвтоВАЗ» во Владимирской области. На предприятиях автомобильного сервиса следует учитывать представленную в настоящей работе номенклатуру наименее надежных элементов систем автомобиля, непосредственно влияющих на безопасность дорожного движения, при выполнении контрольно-диагностических воздействий планового технического обслуживания. Заводу-изготовителю необходимо обратить внимание на указанные дефекты и разработать план мероприятий по их устранению, а также своевременно информировать потребителя об обнаруженных гарантийных дефектах и проводить отзывные кампании.

Ключевые слова: автомобиль, *Lada Kalina*, ВАЗ-1118, надежность, рулевое управление, тормозная система, ходовая часть, система освещения, дефекты, гарантийный период.

Формат цитирования: Денисов И.В., Смирнов А.А. Исследование эксплуатационной надежности систем автомобиля *Lada Kalina*, влияющих на безопасность дорожного движения // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 31-35. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-31-35

Введение

Обзор современных научных публикаций [1] свидетельствует о том, что в настоящее время технические неисправности автомобиля являются причиной 20-25% дорожно-транспортных происшествий (ДТП) от общего их количества. Отказы тормозного и рулевого управлений, ходовой части, средств освещения и сигнализации транспортных машин снижают их безопасность и способствуют высокому риску аварийных ситуаций, повлекших за собой ДТП.

В эксплуатации крайне важно владеть сведениями о надежности элементов указанных систем, поскольку появляется возможность управлять их техническим состоянием. Разработка системы управления технической готовностью транспортных машин ведется ведущими вузами страны и научно-исследовательскими институтами отрасли автомобильного транспорта в тесном сотрудничестве с изготовителями продукции, эксплуатационными и ремонтными предприятиями, которые осуществляют сбор и анализ первичной информации об отказах узлов и агрегатов автотранспортных средств (АТС).

В рамках разрабатываемой автоматизированной системы управления техническим состоянием [2, 3, 4] автомобильной техники в эксплуатации была поставлена задача оценить уровень эксплуатационной надежности автомобиля *Lada Kalina*. Исследования проводились на базе официальных дилеров ОАО «АвтоВАЗ» во Владимирской области. В настоящей работе представлены результаты решения поставленной задачи.

Результаты исследования эксплуатационной надежности *Lada Kalina*. Из диаграммы рисунка 1, иллюстрирующей массовые дефекты рулевого управления (РУ) автомобиля, и таблицы 1 видно, что недопустимые перемещения рейки рулевого механизма, связанные с увеличенными зазорами в зацеплении, составляют наибольшую долю отказов. Их устранение в гарантийный период осуществляют преимущественно регулировкой зацепления зубчатой передачи, в противном случае механизм заменяют новым. Стук карданного вала РУ вызван люфтами в игольчатых подшипниках карданных шарниров.

Отказы электромеханического усилителя РУ (ЭМУ РУ) составляют седьмую часть всех дефектов системы. Узел является мехатронным и имеет сложную конструкцию, поэтому диагностирование его технического состояния отличается повышенной трудоемкостью и требует использования специальных методик и средств [5]. Дефектные ЭМУ РУ в эксплуатации имели некорректное функционирование, связанное с самопроизвольным отклонением рулевого колеса и уводом автомобиля с прямолинейной траектории, а также снижением максимально развиваемого компенсирующего момента.

Дефект соединителя с вращающимся устройством, обеспечивающим электрическое соединение подушки безопасности и выключателя звукового сигнала со жгутом проводов панели приборов, вызван переломом спирального кабеля. В этом случае наблюдается снижение пассивной безопасности автомобиля, вследствие отказа подушки безопасности.

Таблица 1 – Массовые дефекты рулевого управления автомобиля *Lada Kalina*

№ п/п	Наименование дефекта	Количество	$\bar{X}$, тыс. км	v	σ
1	Завышено перемещение рейки относительно картера	40	17,5	0,68	11,9
2	Стук карданного вала рулевого управления	38	18,7	0,68	12,8
3	Не работает электромеханический усилитель рулевого управления	26	21,2	0,64	13,5
4	Дефект соединителя с вращающимся устройством	21	16,6	0,77	12,7
5	Не выдержан размер левого поворотного кулака	19	18,6	0,58	10,8
6	Не выдержан зазор в паре упор-рейка	12	15,0	0,94	14,2
7	Разрыв чехла рейки рулевого механизма	12	22,9	0,61	14,1
8	Дефект кожуха рулевой колонки	11	6,9	0,82	5,7

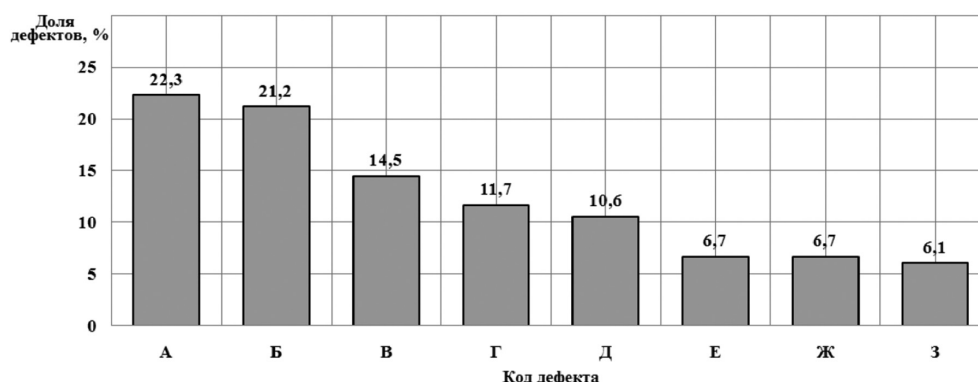


Рисунок – 1. Дефекты рулевого управления автомобиля *Lada Kalina*:

А – Завышено перемещение рейки относительно картера; Б – Стук карданного вала РУ; В – Не работает электромеханический усилитель РУ; Г – Дефект соединителя с вращающимся устройством; Д – Не выдержан размер левого поворотного кулака; Е – Не выдержан зазор в паре упор-рейка; Ж – Разрыв чехла рейки рулевого механизма; З – Дефект кожуха рулевой колонки

Прочие отказы РУ *Lada Kalina* связаны с дефектами рулевого механизма и его деталей: увеличенным зазором в зацеплении зубчатой передачи и потерей герметичности чехла.

На рисунке 2 и в таблице 2 проиллюстрировано процентное соотношение дефектов тормозной системы АТС.

Из рисунка 2 видно, что потеря герметичности колесных цилиндров ввиду снижения эксплуатационных свойств резинотехнических изделий (манжет и уплотнений) составляет около четверти всех отказов. Подтекание тормозной жидкости и ее перепускание между контурами тормозной системы наблюдаются также у главного тормозного цилиндра и суппорта переднего дискового тормоза. Таким образом, дефекты главного и колесных тормозных цилиндров формируют более половины всех отказов системы.

Забор атмосферного воздуха в камеру вакуумного усилителя и подклинивание его штока становятся причиной неисправности у шестнадцати транспортных машин из ста с неработоспособной тормозной системой. Нарушения в работе регулятора давления тормозных сил имеют только четыре процента автомобилей с неисправной системой.

Среди неисправностей, отнесенных в группу «Прочие» необходимо выделить дефект уплотнительного кольца суппорта, излом пружины колодки переднего

тормоза, отказ датчика уровня тормозной жидкости, а также задир фрикционной накладки заднего тормоза.

Из таблицы 2 видно, что наработки на отказ большинства элементов тормозного управления автомобиля коррелируют с межсервисным интервалом, указанным в сервисной книжке АТС, за исключением главного и колесных тормозных цилиндров, а также тормозных шлангов. В эксплуатации данные элементы следует в обязательном порядке подвергать контролю при проведении планового технического обслуживания транспортных машин на предприятиях автомобильного сервиса. Следует отметить, что особую опасность для автолюбителя и его пассажиров представляют тормозные шланги, имеющие наработку до отказа всего 5 тыс. км при установленном коэффициенте вариации, равном 1,16.

Особое внимание следует обратить на регулятор давления тормозных сил, устанавливаемый в конструкции тормозного управления *Lada Kalina* начальных комплектаций. Средняя наработка на отказ составляет около 700 км, что недопустимо мало. Преждевременная блокировка тормозных механизмов задних колес при торможении транспортной машины, вызванная некорректной работой регулятора, может способствовать заносу задней оси и потере устойчивости транспортной машины.

Таблица 2 – Массовые дефекты тормозной системы автомобиля *Lada Kalina*

№ п/п	Наименование дефекта	Количество	$\bar{X}$, тыс. км	v	σ
1	Негерметичность колесного цилиндра	54	25,6	0,54	13,8
2	Негерметичность главного тормозного цилиндра	32	22,5	0,51	11,4
3	Негерметичность вакуумного усилителя тормозов	22	16,8	0,74	12,3
4	Перепускает главный тормозной цилиндр	22	15,5	0,65	10,1
5	Вибрация/эллипсность тормозного барабана	18	19,9	0,39	7,8
6	Подклинивание вакуумного усилителя тормозов	12	6,2	1,37	8,5
7	Не отрегулирован регулятор давления тормозов	8	0,68	1,02	0,7
8	Течь правого суппорта	7	29,4	0,4	11,7
9	Разрыв шланга системы охлаждения	6	5,0	1,16	5,8
10	Течь левого суппорта	6	28,9	0,57	16,3
11	Прочие дефекты	15	-	-	-

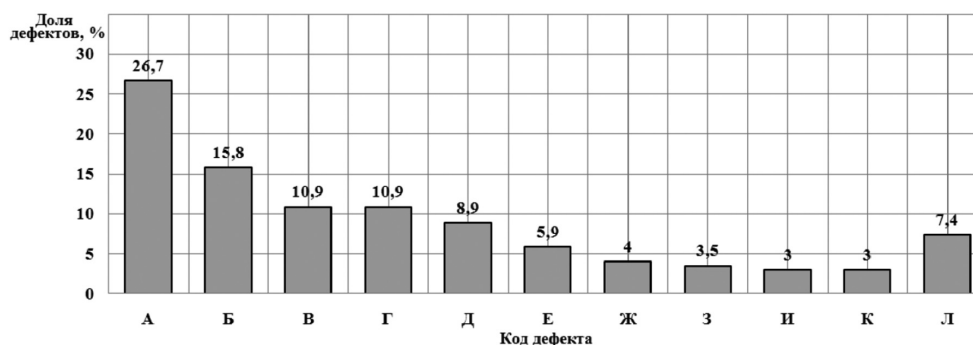


Рисунок – 2. Дефекты тормозной системы автомобиля *Lada Kalina*:

А – Негерметичность колесного цилиндра; Б – Негерметичность главного тормозного цилиндра; В – Негерметичность вакуумного усилителя тормозов; Г – Перепускает главный тормозной цилиндр; Д – Вибрация/эллипсность тормозного барабана; Е – Подклинивание вакуумного усилителя тормозов; Ж – Не отрегулирован регулятор давления тормозов; З – Течь правого суппорта; И – Разрыв шланга системы охлаждения; К – Течь левого суппорта; Л – Прочие дефекты

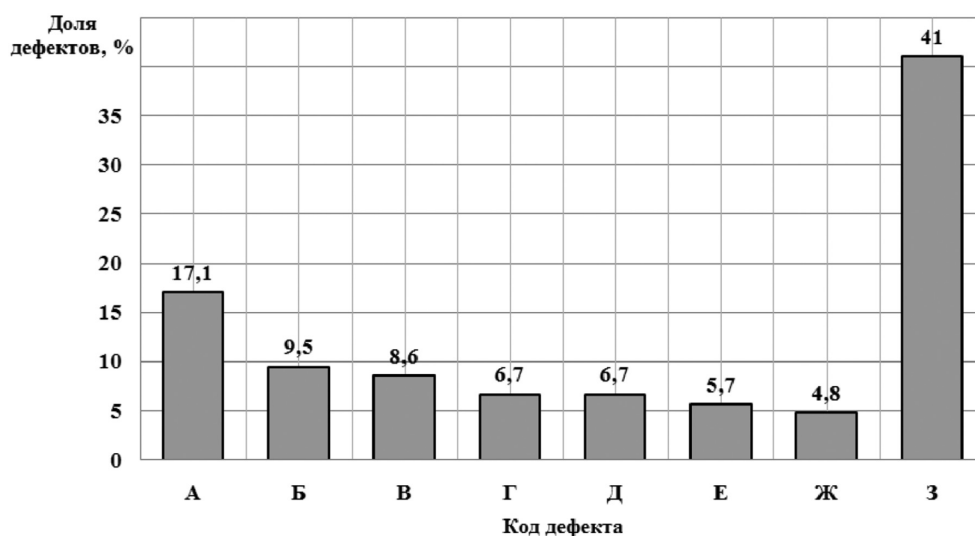


Рисунок – 3. Дефекты ходовой части автомобиля Lada Kalina:

А – Стук/щелчки в передней подвеске при вращении; Б – Стук опоры верхней стойки передней подвески правой;
 В – Стук опоры верхней стойки передней подвески левой; Г – Биение ступицы заднего колеса; Д – Разрушение шарнира задней растяжки передней подвески; Е – Выпадение подушки рычага задней подвески; Ж – Шум подшипника ступицы заднего колеса;
 З – Прочие дефекты

Таблица 3 – Массовые дефекты ходовой части автомобиля Lada Kalina

№ п/п	Наименование дефекта	Количество	$\bar{X}$, тыс. км	v	σ
1	Стук/щелчки в передней подвеске при вращении	18	20,5	0,66	13,5
2	Стук опоры верхней стойки передней подвески правой	10	22,9	0,67	15,4
3	Стук опоры верхней стойки передней подвески левой	9	22,4	0,54	12,1
4	Биение ступицы заднего колеса	7	16,7	0,59	9,9
5	Разрушение шарнира задней растяжки передней подвески	7	22,9	0,51	11,7
6	Выпадение подушки рычага задней подвески	6	20,5	0,66	13,6
7	Шум подшипника ступицы заднего колеса	5	14,4	0,7	0,69
8	Прочие дефекты	43	-	-	-

Таблица 4 – Массовые дефекты системы освещения автомобиля Lada Kalina

№ п/п	Наименование дефекта	Количество	$\bar{X}$, тыс. км	v	σ
1	Негерметичность блок-фары левой	69	10,8	0,73	7,9
2	Негерметичность блок-фары правой	25	13,9	0,85	11,8
3	Дефект заднего правого фонаря	15	19,7	0,51	10,1
4	Дефект заднего левого фонаря	9	18,3	0,82	15,0
5	Негерметичность противотуманной фары	8	15,3	0,97	14,8
6	Дефект сигнала торможения дополнительного	6	19,7	0,94	18,6
7	Прочие дефекты	7	-	-	-

На рисунке 3 показано распределение отказов ходовой части исследуемого АТС.

Дефект шарового шарнира передней подвески и разрушение шарнира задней растяжки, проявляемые стуками или щелчками при ускорении автомобиля, являются наиболее часто встречаемыми в эксплуатации и требуют замены элементов для устранения указанных признаков неисправностей.

Увеличенные зазоры в опорном подшипнике правой и левой поворотных стоек приводит к появлению стуков при проезде неровностей, а также характерного скрипа при вращении рулевого колеса автомобиля. Дефект связан с потерей герметичности элемента, вследствие

чего в него попадает песок и вызывает чрезмерный износ шариков и разрушение их сепаратора. Повышенный шум при вращении задних колес и их биение обусловлены люфтами ступичного подшипника, которые устраняют регулировкой или заменой элемента.

В таблице 3 показаны средние наработки $\bar{X}$ на отказ дефектных элементов ходовой части автомобиля.

На рисунке 4 изображено процентное распределение дефектов средств освещения и сигнализации автомобиля Lada Kalina. Массовые дефекты светотехнической аппаратуры, связанные с нарушением герметичности блок-фар головного освещения, задних фонарей и противотуманных фар проявляются в виде запотевания

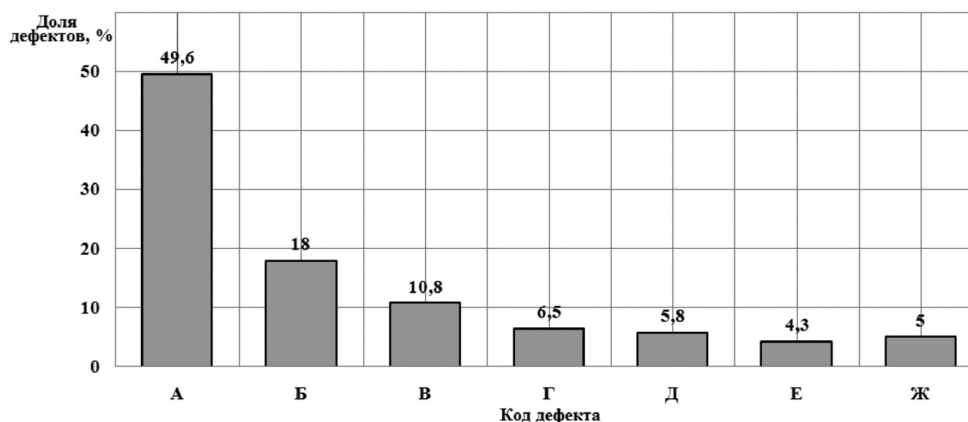


Рисунок – 4. Дефекты системы освещения автомобиля Lada Kalina:

А – Негерметичность блок-фары левой; Б – Негерметичность блок-фары правой; В – Дефект заднего правого фонаря; Г – Дефект заднего левого фонаря; Д – Негерметичность противотуманной фары; Е – Дефект сигнала торможения дополнительного; Ж – Прочие дефекты

их стекол в эксплуатации ввиду попадания влаги внутрь указанных элементов и обусловлены деформационными напряжениями в местах крепления к кузову транспортной машины.

Отказы дополнительного стоп-сигнала являются следствием потери работоспособности одного или нескольких полупроводниковых сегментов. В таблице 4 приведены сведения об эксплуатационной надежности элементов системы освещения АТС.

Заключение

Результаты исследований надежности элементов систем безопасности автомобиля *Lada Kalina* в гарантийный период эксплуатации являются важной информационной составляющей системы управления техническим состоянием транспортной машины. Выявленные на малых наработках дефекты свидетельствуют о наличии конструктивных просчетов и несовершенстве технологий производства АТС.

На предприятиях автомобильного сервиса следует учитывать представленную в настоящей работе номенклатуру наименее надежных элементов систем автомобиля, непосредственно влияющих на безопасность дорожного движения, при выполнении контрольно-диагностических воздействий планового технического обслуживания.

Заводу-изготовителю необходимо обратить внимание на указанные дефекты и разработать план мероприятий по их устранению, а также своевременно информировать потребителя об обнаруженных гарантийных дефектах и проводить отзывные кампании.

Библиографический список

1. Денисов Ил.В. Исследование влияния технического состояния автотранспортных средств на дорожно-транспортную аварийность в Российской Федерации / Ил.В. Денисов, А.А. Смирнов // Организация и безопасность дорожного движения: Материалы VIII всероссий-

ской научно-практической конференции 12 марта 2015 г. / Отв. редактор Д.А. Захаров. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 71-77. ISBN 978-5-9961-1027-8.

2. Денисов Ил.В. Вероятностная модель предотказного состояния автомобиля / Ю.В. Баженов, Ил.В. Денисов, Ив.В. Денисов // Бюллетень транспортной информации, 2010. – №9(183). – С. 35-38.

3. Денисов Ил.В. Инновационный подход к обеспечению безопасной эксплуатации автотранспортных средств / Ив.В. Денисов, Ил.В. Денисов // Проблемы функционирования систем транспорта: Материалы международной научно-практической конференции; под ред И.А. Анисимова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – С. 85-88. ISBN 978-5-9961-0277-8.

4. Денисов Ил.В. Научные предпосылки автоматизации технологических процессов управления работоспособностью автотранспортных средств в эксплуатации / И.В. Денисов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. / Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2014. – 260 с. ISBN 978-5-9984-0549-5.

5. Денисов Ил.В. Методика диагностирования электромеханического усилителя рулевого управления безредукторного типа / Ил.В. Денисов, А.А. Смирнов. // Электроника и электрооборудование транспорта, 2016. – №5. – С. 22-25.

Сведения об авторах

Илья В. Денисов – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Владимир, Россия, e-mail: denisoviv@mail.ru

Алексей А. Смирнов – ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», магистр 2 курса, Владимир, Россия, e-mail: AlexiFoX@yandex.ru

Поступила 19.12.2016

Модели вредоносных программ и отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей

Сергей М. Климов, 4 ЦНИИ Минобороны России, Королёв, Россия

Сергей В. Купин, 4 ЦНИИ Минобороны России, Королёв, Россия

Дмитрий С. Купин, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия



Сергей М. Климов



Сергей В. Купин



Дмитрий С. Купин

Резюме. Целью статьи является разработка моделей, позволяющих дать типовое представление структуры, функций вредоносных программ и получить количественную оценку отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях воздействия вредоносных программ. В статье показана актуальность и важность моделей вредоносных программ и оценки отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей при воздействии на них вредоносными программами. В качестве вредоносных программ рассматриваются комплексы программ, которые обладают свойствами скрытного внедрения, организации несанкционированного виртуального канала передачи данных, самораспространения, самомодификации, несанкционированного сбора информации о сети и информационно-технического воздействия на неё. Разработанная в статье структурно-функциональная модель вредоносных программ образована следующей совокупностью схем и описаний функций: структуры скрытного внедрения и установки вредоносных программ с использованием электронной почты, структурно-функциональной схемой основного модуля вредоносных программ и модулей скрытного внедрения, структурно-функциональной схемой вредоносных программ при реализации вредоносных функций, паспорта вредоносных программ. В схемах подробно описаны типовые функции, порядок работы и информационного взаимодействия модулей вредоносных программ внешней и внутренней сетей через несанкционированный виртуальный канал передачи данных. Основные модули вредоносных программ рассмотрены на примере целевой компьютерной атаки Careto. Модель отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях вредоносных программ описывается показателями, характеризующими способность сетей и соответствующих средств защиты информации сохранять и восстанавливать заданные вероятностно-временные характеристики за период воздействия на них вредоносных программ. В качестве показателей рассмотрены следующие: вероятность сохранения информационно-телекоммуникационных сетей и средств защиты информации заданных вероятностно-временных характеристик за период воздействия вредоносных программ, вероятность восстановления вероятностно-временных характеристик информационно-телекоммуникационных сетей и средств защиты информации после воздействия вредоносных программ, коэффициент оперативной готовности информационно-телекоммуникационных сетей выполнять заданные вероятностно-временные характеристики в условиях вредоносных программ и в произвольный момент времени, математическое ожидание времени воздействия вредоносных программ, математическое ожидание времени восстановления вероятностно-временных характеристик информационно-телекоммуникационных сетей и средств защиты информации. Предполагается, что значения параметров, необходимых для расчета показателей модели отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей получены в рамках имитационного моделирования сетей в условиях вредоносных программ на стендовом полигоне. В выводе отмечается, что разработанные модели позволяют определить общую структуру скрытного внедрения и установки атакующих вредоносных программ с использованием электронной почты, структурно-функциональную схему основного модуля вредоносных программ и модулей скрытного внедрения, структурно-функциональную схему вредоносных программ при реализации вредоносных функций, паспорт вредоносных программ, а также оценить отказоустойчивость информационно-телекоммуникационных сетей и средств защиты информации в условиях воздействия вредоносных программ, количественно оценить вероятностно-временные показатели отказоустойчивости, восстанавливаемости и готовности сетей.

Ключевые слова: вредоносные программы, информационно-телекоммуникационные сети, средства защиты информации, отказоустойчивость.

Формат цитирования: Климов С.М., Купин С.В., Купин Д.С. Модели вредоносных программ и отказоустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Надежность. 2017. № 4. С. 36-43. DOI: 10.21683/1729-2640-2017-17-4-36-43

Введение

В настоящее время наибольшую угрозу представляют целевые компьютерные атаки, организованные нарушителями с использованием скрытно внедряемых и самораспространяемых вредоносных программ (ВП). Данные программы не всегда оперативно выявляются современными средствами защиты информации (СЗИ), такими как средства антивирусной защиты, обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак. Как правило, нарушители используют уязвимости «нулевого дня» в значительных объемах программ операционных систем (ОС), сетевых сервисов и протоколов для скрытного внедрения элементов ВП в информационно-телекоммуникационные сети (ИТКС).

Под ВП будем понимать комплекс программ для организации скрытного внедрения, создания несанкционированных виртуальных каналов передачи данных, самораспространения, самомодификации и реализации целенаправленных и массированных информационно-технических воздействий (компьютерных атак) на ИТКС с целью нарушения безопасности информации и устойчивости функционирования.

Комплексы ВП обладают сложной для анализа программной реализацией, используют для разработки и выполнения существенные информационные ресурсы, в них нашли применение алгоритмы сжатия, шифрования и маскирования деструктивных действий. Современные целевые массированные компьютерные атаки, например, WannaCry в 2017 году, с использованием ВП охватывают сотни тысяч компьютеров по всему миру и нарушают устойчивость функционирования ИТКС в банковской сфере, энергетике, медицине, связи, транспорте и других критически важных областях жизнедеятельности [1-2].

В данной статье предложена структурно-функциональная модель ВП, которая разработана на примере анализа программного кода целевой компьютерной атаки Careto, приведенного в аналитических материалах Лаборатории Касперского [3]. Кроме того, в статье осуществляется интерпретация типовой модели структуры и функций для широкого класса ВП.

Средства ВП Careto позволили нарушителям поразить 380 уникальных объектов в 31 стране. С использованием ВП Careto нарушители похищали сведения о средствах вычислительной техники, закрытые ключи шифрования, настройки виртуальных частных сетей VPN, ключи закрытых протоколов передачи данных SSH, файлы RDP, а также файлы различных форматов данных. Как правило, внедрение ВП осуществляется через сеть Интернет, соответствующее коммуникационное оборудование ИТКС и несанкционированное подключение внешних электронных носителей информации [3].

Комплекс ВП Careto устанавливается в сети с помощью модуля установки и обеспечивает нарушителю удаленный доступ к ИТКС, скрытно от пользователя, а также выполнение набора команд, поступающих от сер-

вера удаленного управления, для сбора сведений о сети, уязвимых сервисах и хранимой информации. В случае успешного проникновения в ИТКС модуль установки ВП Careto извлекает необходимые компоненты для корректного функционирования ВП Careto и последующего развертывания в сети.

По сути ВП Careto и подобные ей программы обуславливают возникновение в ИТКС компьютерных инцидентов двух типов:

1. Проникновение и организация несанкционированного, виртуального и скрытного канала сбора, передачи и обработки информации об ИТКС.

2. Скрытное развертывание элементов ВП в ИТКС и реализация целенаправленного и массированного воздействия.

Целенаправленные и массированные воздействия ВП на уязвимости ИТКС приводят к практически мгновенному (при передаче данных по волоконно-оптическим линиям связи) нарушению устойчивости функционирования элементов ИТКС даже при наличии СЗИ.

Для обеспечения устойчивости функционирования ИТКС в условиях ВП необходимо разработать модели, которые определяют типовые структуры и функции ВП, позволят их реализовать в виде имитационной модели на стендовом полигоне [4] и получить количественную оценку устойчивости ИТКС в условиях деструктивных воздействий [5 – 7].

Имитационные модели ИТКС позволят воспроизвести наиболее критические ко времени регламенты и технологические циклы управления, а модели СЗИ – отработать соответствующие функции средств защиты информации от ВП. Наиболее рационально стендовые полигоны для тестирования и проверки ИТКС в условиях ВП реализовать в виде совокупности центров обработки данных, информационных систем на базе виртуальных машин, имитаторов ВП взаимосвязанных сетевым коммуникационным оборудованием.

Под отказоустойчивостью ИТКС будем понимать способность сети и СЗИ обеспечивать установленные регламенты выполнения технологических циклов управления (вероятностно-временные характеристики) в условиях воздействия ВП на заданном интервале времени.

Наличие потенциальных уязвимостей в современных ИТКС обуславливает возможность внедрения в них ВП и реализации деструктивных воздействий, приводящих к нарушению устойчивости функционирования. Поэтому разработка моделей, позволяющих формализовать структуру и процесс работы ВП, оценить отказоустойчивость ИТКС в условиях воздействия ВП, является актуальной.

Постановка задачи

В рамках статьи разработаны:

1. Структурно-функциональная модель ВП, включающая следующие компоненты:
 - общую структуру комплекса ВП;

- структуру скрытного внедрения и установки ВП с использованием электронной почты;

- структурно-функциональная схема основного модуля ВП (Careto) и модулей скрытного внедрения (SGH, SBD);

- структурно-функциональную схему модуля ВП (SGH), описывающую основные функциональные возможности комплекса ВП;

- паспорт ВП.

2. Модель отказоустойчивости ИТКС в условиях ВП, которая основана на экспериментальных испытаниях сегментов ИТКС и соответствующих СЗИ при имитации воздействия на них ВП.

На рисунке 1 представлена общая структура ВП, компоненты которых распределены во внешней, внутренней сети и взаимодействуют через несанкционированный виртуальный канал передачи данных (информационный канал созданный средствами нарушителя). Известны реализации кода ВП Careto для 32-х и 64-х разрядных версий операционных систем (ОС) Windows и Linux, а других типов ВП – и для мобильных приложений Android и Apple iOS [1, 3].

В структуре ВП предусмотрены внешние средства управления внедренными во внутреннюю сеть модулями на основе применения сервера управления ВП и модуля доставки (ретрансляции) и информационного взаимодействия ВП. Внедренные в ИТКС модули ВП осуществляют сбор данных о сетевой конфигурации (доступных IP, MAC-адресах и номерах портов ком-

муникационного оборудования), типе операционной системы и СЗИ, перехватывают информацию с экрана (графические изображения экрана рабочего стола пользователя), клавиатуры и носителей, подключенных к компьютерам. Модуль доставки осуществляет выдачу команд управления для выполнения деструктивных функций внедренными во внутреннюю сеть модулями, а затем ретранслирует собранную информацию на сервер управления ВП и заносит её в базу данных. На сервере ВП предусмотрена возможность реализации атакующих функций компьютерных атак на ИТКС путем выбора из соответствующей базы данных и отправки кода специальных программ эксплойтов на уязвимости внутренней поражаемой сети. Кроме того, ВП может использовать различные инструменты из проекта Metasploit Framework, в том числе для повышения привилегий ВП в операционной системе.

Во внутренней сети функционируют следующие основные модули ВП:

1. Модули скрытного внедрения (драйверы загрузки) и взаимодействия элементов ВП между собой, которые включают в свой состав средства получения первоначального доступа к элементам ИТКС, скрытной загрузки в операционную систему и обхода СЗИ, а также интерфейсные программы организации информационного взаимодействия с внешней сетью и между модулями внутренней сети.

2. Модули скрытного самораспространения ВП в ИТКС, представляющие собой программные средства



Рисунок – 1. Общая структура комплекса ВП

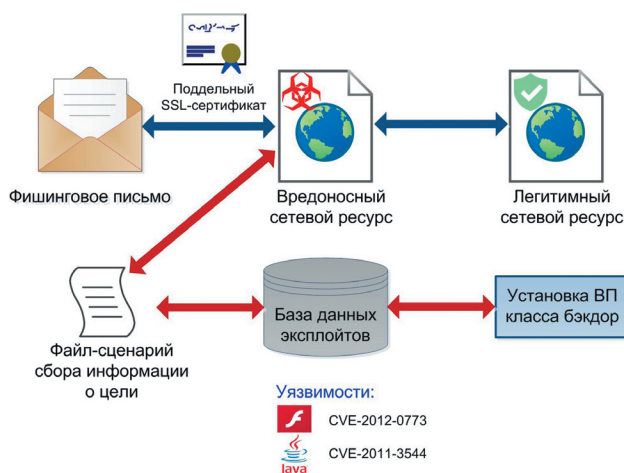


Рисунок – 2. Структура скрытного внедрения и установки ВП с использованием электронной почты

работы с привилегиями системного администратора, средства загрузки, обеспечивающие перехват прерываний операционной системы, скрытый переход к исполнению кода ВП и приоритетное навязывание выполнения его функций.

3. Модули сбора данных, подготовки и реализации воздействий на ИТКС, сущность работы которых за-

ключается в функционировании множества программ-имплантов, перехватывающих проводной и беспроводной сетевой трафик, нажатия клавиш, сеансы и ключи при работе программ, извлекающих информацию из компьютерного оборудования, сохраняющих снимки экрана и контролирующих операции с файлами. Вредоносный модуль формирует необходимые для воздействия исходные данные об инфицированной ИТКС, обеспечивает развертывание остальных компонентов комплекса ВП и доводит код компьютерной атаки до поражаемых элементов ИТКС.

4. Модули самомодификации ВП являются программными компонентами, обеспечивающими адаптацию ВП к параметрам аппаратно-программной среды нарушаемой ИТКС путем извлечения и развертывания программ, необходимых для организации канала несанкционированного подключения к сети, версиям ОС, а также направления запроса к серверу ВП с исходными данными для дополнительных вредоносных модулей.

5. Модули обеспечения бескомпроматности ВП – совокупность модулей скрытия действий ВП путем использования ложных сертификатов программного обеспечения и электронной подписи, шифрования вну-

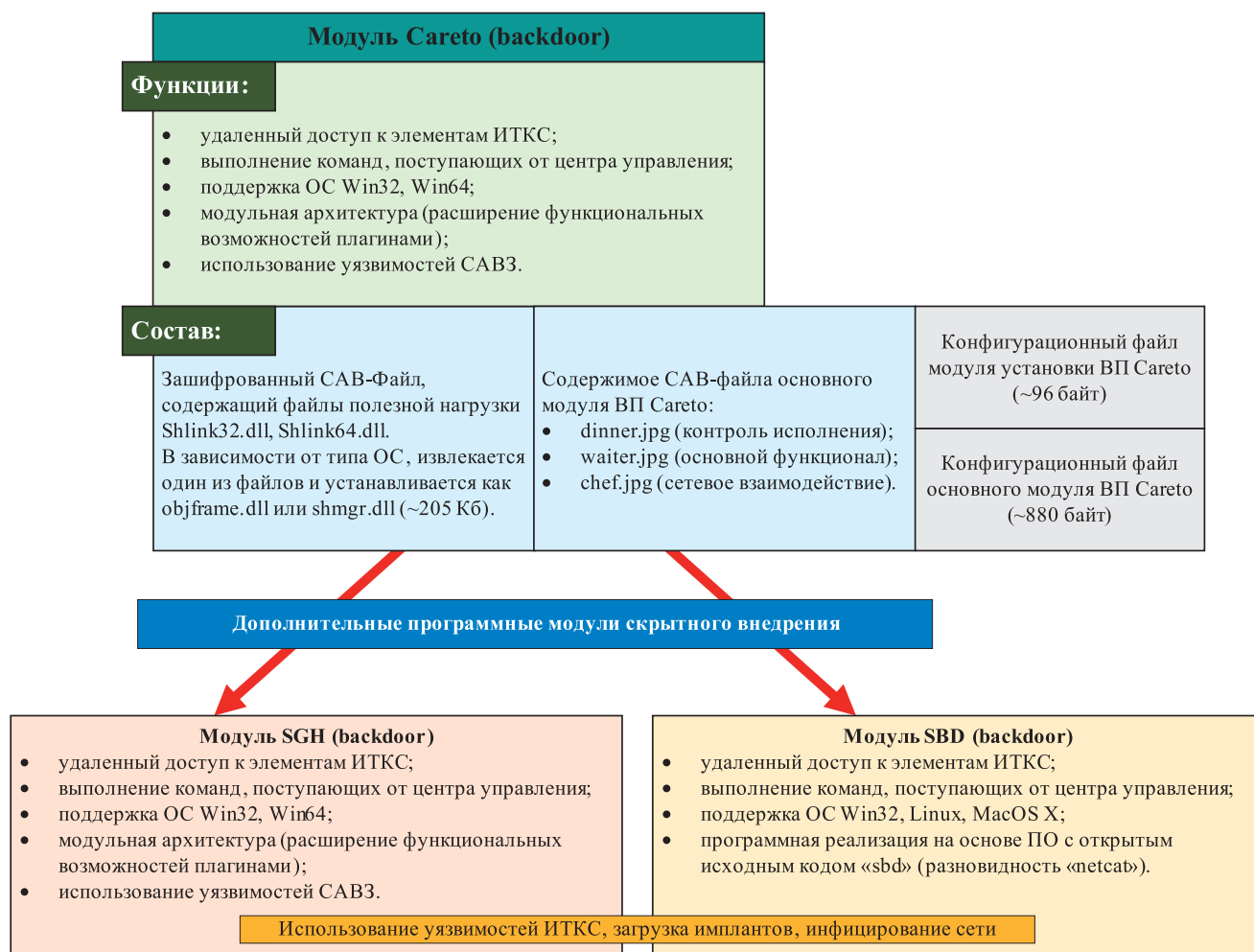


Рисунок – 3. Структурно-функциональная схема основного модуля ВП и модулей скрытного внедрения (на примере ВП Careto)

тренного и внешнего трафика, уничтожения следов ВП в файлах и памяти компьютерных устройств.

На рисунке 2 приведена структура скрытного внедрения и установки ВП с использованием электронной почты.

Скрытное внедрение, самораспространение и установка ВП осуществляется следующим образом. Нарушитель подготавливает фишинговое сообщение электронной почты, которое содержит ссылку на вредоносный сетевой ресурс. В результате открытия ссылки пользователем происходит внедрение ВП в открытый сегмент ИТКС. Затем пользователя перенаправляют на абсолютно легитимный сетевой ресурс с целью сокрытия факта компрометации системы.

Для маскировки ВП нарушители используют поддомены, основанные на вредоносных сетевых ресурсах. Данный механизм маскировки нацелен на то, что, если сетевое имя ресурса очень длинное, то браузер обрезает название с конца, оставляя название поддомена.

Далее путем использования файла-сценария сбора информации о поражаемых целях в ИТКС производится подготовка данных об уязвимостях и доступных для нарушения информационных ресурсах. Например, используются уязвимости в продуктах Adobe Flash (код уязвимости CVE-2012-0773) и Java (код уязвимости CVE-2011-3544). На основе собранной в ИТКС информации выбирается из базы данных необходимая про-

грамма эксплойт и загружается под видом расширения для определенного браузера. Затем они ретранслируются в ИТКС для установки ВП класса бэкдор (backdoor). После успешной компрометации ИТКС пользователь перенаправляется на легитимный сетевой ресурс, например, новостной портал.

Предполагается, что в ходе проникновения содержимого вредоносного сообщения электронной почты в ИТКС ему удастся обойти стандартные СЗИ. Нарушитель указывает уникальную ссылку на определенный эксплойт и отправляет её пользователю в фишинговом письме, который сам его загружает. Для маскировки ссылок на эксплойты, ссылки укорачиваются с помощью определенных сервисов.

Структурно-функциональная схема основного модуля ВП и модулей скрытного внедрения (на примере ВП Careto) приведена на рисунке 3. Как можно заметить из рисунка 3, основу ВП Careto составляют основной модуль Careto, осуществляющий первоначальное внедрение в ИТКС, и модули организации несанкционированных каналов передачи данных, скрытного распространения и реализации информационно-технического воздействия SGH и SBD.

На рисунке 4 представлена структурно-функциональная схема модуля ВП SGH, описывающая основные функциональные возможности комплекса ВП. Данный тип ВП представляет собой один из модулей сбора

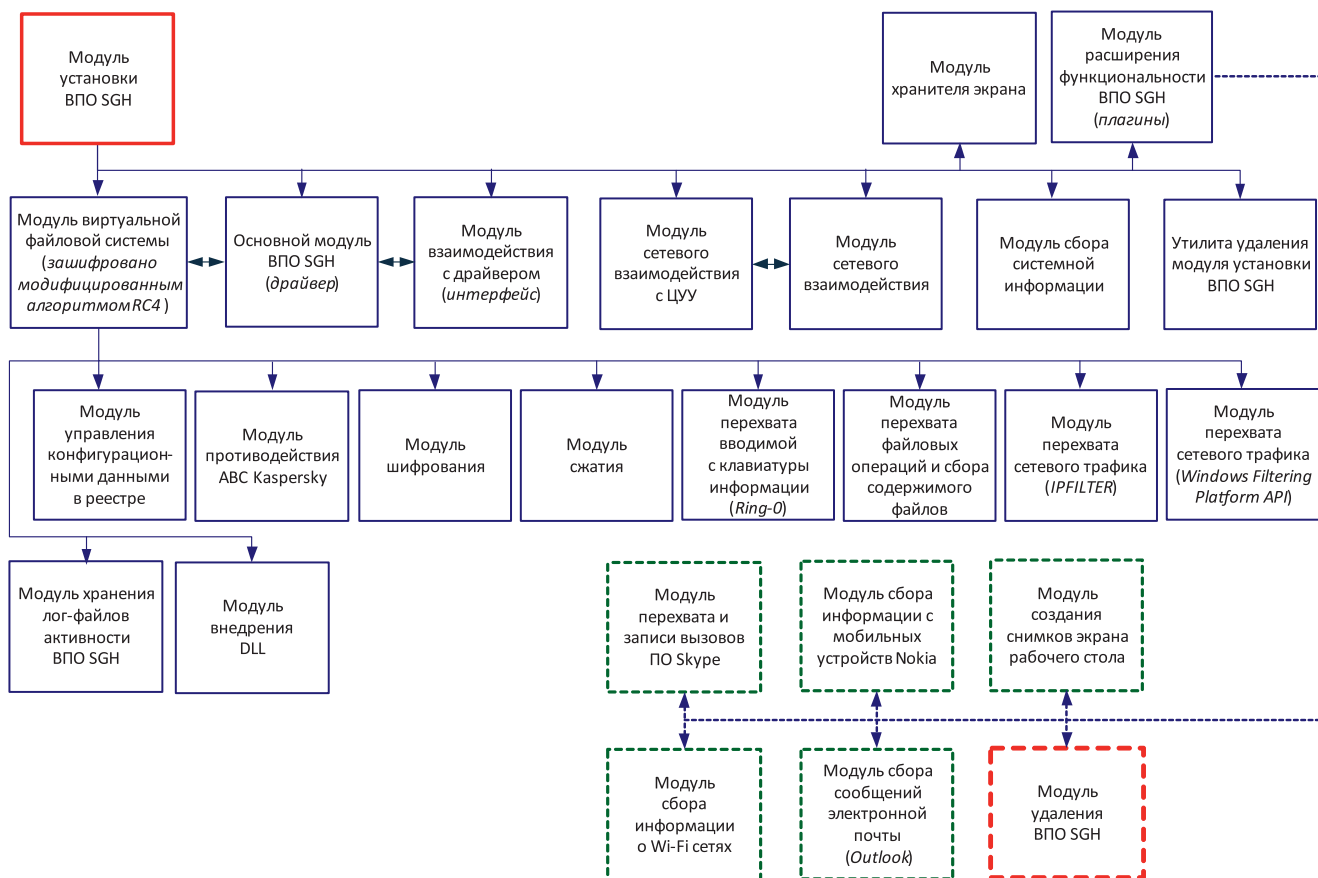


Рисунок – 4. Структурно-функциональная схема модуля ВП (SGH), описывающая основные функциональные возможности комплекса ВП

данных, подготовки и реализации воздействий на ИТКС класса бэкдор (backdoor). Этот модуль предоставляет скрытный и удаленный доступ нарушителю к ИТКС, выполняет различные команды, поступающие от сервера удаленного управления ВП. Ввиду того, что ВП Careto обладает функционалом загрузки дополнительных ВП SGH и SBD, можно заключить, что структурно-функциональная схема, а также описание модулей ВП SGH полностью характеризуют вредоносные функции целого комплекса ВП Careto.

Основные вредоносные функции ВП на примере модуля SGH ВП Careto представим описанием функций его составных модулей следующими образом:

Модуль хранителя экрана – ожидает, когда станет доступным рабочий стол с именем «screen-saver», и затем создаёт другой рабочий стол со своим именем, загружает браузер по умолчанию. Функция «DllEnumClass» удаляет модуль хранителя экрана или удаляет его имя из конфигурационной информации, в зависимости от версии ОС Windows.

Модуль расширения функциональности – считывает список дополнительных модулей SGH из конфигурационной информации, загружает эти модули и периодически опрашивает, результаты отправляет на сервер удаленного управления через интерфейс, который обеспечивает модуль сетевого взаимодействия.

Модуль взаимодействия с драйвером – представляет собой интерфейс для работы с драйвером «scsimap.sys» пользовательского уровня.

Модуль сетевого взаимодействия с сервером удаленного управления – устанавливает соединение с модулем сетевого взаимодействия, используя именованный канал, указанный в конфигурационной информации модуля SGH, осуществляет сетевое взаимодействие с сервером удаленного управления.

Модуль сетевого взаимодействия – предоставляет сетевые функции другим модулям SGH через именованный канал.

Модуль сбора системной информации – представляет собой сборщик низкоуровневой информации об ИТКС (список файлов на диске, базовый адрес файлов PE формата, созданных после указанной даты, характеристики аппаратно-программной платформы).

Модуль управления конфигурационными данными в реестре – формирует унифицированную конфигурационную информацию модуля SGH, которая используется остальными модулями.

Модуль противодействия средствам антивирусной защиты – использует уязвимости в старых версиях антивирусного ПО (например, Kaspersky Workstation 6.0.4 и KAV/KIS 8.0 – уязвимости устранены в 2008 г.) с целью обеспечения скрытного функционирования на ИТКС.

Модуль шифрования – предоставляет криптографические функции другим модулям (алгоритмы шифрования AES-128, RC4).

Модуль сжатия – предоставляет функции сжатия другим модулям (алгоритм сжатия LZNT1).

Модуль перехвата вводимой с клавиатуры информации – представляет собой перехватчик клавиатуры (кейлоггер), работающий в режиме ядра.

Модуль перехвата файловых операций и сбора содержимого файлов – перехватывает операции с файлами, собирает информацию и содержимое файлов в соответствии с правилами фильтрации.

Модуль перехвата сетевого трафика – модули предоставляют средства перехвата сетевого трафика.

Модуль хранения лог-файлов активности SGH – создаёт два файла-хранилища на основе получения информации, собранной другими модулями и сохраняет их в журнале активности ИТКС в форме записей с метками времени и текстовой информацией.

Модуль внедрения DLL – регистрирует функцию для обработки событий создания процесса и загрузки библиотеки в адресное пространство процесса с использованием правил загрузки, которые определяют расположение внедряемых библиотек DLL и список имен процессов-целей для внедрения.

Модуль перехвата и записи вызовов программы Skype – перехватывает ряд функций и данных программы Skype, маскирует себя под системную библиотеку.

Модуль сбора информации с мобильных устройств Nokia – похищает информацию с мобильных устройств Nokia.

Модуль создания снимков экрана рабочего стола – создает снимки рабочего стола и отмечает расположение курсора мыши.

Модуль сбора информации о Wi-Fi сетях – собирает информацию о беспроводных сетях, доступных интерфейсу Wi-Fi скомпрометированной ИТКС.

Модуль сбора сообщений электронной почты – использует интерфейс программы Microsoft Outlook и запрашивает его из перехваченных системных функций OLE2.

Модуль удаления вредоносных программ SGH – полностью удаляет элементы ВП из ИТКС.

Типовой паспорт реализации угроз ВП на уязвимые места в ИТКС определим с использованием ГОСТ Р 56546-2015 (таблица 1) на примере ВП Careto, описывающий ключевые моменты его функционирования и рекомендации по устранению уязвимостей ИТКС.

В дальнейшем типовой паспорт угроз ВП предлагается использовать для расследования компьютерных инцидентов и построения адаптивных средств обнаружения ВП на основе их поведенческого анализа в рамках функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Модель отказоустойчивости ИТКС необходима для обеспечения её функциональной надежности в условиях воздействия ВП, основана на экспериментальных испытаниях функциональных аналогов сегментов ИТКС и соответствующих СЗИ при имитации воздействия на них ВП на стендовом полигоне. Модель представляется совокупностью показателей, определенных выражениями (1 – 5):

Таблица 1 – Типовой паспорт угроз ВП

Элементы описания ВП	Описание ВП
Наименование	Careto
Тип	бэкдор, модульный
Дата обнаружения	2014
Краткое описание	ВП скрытно внедряется и предоставляет нарушителю удаленный доступ к ИТКС, выполняет различные команды, поступающие из сервера удаленного управления
Объект ВП	государственные учреждения и коммерческие организации
Степень опасности	высокая
Структура ВП	- модуль установки; - основной модуль; - модуль сетевого взаимодействия с центром удаленного управления; - функциональный модуль; - модуль контроля исполнения функционального и сетевого модуля; - модуль удаления; - модуль сбора системной информации и аутентификационных данных (возможна загрузка дополнительных модулей из центра удаленного управления).
Основные функциональные возможности	- файл конфигурации и файл полезной нагрузки (payload) зашифрованы модифицированным алгоритмом RC4; - закрепление в автозагрузке в качестве COM-объекта; - внедрение вредоносного кода в процессы explorer.exe, iexplore.exe, firefox.exe, chrome.exe; - перезапись кодовой секции системных библиотек; - безопасное закрытие обработчиков процесса работы модулей; - прием и передача данных шифруется алгоритмами AES и RSA; - запуск исполняемых файлов с определенными аргументами; - получение САВ-файла, извлечение из него файла и последующий запуск с определенными аргументами; - извлечение исполняемого модуля из САВ-файла и последующий запуск в памяти; - изменение конфигурационного файла, смена сервера удаленного управления; - сбор информации об ИТКС и передача на сервер удаленного управления; - полное удаление ВП из ИТКС.
Индикаторы компрометации ИТКС	(Файлы, фрагмент) %AppData%\Microsoft\objframe.dll shmgr.dll Shlink(32 64).dll (Реестр, фрагмент) [HKLM\Software\Classes\CLSID\{E6BB64BE-0618-4353-9193-0AFE606D6F0C}\Inproc-Server32] = «%System%\browseui.dll» (Сети, фрагмент) hxxp://202.75.58.153/cgi-bin/commcgi.cgi Поле User-Agent: Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 4.01; Windows NT)
Способ обнаружения	(Средства антивирусной защиты, фрагмент) Kaspersky: Trojan.Win32 Win64.Careto.*
Возможные меры по устранению	- переустановка ОС и форматирование носителей информации; - проведение ручной проверки индикаторов компрометации ИТКС (элементы автозагрузки, сетевое взаимодействие, активность файловой системы, анализ лог-файлов ОС); - обновление средств антивирусной защиты и проведение полной проверки ИТКС.
Сведения о ВП	https://kasperskycontenthub.com/wp-content/uploads/sites/43/vlpdfs/unveilingthemas_k_v1.0.pdf

1. Вероятностью сохранения ИТКС и СЗИ заданных вероятностно-временных характеристик за период воздействия ВП:

$$P_{\text{С}}^{\text{ИТКС}}(t_{\text{ВП}}) = \left[1 - \prod_{i=1}^N P_{\text{ВП}i}(t_{\text{ВП}}) \right] \sum_{j=1}^N P_{\text{СЗИ}j}(t_{\text{ВП}}) \sum_{k=1}^N P_{\text{У}k}(t_{\text{ВП}}), \quad (1)$$

где $t_{\text{ВП}}$ – время воздействия ВП;

$P_{\text{ВП}i}$ – вероятность i -го успешного воздействия ВП на

элементы ИТКС и СЗИ, N – ряд натуральных чисел;

$P_{\text{СЗИ}j}$ – вероятность успешного предупреждения и обнаружения ВП j -м элементом СЗИ;

$P_{\text{У}k}$ – вероятность успешного устранения k -й уязвимости в ИТКС и СЗИ.

2. Вероятностью восстановления вероятностно-временных характеристик ИТКС и СЗИ после воздействия ВП:

$$P_{\text{вос}}^{\text{ИТКС}}(t_{\text{вос}}) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^N \left[1 - S_{\text{ИТКС}i} e^{-\lambda_{\text{ИТКС}i} t_{\text{вос}}} \right] \right\} \cdot \left\{ 1 - \prod_{j=1}^N \left[1 - S_{\text{СЗИ}j} e^{-\mu_{\text{СЗИ}j} t_{\text{вос}}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $t_{\text{вос}}$ – время восстановления ИТКС и СЗИ;
 $S_{\text{ИТКС}}, S_{\text{СЗИ}}$ – весовые коэффициенты, имеющие значения $[0, \dots, 1]$ и характеризующие количество сенсоров в ИТКС и СЗИ, которые выявили и противодействовали модулям ВП;

$\lambda_{\text{ИТКС}}$ – интенсивность восстановления элементов ИТКС;

$\mu_{\text{СЗИ}}$ – интенсивность восстановления компонент СЗИ.

3. Коэффициентом оперативной готовности ИТКС и СЗИ выполнять заданные вероятностно-временные характеристики в условиях воздействия ВП и в произвольный момент времени:

$$K_{\Gamma}^{\text{ИТКС}} = \frac{t_{\text{ИТКС}}}{\sum_{i=1}^N (t_{\text{ИТКС}i} + t_{\text{сб}i}^{\text{ВП}})}, \quad (3)$$

где $t_{\text{ИТКС}}$ – период времени работоспособного состояния ИТКС;

$t_{\text{сб}}^{\text{ВП}}$ – период сбоев (отказов) в результате воздействия ВП.

4. Математическим ожиданием времени воздействия ВП:

$$m_{\text{ВП}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\text{ВП}i}}{N_{\text{общ}}^{\text{ВП}}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{ВП}i}$ – i -е значения времени воздействия ВП;
 $N_{\text{общ}}^{\text{ВП}}$ – суммарное количество измерений времени воздействия ВП в ходе имитационного моделирования на стендовом полигоне.

5. Математическим ожиданием времени восстановления вероятностно-временных характеристик ИТКС и СЗИ:

$$m_{\text{вос}} = \frac{\sum_{j=1}^N t_{\text{вос}j}^{\text{ИТКС}} + \sum_{j=1}^N t_{\text{вос}j}^{\text{СЗИ}}}{N_{\text{общ}}^{\text{ИТКС}} + N_{\text{общ}}^{\text{СЗИ}}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{вос}j}^{\text{ИТКС}}$ – время восстановления j -го элемента ИТКС;

$t_{\text{вос}j}^{\text{СЗИ}}$ – время восстановления j -го компонента СЗИ;

$N_{\text{общ}}^{\text{ИТКС}}$ – суммарное количество измерений времени восстановления элементов ИТКС в условиях воздействия ВП;

$N_{\text{общ}}^{\text{СЗИ}}$ – суммарное количество измерений времени восстановления компонент СЗИ в условиях воздействия ВП.

Заключение

В статье предложены модели, которые позволяют определить общую структуру скрытного внедрения и установки ВП с использованием электронной почты, структурно-функциональную схему основного модуля ВП и модулей скрытного внедрения (на примере ВП Careto), структурно-функциональную схему ВП при реализации вредоносных функций, паспорт ВП, а также количественно оценить вероятностно-временные показатели отказоустойчивости, восстанавливаемости и готовности сетей ИТКС в условиях воздействия ВП.

Библиографический список

1. Анатомия таргетированной атаки. В. Левцов, Н. Демидов. Журнал «Information Security/ Информационная безопасность» № 2, 2016. – с. 36 – 39.
2. Угрозы информационной безопасности в кризисах и конфликтах XXI века / Под ред. А.В. Загорского, Н.П. Ромашкиной – М.:ИМЭМО РАН, 2015. – 151 с.
3. Сорванная «Маска» – замаскированный АРТ. Аналитические материалы Лаборатории Касперского. https://kasperskycontenthub.com/wp-content/uploads/sites/43/vlpdfs/unveilingtheface_v1.0.pdf
4. Климов С.М., Астрахов А.В., Сычев М.П. Методические основы противодействия компьютерным атакам. Электронное учебное издание. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 110 с, 2013.
5. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза/ И.Б. Шубинский. – Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2016. – 544 с., ил. – («Журнал надежность»).
6. К. Капур, Л. Ламберсон. Надежность и проектирование систем. Под ред. И.А. Ушакова. Пер. с англ. – М.: «Мир», 1980. – 604 с., ил.
7. Величко В.В., Попков Г.В., Попков В.К. Модели и методы повышения живучести современных систем связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 270 с.: ил.

Сведения об авторах

Сергей М. Климов – доктор технических наук, профессор, начальник управления 4 ЦНИИ Минобороны России, Королёв, Россия, e-mail: klimov.serg2012@yandex.ru.

Сергей В. Купин – научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России, Королёв, Россия, e-mail: serkup1970@mail.ru.

Дмитрий С. Купин – преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана, Королёв, Россия, e-mail: tf3t3lb@gmail.com.

Поступила 08.06.2017

Методы оценки и способы повышения эксплуатационной надёжности датчиков массового расхода воздуха двигателем

Михаил В. Горбань, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ, Пятигорск, Россия

Евгений А. Павленко, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ, Пятигорск, Россия



Михаил В. Горбань



Евгений А. Павленко

Резюме. Конструкция электронной системы управления двигателем современного автомобиля практически всегда включает в себя датчик нагрузки на двигатель. Его роль, как правило, выполняет датчик абсолютного давления во впускном коллекторе или датчик массового расхода воздуха. Наибольшее распространение получил датчик массового расхода воздуха на плёночной основе. Датчик устанавливается во впускном тракте между воздушным фильтром и дроссельной заслонкой впускного коллектора двигателя. В процессе эксплуатации датчик подвержен загрязнению и старению измерительного элемента вследствие взаимодействия с частицами пыли и парами моторного масла, находящимися в потоке воздуха. Это приводит к отклонению выходного сигнала датчика от эталонного значения и, как следствие, к неточному расчёту электронной системой управления двигателем состава топливной смеси. Учитывая конструкцию датчиков, ремонту они не подлежат, и их меняют на новые. Стоимость нового датчика довольно высокая. Исходя из вышеизложенного, очевидно, что данная тема является актуальной, цель работы заключается в поиске методов оценки и способов повышения эксплуатационной надёжности датчиков массового расхода воздуха плёночного типа, устанавливаемых на современных автомобилях. Оценка работоспособности датчиков проводится по величине напряжения выходного сигнала датчика. С помощью диагностического сканера, подключённого к разъёму диагностики автомобиля, в режиме просмотра каналов аналого-цифрового преобразователя фиксируется напряжение выходного сигнала датчика, оценивается коэффициент долговременной коррекции топливной смеси, а также проверяется наличие в памяти электронного блока управления кодов неисправности, связанных с датчиком массового расхода воздуха. Цифровой осциллограф используется для измерения напряжения в момент включения замка зажигания и напряжения покоя при нулевом потоке воздуха, а также измерения времени переходного процесса. На основании полученных результатов исследования становится видно, что повысить эксплуатационную надёжность таких датчиков возможно только путем проведения коррекции калибровочной таблицы датчика массового расхода воздуха, записанной в памяти блока управления двигателем. С помощью установки для испытания датчиков массового расхода воздуха подготавливаются исходные данные для проведения процедуры коррекции. Эталонный и испытуемый датчики помещаются на общий патрубок вакуумного насоса, и ступенчато меняется величина расхода воздуха. При фиксированном расходе воздуха измеряется выходное напряжение датчиков. Полученные данные сводятся в таблицу и обрабатываются с использованием программы редактора калибровок «Chip Tuning PRO». Как видно, одной из причин потери эксплуатационной надёжности датчиков является загрязнение чувствительного элемента. Слой загрязнений на чувствительном элементе уменьшает коэффициент теплопередачи между воздушным потоком и измерительными элементами датчика. На основании проведённых исследований представлены результаты изменения выходного сигнала датчика от эталонных значений в процессе его эксплуатации, предложена методика корректировки калибровочной таблицы параметров датчика массового расхода воздуха в программе управления двигателем, записанной в памяти электронного блока управления, даны рекомендации по методам оценки и способам повышения эксплуатационной надёжности датчиков.

Ключевые слова: датчик массового расхода воздуха; диагностический параметр; напряжение покоя; время переходного процесса; калибровочная таблица.

Формат цитирования: Горбань М.В., Павленко Е.А. Методы оценки и способы повышения эксплуатационной надёжности датчиков массового расхода воздуха двигателем // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 44-48. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-44-48

На современных автомобилях для определения расхода воздуха двигателем между воздушным фильтром и дроссельной заслонкой устанавливается датчик массового расхода воздуха (ДМРВ) пленочного типа. Показания ДМРВ являются одним из базовых параметров, используемых электронным блоком управления (ЭБУ) для определения нагрузки на двигатель, расчёта необходимого количества топлива и оптимального угла опережения зажигания [1].

Наибольшее распространение на отечественных автомобилях марки «LADA» получил ДМРВ пленочного типа фирмы BOSCH HFM5 [2, 3]. Сигнал датчика представляет собой напряжение, изменяющееся в диапазоне от 0 до 5 В. Значение напряжения выходного сигнала датчика зависит от величины потока проходящего через датчик воздуха. При нулевом расходе воздуха, когда двигатель остановлен, выходное напряжение датчика должно составлять примерно 1 В. При работающем двигателе через датчик проходит поток воздуха, и, чем больше расход воздуха, тем выше значение выходного напряжения датчика.

Опыт эксплуатации таких датчиков на автомобилях марки «LADA» показал, что после пробега автомобилем примерно 50-70 тысяч километров ДМРВ перестает правильно измерять расход воздуха. В таких случаях наблюдается потеря тягово-динамических характеристик автомобиля, повышенный расход топлива, неравномерность вращения коленчатого вала на холостом ходу, затрудненный запуск двигателя и другие симптомы [4, 5].

Причинами снижения чувствительности измерительного элемента датчика является его загрязнение масляными отложениями, находящимися в потоке воздуха, и абразивный износ, вызванный частицами пыли. При этом снижается точность измерения, что в итоге приводит к неправильному расчёту топливно-воздушной смеси. Учитывая конструкцию датчиков, ремонту они не подлежат, и их меняют на новые. Стоимость нового датчика довольно высокая.

Исходя из вышеизложенного, очевидно, что данная тема является актуальной, так как заключается в поиске методов оценки и способов повышения эксплуатационной надёжности ДМРВ пленочного типа, устанавливаемых на современных автомобилях.

Нами были проведены исследования работы ДМРВ на экспериментальной установке (рисунок 1) и непосредственно на автомобиле. Для измерения параметров датчиков использовались диагностический сканер MT-10 и цифровой USB осциллограф Autoscope IV.

Оценка работоспособности датчиков проводилась по величине напряжения выходного сигнала датчика. С помощью диагностического сканера, подключённого к разъёму диагностики автомобиля, в режиме просмотра каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фиксировалось напряжение выходного сигнала датчика, оценивался коэффициент долговременной коррекции топливной смеси, а также проверялось наличие кодов неисправности в памяти ЭБУ по ДМРВ. Цифровой осциллограф использовался для измерения напряжения

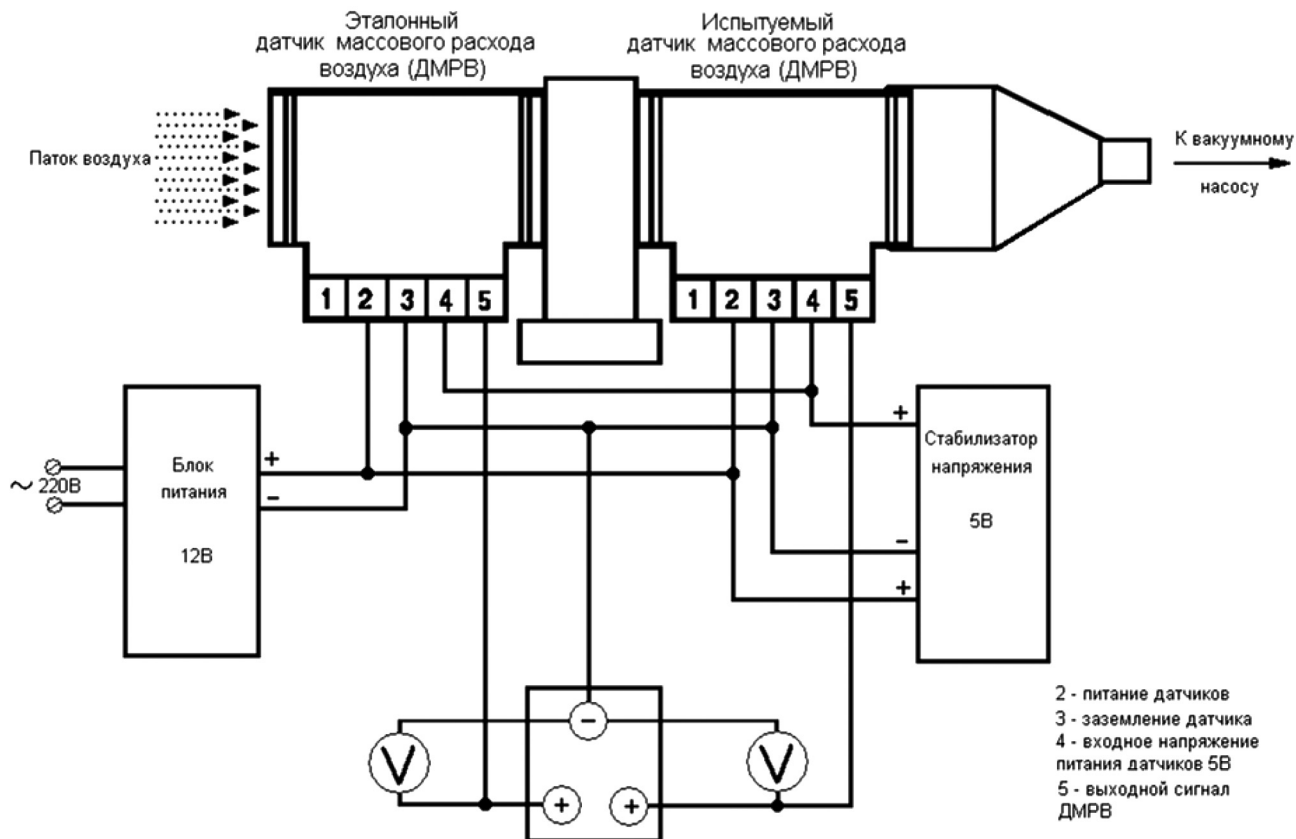


Рисунок – 1. Схема установки для испытания датчиков массового расхода воздуха

Таблица 1 – Результаты измерений исследуемых датчиков

Эксплуатационный пробег автомобиля, тыс. км	Напряжение покоя, В	Длительность переходного процесса, мс	Долговременный коэффициент коррекции	Наличие кода неисправности, Да/Нет
0 (новый датчик)	1,000	2,8	1,0	Нет
45	1,05	14,8	1,03	Нет
60	1,142	22,88	1,1	Нет

в момент включения замка зажигания и напряжения покоя при нулевом потоке воздуха, а также измерения длительности переходного процесса.

При измерении напряжения покоя и длительности переходного процесса использовались датчики BOSCH HFM5 с различным эксплуатационным пробегом автомобиля. Для сравнения результатов с эталонными значениями использовался новый датчик. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Согласно инструкции фирмы BOSCH, допуск на величину напряжения покоя находится в интервале 0,98 – 1,02 В. Если напряжение не соответствует допуску, то рекомендуется заменить датчик. Из таблицы видно, что только напряжение на новом датчике попадает в поле допуска. Однако на практике установлено, что датчики с напряжением покоя до 1,05 В продолжают достаточно надежно эксплуатироваться. Поэтому можно считать верхний порог напряжения покоя равным 1,05 В.

Более полная оценка эксплуатационной надежности проводилась осциллографом по результатам измерений длительности переходного процесса при подаче питания на ДМРВ. Поэтому сигнальный вывод датчика подключался к первому каналу, а ко второму каналу – масса датчика.

Для достижения напряжения покоя требуется определенное время, необходимое для прогрева терморезисторов датчика. Если переходный процесс происходит за 1 – 10 мс, то датчик можно считать исправным.

На рисунке 2 показана осциллограмма ДМРВ с пробегом автомобиля 60 тысяч километров.

Из рисунка 2 видно, что напряжение покоя составило 1,142 В, а длительность переходного процесса – 22,88 мс. Эти значения превышают максимально допустимые значения. При таких значениях топливная смесь значительно обогащается, и блок управления по сигналу датчика кислорода начинает увеличивать коэффициент коррекции самообучения, чтобы обеспечить стехиометрический состав смеси. Из таблицы 1 видно, что при напряжении покоя 1,142 В долговременный коэффициент коррекции принимает значение 1,1.

Одной из причин потери эксплуатационной надежности датчика является загрязнение чувствительного элемента. Слой загрязнений на чувствительном элементе уменьшает коэффициент теплопередачи между воздушным потоком и измерительными элементами датчика. Поэтому представляет интерес оценить влияние промывки чувствительного элемента датчика на изменение его параметров.

На рисунке 3 представлена осциллограмма выходного напряжения датчика после промывки. Для промывки ДМРВ использовалась специальная жидкость «Mass air flow». Жидкость безопасная и достаточно активная. После промывки чувствительный элемент датчика обдувался струей сжатого воздуха.

Из осциллограммы видно, что после промывки напряжение покоя датчика снизилось до 1,019 В и вернулось в поле допуска. Длительность переходного процесса составила 11,04 мс, что незначительно превышает допустимый предел в 10 мс.

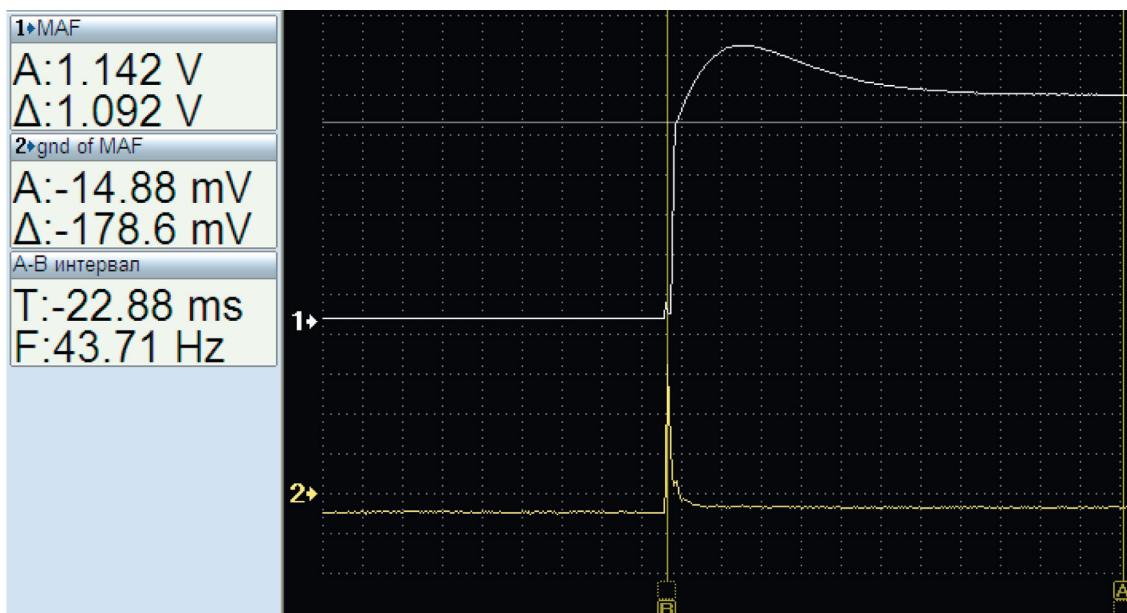


Рисунок – 2. Осциллограмма выходного напряжения датчика с пробегом автомобиля 60 тысяч километров

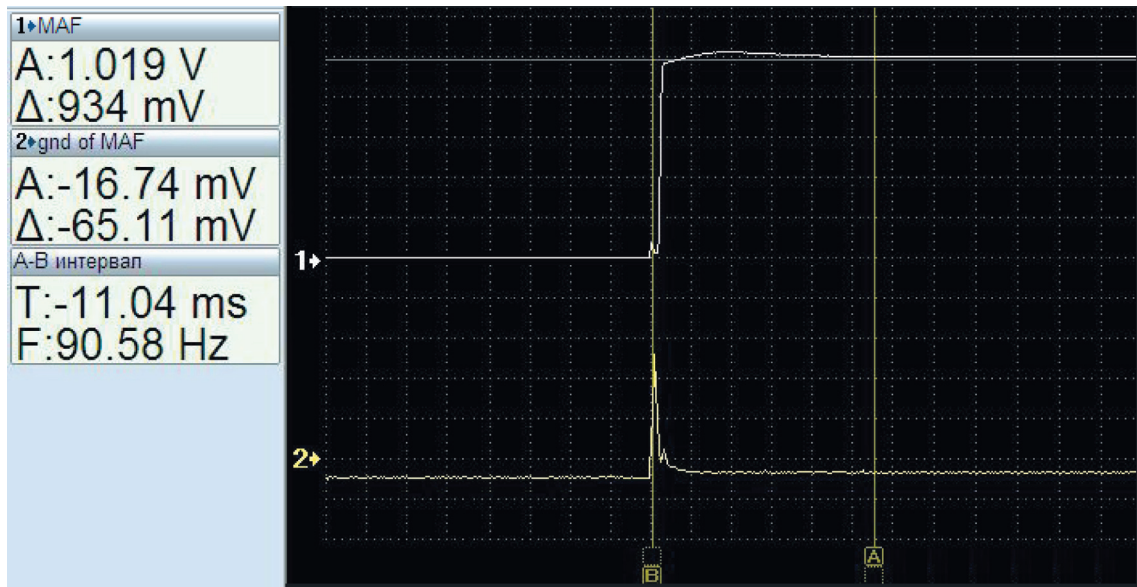


Рисунок – 3. Осциллограмма выходного напряжения датчика с пробегом автомобиля 60 тысяч километров после промывки чувствительного элемента

Повысить эксплуатационную надёжность рассматриваемых датчиков предлагается путем проведения коррекции калибровочной таблицы ДМРВ, записанной в памяти блока управления двигателем.

С помощью установки для испытания датчиков массового расхода воздуха (рисунок 1) подготавли-

вались исходные данные для проведения процедуры коррекции. Эталонный (новый) и испытуемый датчики помещались на общий патрубок вакуумного насоса, и ступенчато менялась величина расхода воздуха. При фиксированном расходе воздуха измерялось выходное напряжение датчиков. Полученные данные сводились в

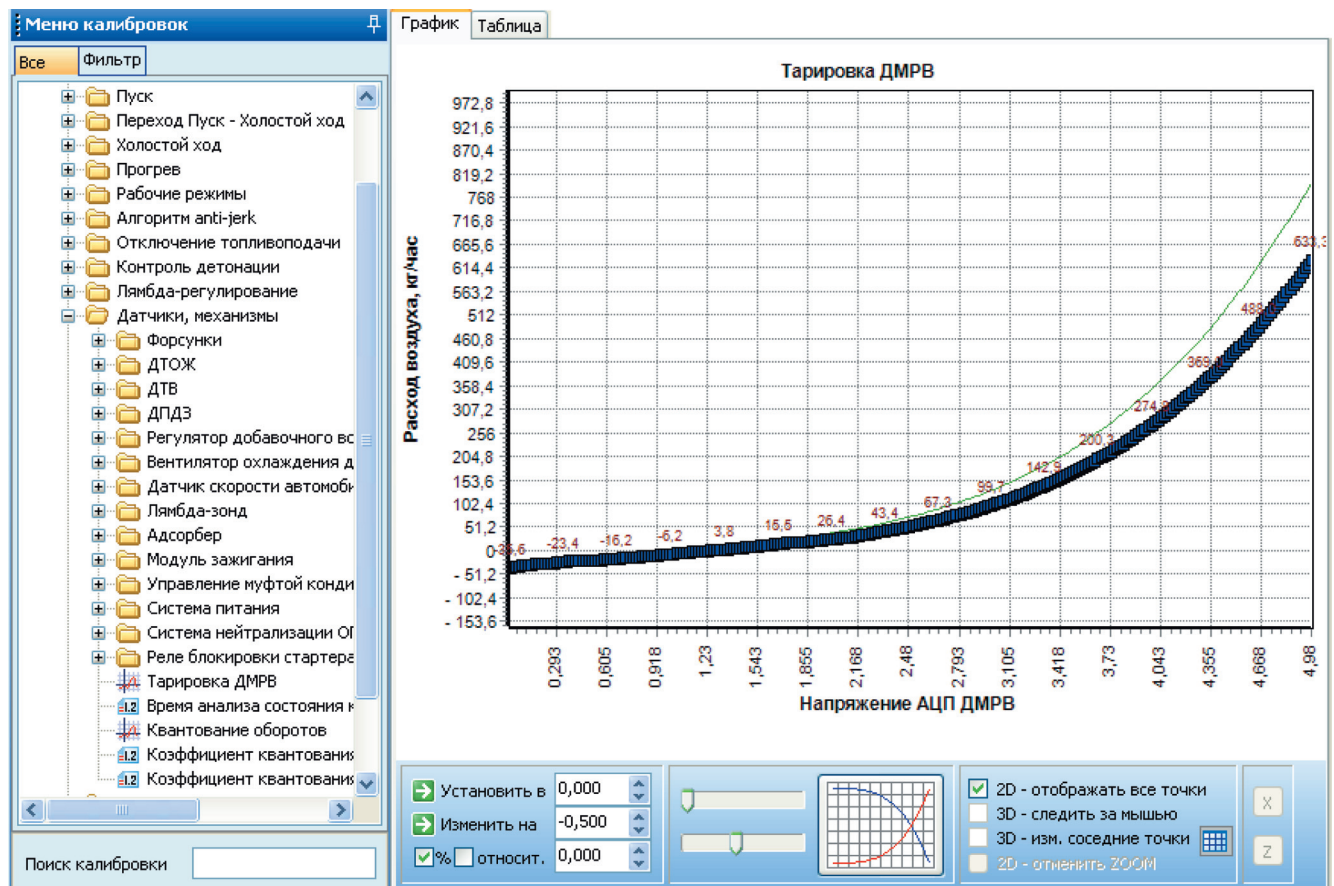


Рисунок – 4. Калибровочная карта «Тарировка ДМРВ» в программе «Chip Tuning PRO 7»

таблицу и обрабатывались с использованием программы редактора калибровок «Chip Tuning PRO 7». В таблице 2 представлены результаты испытаний нового датчика и датчика с пробегом автомобиля 60 тысяч километров после промывки.

Таблица 2 – Результаты испытаний (выходное напряжение) исследуемых датчиков

Эталонный ДМРВ, В	Испытуемый ДМРВ, В
1,00	1,019
1,64	1,73
3,73	4,36

В программе «Chip Tuning PRO 7» открывался файл прошивки, записанный в памяти блока управления, и загружалась карта калибровок «Тарировка ДМРВ». Калибровочная карта на рисунке 4 представлена в виде графической зависимости расхода воздуха Q_v и выходного напряжения датчика массового расхода воздуха $U_{\text{вых}}$.

Из таблицы 2 видно, что при расходе воздуха $Q_v = 0$ кг/ч эталонный датчик показывает напряжение $U_{\text{вых}} = 1,00$ В, а испытуемый датчик – 1,019 В. Поэтому коррекцию необходимо сделать так, чтобы при $U_{\text{вых}} = 1,019$ В расход воздуха соответствовал $Q_v = 0$ кг/ч. Последняя строчка таблицы соответствует напряжению для эталонного датчика $U_{\text{вых}} = 3,73$ В, а для испытуемого $U_{\text{вых}} = 4,36$ В. Напряжению $U_{\text{вых}} = 3,73$ В соответствует расход воздуха $Q_v = 271,9$ кг/ч. Поэтому коррекцию необходимо сделать так, чтобы при $U_{\text{вых}} = 4,36$ В расход воздуха соответствовал 271,9 кг/ч.

Процедура коррекции проводится в два этапа. На первом этапе исходная кривая графика смещается параллельно оси ординат (рисунок 4) так, чтобы при $U_{\text{вых}} = 1,019$ В расход воздуха соответствовал $Q_v = 0$ кг/ч. На втором этапе коррекции смещенную кривую графика необходимо вращать относительно точки с расходом воздуха $Q_v = 0$ кг/ч, поворачивая кривую графика до значения, когда при $U_{\text{вых}} = 4,36$ В расход воздуха будет соответствовать $Q_v = 271,9$ кг/ч.

На рисунке 4 видно два графика, отображающих тарировку ДМРВ до и после коррекции. Калибровочную карту, полученную после коррекции, сохраняют в файл прошивки ЭБУ.

На основании проведенных исследований, можно утверждать, что система самодиагностики блока управления двигателем не способна выявить снижение скорости реакции ДМРВ на изменение расхода воздуха. Поэтому такая неисправность не может быть обнаруже-

на путём считывания кодов неисправностей из блока управления и может быть определена только путём оценки коэффициентов коррекции топливopодачи с помощью сканера и измерения длительности переходных процессов с применением осциллографа.

Повысить эксплуатационную надежность ДМРВ можно путем промывки чувствительных элементов датчиков специальными моющими растворами, а после промывки использовать коррекцию калибровочных карт «Тарировка ДМРВ», записанных в памяти электронных блоков управления.

Библиографический список

1. Датчики в автомобиле. Серия: Автомобильная техника. Bosch. Типы датчиков, устройство, принцип работы. Конрад Райф, М.: Издательство: «За рулем», 168 с.
2. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту. Система управления двигателями ВАЗ – 2111, 21214-11 с распределённым последовательным впрыском топлива, нормы токсичности ЕВРО-2. Дирекция по техническому развитию АО АВТОВАЗ. 2004. – 175 с.
3. Взаимозаменяемость новых узлов и деталей автомобилей ВАЗ. Издательство: Третий Рим. 2003. 160 с.
4. Плаксин А.М., Гриценко А.В., Граков Ф.Н., Глемба К.В., Лукомский К.И. Диагностирование системы впуска автомобильных двигателей внутреннего сгорания методами тестового диагностирования // Фундаментальные исследования. 2014. № 8-5. С. 1053-1057.
5. Гриценко А.В., Ларин О.Н., Глемба К.В. Диагностирование датчиков массового расхода воздуха легковых автомобилей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2013. Т. 13. № 2. С. 113-118.

Сведения об авторах

Михаил В. Горбань – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных средств и процессов, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ, Пятигорск, Россия, e-mail: evgeneip@bk.ru

Евгений А. Павленко – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных средств и процессов, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ, Пятигорск, Россия, e-mail: gorban.mihail@mail.ru

Поступила 06.02.2017

Исследование проводящих материалов с помощью многочастотной измерительной системы на основе сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей

Сергей Ф. Дмитриев, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Алтайский край, Барнаул, Россия

Алексей В. Ишков, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Алтайский край, Барнаул, Россия

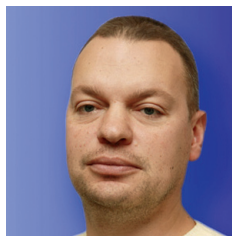
Александр О. Катасонов, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Алтайский край, Барнаул, Россия

Владимир Н. Маликов, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Алтайский край, Барнаул, Россия

Анатолий М. Сагалаков, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Алтайский край, Барнаул, Россия



Сергей Ф.
Дмитриев



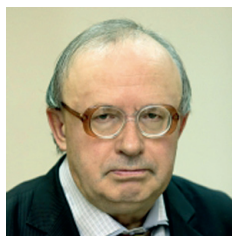
Алексей В. Ишков



Александр О.
Катасонов



Владимир Н.
Маликов



Анатолий М.
Сагалаков

Резюме. На основе вихретокового преобразователя трансформаторного типа изготовлена измерительная система, позволяющая оценить возможность использования вихретокового метода для поиска локальных дефектов изделий, изготовленных из сплава алюминий-магний. Приведена конструкция сверхминиатюрного вихретокового преобразователя (ВТП) трансформаторного типа с возбуждающей, измерительной и компенсационной обмотками, основанного на сердечнике пирамидальной формы, обеспечивающего локализацию магнитного поля на участке порядка 2500 мкм². Особенность измерительной системы состоит в возможности поиска дефектов глубокого (до 5 мм) залегания. Приведены основные параметры преобразователя, позволяющие обеспечить данную локализацию магнитного поля (форма, материал и размеры сердечников, количество обмоток и число используемых витков). В работе описан процесс подготовки и использования нескольких ВТП с различными параметрами сердечника и обмоток. Благодаря этому ВТП позволяли генерировать различное электромагнитное поле и реагировать на изменения этого поля с разной эффективностью. Установлены оптимальные размеры ВТП для решения задачи поиска дефектов в сплавах алюминий-магний (форма сердечника – пирамида, диагональ основания – 400 мкм, длина ребра – 4 мм, число витков возбуждающей обмотки – 20, измерительной – 200, компенсационной – 200±40). Описана конструкция измерительной системы и методика измерений, позволяющая определять местонахождение дефектов, имеющих линейные размеры от 0,25 мм и залегающих на глубине от 5 мм в зависимости от сигнала, получаемого с вихретокового преобразователя. Измерительная система включает в себя два сверхминиатюрных преобразователя, управляемых специальным программным обеспечением, реализованным на языке C++. Напряжение на возбуждающей обмотке создавалось при помощи генератора прямоугольных колебаний, подвергавшихся интеграции. Данная конструкция позволила создавать магнитное поле, максимально очищенное от помех. Напряжение возбуждающей обмотки варьировалось от 2 до 3 В. Выходной сигнал преобразователей подвергался обработке в аппаратной системе фильтрации, описанной в статье. Особенностью измерительной системы является синхронное изменение частоты генерации и частоты фильтрации измерительного сигнала. Благодаря этому происходит эффективное выделение полезного сигнала, несущего информацию о дефектах объекта контроля. Приведены данные, демонстрирующие зависимости амплитудной части сигнала от дефектов различных размеров, и экспериментально установлены предельные размеры дефектов, при которых данные измерения возможны. Исследовались объекты, представляющие из себя пластины алюминий-магний (Al – 94%, Mg – 3%). Изменения амплитуды линейными размерами дефектов и глубиной их залегания. Характер данных изменений позволяет определить параметры дефектов. В зависимости от размеров и глубины залегания дефектов, изменения амплитуды при прохождении преобразователя над дефектом составляли от 2,5 В (для дефекта шириной 0,25 мм, залегающего на глубине 1 мм) до 0,1 В (для дефекта шириной 0,25 мм, залегающего на глубине 5 мм).

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, алюминий-магний, сердечник, дефект, сплавы.

Формат цитирования: Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Катасонов А.О., Маликов В.Н., Сагалаков А.М. Исследование проводящих материалов с помощью многочастотной измерительной системы на основе сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 49-52. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-49-52

Введение

Методы и средства неразрушающего вихретокового контроля применимы для поиска дефектов в изделиях из любых электропроводящих материалов. Такое измерение позволяет при необходимости исследовать в заводских условиях каждое выпускаемое изделие.

Сплавы дюралюминий и алюминий-магний нашли широкое применение в современном производстве, зачастую – в аэрокосмической отрасли и т.д. За счет одно-временной прочности и легкости данные сплавы широко применяют также при изготовлении скоростных поездов, в частности, поездов Синкансэн, и в ряде других отраслях машиностроения. Дюралюминий также часто применяется в электротехнической, химической и пищевой отрасли промышленности, в радиотехнике, строительстве. Сплав Д16АМ используется в экстремальных условиях при низких температурах, дюралюминий Д16Т обладает высокой пластичностью, чем обусловлено его широкое применение в судостроении.

Контроль качества данных сплавов и изготовленных на их основе изделий становится актуальным. Исследования в данной области постоянно развиваются.

При анализе исследований становится видна тенденция к уменьшению размеров (миниатюризации) вихретоковых преобразователей (ВТП), используемых для контроля качества сплавов [1-6]. Так, известна методика, позволяющая разрабатывать преобразователи размером 5×5 мм, с диаметром проволоки в 0,15 мм. Однако подобные преобразователи не позволяют обеспечивать требуемую глубину проникновения магнитного поля и необходимую локализацию для локальных измерений в неоднородных проводящих средах. С целью увеличения локализации магнитного поля зачастую применяются ферритовые сердечники. Подобная конструкция способствует значительному снижению разброса вихревых токов. Данная конструкция позволяет обеспечить глубину проникновения поля в 2,5 мм.

Известны различные конструкции накладных ВТП, рабочая поверхность которых выполнена в виде плоскости или полусферы. Такая поверхность обеспечивает удовлетворительный контакт преобразователя с контролируемой поверхностью, но величина вносимого в преобразователь напряжения сильно зависит от кривизны контролируемой поверхности. Кроме того, значительное влияние на работу преобразователя оказывает краевой эффект, что не позволяет контролировать детали сложной конфигурации и малых размеров. Для решения этих проблем ВТП зачастую снабжается дополнительным магнитопроводом, один конец которого имеет форму усеченного конуса. Недостатком подобного решения является то, что, несмотря на увеличившуюся локализацию магнитного потока, значительно усложнилась конструкция магнитопровода. Это ухудшает точность измерения контролируемого параметра, ибо выходной сигнал преобразователя в сильной степени зависит от взаимодействия двух магнитопроводов, которые могут оказывать непредсказуемое влияние

на усиление поля вихревых токов, несущих информацию об объекте контроля [7].

Изготовление подобных приборов требует создания специальной технологической линии, из-за чего существенно возрастает конечная стоимость производимого прибора. С целью уменьшения стоимости прибора возникла идея замены дорогих аппаратных блоков на персональные компьютеры со специализированным программным обеспечением.

Конструктивное исполнение датчика

Разработан сверхминиатюрный ВТП для локального контроля физических параметров при исследовании свойств пластин из алюминиевых сплавов и сварных швов. Достоинством данного преобразователя является возможность, в отличие от аналогичных приборов, проводить локальные измерения на участках площадью порядка сотен микрометров и на глубинах порядка 5 мм. Непосредственно измеряемым параметром является электрическая проводимость материала и ее распределение по поверхности и толщине исследуемого объекта [8].

Возбуждающая обмотка диаметром $D_1 = 0,12 \div 0,13$ мм сверхминиатюрного преобразователя состоит из 10 витков медной проволоки с поперечным сечением площадью 5 мкм^2 . Измерительная обмотка диаметром $0,05 \div 0,08$ мм состоит из 130 витков медной проволоки с поперечным сечением площадью 20 мкм^2 . Для минимизации влияния возбуждающей обмотки на получаемый сигнал в схему включена компенсационная обмотка из 20 витков медной проволоки с поперечным сечением площадью 5 мкм^2 , подключенная к измерительной обмотке таким образом, что напряжение возбуждающей обмотки вычитается из результата. Обмотки наматываются на пирамидальный сердечник из феррита 2000 НМ3 с относительной магнитной проницаемостью $\mu_{\max} = 500$ или (при необходимости более высокой локализации магнитного поля) из отожженного по специальной методике сплава 81НМА. Сердечник представляет собой четырехгранную пирамиду высотой 1 мм со стороны основания 0,2 мм. Измерительная обмотка располагается на конце пирамиды, благодаря чему улучшается локализацию магнитного поля. Параметры сконструированных преобразователей способствуют эффективной локализации магнитного поля и возможности его использования для анализа дефектов от 250 мкм. Также преобразователи позволяют добиться значительной глубины проникновения магнитного поля в изучаемый объект при условии работы на достаточно низких частотах.

Трансформаторный накладной ВТП состоит из сердечника, выполненного в виде пирамиды. На пирамидальные сердечники наносятся проволоочные катушки. Катушки пропитаны компаундом при температуре пропитки 200 градусов Цельсия, диаметр проволоки $1,5 \times 10^{-6}$ м. Измерительная обмотка расположена на конце острия пирамиды, диаметр обмотки 0,05 мм, число витков варьируется от

100 до 200. В середине пирамиды расположена возбуждающая обмотка, которая содержит один виток. Компенсационная обмотка расположена на подвижном каркасе и содержит от 100 витков. Было создано 10 ВТП и проведена их настройка для того, чтобы вычесть наводимое в измерительную обмотку напряжение от генераторной обмотки. Целью создания различных ВТП являлось получение магнитного поля разной напряженности, из-за этого сердечники изготавливались с разными размерами. Соотношение диагонали основания и ребра пирамиды колебалось от 1:1 до 1:10 (рисунок 1).

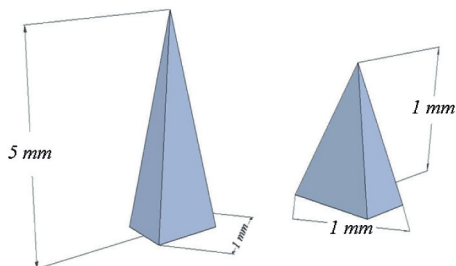


Рисунок – 1. Сердечники, имеющие различные размеры

ВТП, сконструированные на основе сердечников, имеющих одинаковое соотношение диагонали основания (400 мкм) и длины ребра (4 мм), были откалиброваны на полупроводниках с известной проводимостью. Таким образом, ВТП имеют одинаковые геометрические параметры сердечников и одинаковое количество витков возбуждающей (20 витков), измерительной (200 витков) и компенсационной (200 ± 40 витков) обмоток.

Измерительная система, построенная на основе миниатюрного ВТП, работает следующим образом. Программное обеспечение персонального компьютера управляет работой генератора, который формирует последовательность прямоугольных импульсов напряжения с частотой следования f_1 , необходимой для работы ВТП. Импульсы напряжения с выхода генератора передаются на два последовательно включенных интегратора, после чего направляются на вход усилителя мощности. С выхода усилителя мощности импульсы напряжения поступают на возбуждающие катушки индуктивности ВТП. Разность выходных напряжений измерительных катушек преобразователей несет информацию о структурных неоднородностях объекта контроля, находящихся в зоне действия магнитного поля ВТП, она выделяется и усиливается в специальном микрофонном усилителе. Сигнал поступает на амплитудный детектор после прохождения двух последовательно подключенных качественных фильтров нижних частот и двух последовательно подключенных селективных усилителей. Далее сигнал через аналого-цифровой преобразователь передается на персональный компьютер. Благодаря одновременному управлению частотой генерируемого сигнала на возбуждающей катушке и частотой среза системы фильтрации, а также селективному усилению происходит выделение полезного сигнала, несущего

информацию о распределении электропроводности внутри объекта, в частности, о возможных дефектах объекта [9-10]. Программное управление позволяет изменять рабочую частоту измерительной системы так, чтобы сигнал, получаемый с измерительной обмотки, был надежно зарегистрирован.

Результаты экспериментов

С целью оценки максимальной глубины залегания и линейных размеров дефектов, для нахождения которых целесообразно использовать вихрековый метод контроля, были подготовлены образцы с модельными дефектами.

Образцы представляли из себя пластины из сплава Al-Mg (Al – 94%, Mg – 3%). Толщина первой пластины составляла 5,5 мм, в ней содержалось 3 дефекта в виде прорези толщиной в 1 мм, залегающих на глубине 1, 3 и 4 мм (рисунок 2, а). Толщина второй пластины составляла 5,5 мм, в ней содержалось 6 дефектов в виде прорези толщиной в 0,25 мм, залегающих на глубине 1, 2, 3, 4, 5 и 5,3 мм (рисунок 2, б).

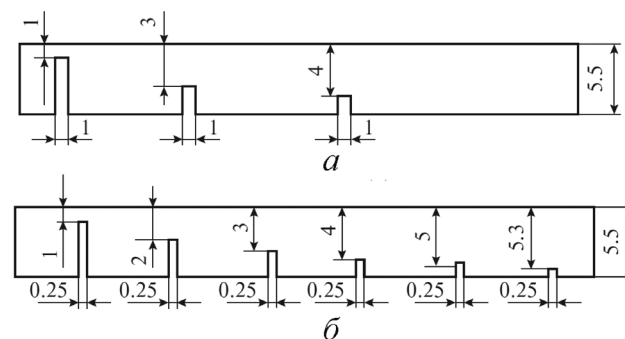


Рисунок – 2. Пластины № 1 и № 2 (вид сбоку)

С целью определения чувствительности датчика к дефектам, залегающим в глубине металла, осуществляли сканирование с бездефектной стороны образца.

При проведении экспериментов с первой пластиной величина вносимого напряжения на возбуждающую обмотку преобразователя составляла 2 В.

Результаты исследований первой пластины с дефектами, имеющими толщину 1 мм, при частоте 500 Гц и амплитуде сигнала 2 В позволили явно обнаружить все 3 прорези по падению амплитуды сигнала (рисунок 3, а): на первом дефекте оно составляло величину порядка 0,75; на втором – 0,2; на третьем – 0,1 В.

Результаты исследования второй пластины при частоте 500 Гц и амплитуде сигнала 3 В позволили обнаружить пять дефектов (рисунок 3, б). Падение амплитуды сигнала на первом дефекте составляло 2,5; на втором – 1, на третьем – 0,4; на четвертом – 0,2; на пятом – 0,1 В. Изменения отклика сигнала при прохождении над шестым дефектом не зафиксировано в силу его малой величины.

Результаты эксперимента показывают эффективность разработанной измерительной системы для поиска дефектов толщиной от 0,25 мм; залегающих на глубине до 5 мм.

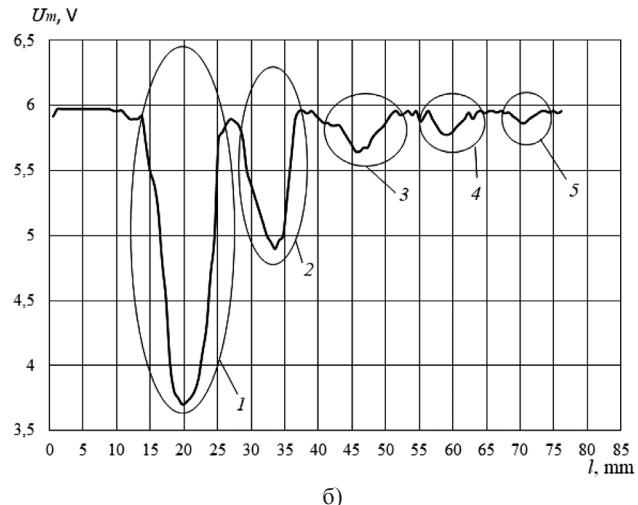
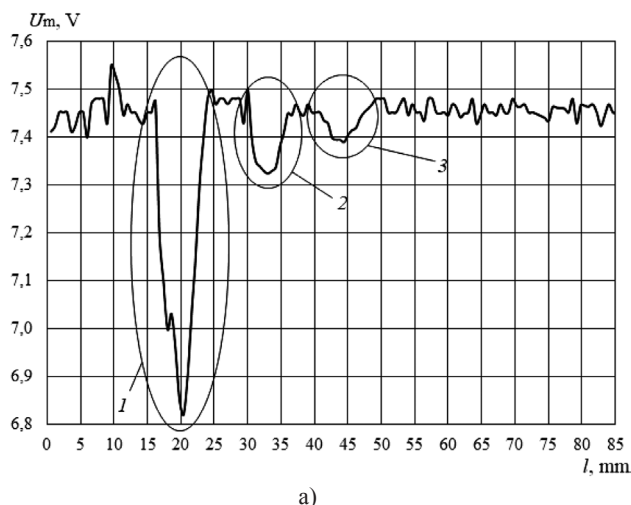


Рисунок – 3. Результаты сканирования пластин № 1 (а) и № 2 (б). U_m – величина напряжения, вносимого в измерительную обмотку преобразователя, l – координата преобразователя относительно начала объекта контроля

Заключение

Разработанная измерительная система, основанная на сверхминиатюрных ВТП, позволяет добиться большей локализации электромагнитного поля в сравнении с известными ранее аналогичными системами.

Пирамидальная форма сердечника, система полосовых фильтров и наличие селективного усиления позволяют существенно снизить уровень помех и добиться значительной глубины проникновения вихревых токов в исследуемый объект. Разработанные ВТП позволяют эффективно производить сканирование сварных швов титановых сплавов и анализировать их качество. Сканирование дефектов в алюминиевых сплавах позволяет обнаруживать дефекты с линейными размерами порядка 100 мкм, лежащими на глубине до 5 мм. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать измерения и производить оперативное изменение рабочей частоты прибора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта – 17-48-220044) «Создание и исследование высокоэффективных композиционных и наноструктурированных упрочняющих покрытий».

Библиографический список

1. Prance, R.J., Clark, T.D., and Prance, H., Ultra_low noise induction magnetometer for variable temperature operation, *Sens. Actuators*, vol. 85, pp. 361–364.
2. Prance, R.J., Clark, T.D., and Prance, H., Compact room temperature induction magnetometer with super conducting quantum interference level field sensitivity, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 74, pp. 3735–3739.
3. Semenov, V.S., Ryabtsev, A.P., and Mudrov, A.E., Electromagnetic flaw detection and testing methods in Siberian Physicotechnical Institute and Tomsk State University, *Vestn. Tekhn. Gos. Univ.*, no. 278, 2003, pp. 48–54.
4. Barbato, L., Poulakis, N., Tamburrino, A., and Theodoulidis, T., Ventre. solution and extension of a new benchmark problem for eddy current nondestructive testing, *IEEE Trans. Magn.*, Jul. 2015, vol. 51, no. 7:1–1.

5. Rocha, Tiago J., Ramos, H.G., Ribeiro, A.L., and Pasadas, D.J., Magnetic sensors assessment in velocity Induced eddy current testing, *Measurement*, Feb. 2015.

6. Litvinenko A.A., RU Patent no. 2231287.

7. Lee K H, Baek M K and Park I H 2012 Estimation of deep defect in ferromagnetic material by low frequency eddy current method *IEEE Transactions on Magnetics* 48 3965–3968.

8. Klyuev, V.V., *Nerazrushayushchii kontrol' (Nondestructive Testing)*, Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, vol. 2, books 1–2.

9. Malikov V.N., Davydchenko M. A., Dmitriev S. F. and Sagalakov A. M., Subminiature eddy-current transducers for conductive materials research, *Proc. of Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, Tomsk*

10. Dmitriev S.F., Malikov V.N., Sagalakov A.M., Shevtsova L.I. and Katasonov A.O. Subminiature eddy current transducers for studying semiconductor material, *Journal of Physics: Conference Series* 643

Сведения об авторах

Сергей Ф. Дмитриев – доцент, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», доцент кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский край, Барнаул, Россия, e-mail: dmitrfsf@gmail.com

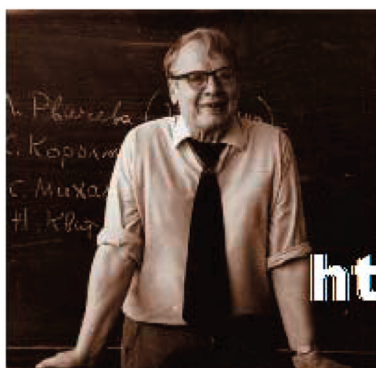
Алексей В. Ишков – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», профессор кафедры технологии конструкционных материалов и ремонта машин, Алтайский край, г. Барнаул, Россия, e-mail: buvarion@mail.ru

Александр О. Катасонов – ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», студент, Алтайский край, Барнаул, Россия, e-mail: ivenir4000@gmail.com

Владимир Н. Маликов – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», преподаватель кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский край, Барнаул, Россия, e-mail: osys11@gmail.com

Анатолий М. Сагалаков – доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», профессор кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский край, Барнаул, Россия, e-mail: sagalakovam@mail.ru

Поступила 18.08.2017



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

Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» (“Reliability: Theory & Applications”).

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.



Вступайте в Форум
Гнеденко!

Добро

пожаловать!

В наших рядах уже более

500 специалистов

из **44** стран мира.

Для вступления в
Форум присылайте
фото и краткое резюме
по адресу:

к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Письмо от организации, где работает автор(ы), либо лично от автора(ов) с предложением о публикации статьи направляется в редакцию журнала по 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 приставным библиографическим списком, предоставляется с одним комплектом рисунков

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

Информация о каждом авторе должна содержать следующие стандартные сведения:

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

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется. Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter. Текст статьи набирается через полтора интервала на странице формата A4; слева должно быть поле 2 см; страницы нумеруются, «красная строка» обязательна.

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

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

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

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

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

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

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

Вниманию авторов, публикующихся в журналах IDT Publishers.

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

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

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

Подписаться на журнал можно:

- Через агентство «Роспечать» — индекс 81733;

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

- Через редакцию на любой срок
тел.: 8-916-105-81-31
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

НАДЁЖНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ

И.Б. ШУБИНСКИЙ

Надежные отказоустойчивые информационные системы

Методы синтеза



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

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.

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

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