

На правах рукописи



НГО ЗЮИ ДО

**ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НАДЕЖНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2016

Работа выполнена на кафедре «Информатика и математическое моделирование»
ФГБОУ ВО «Иркутский аграрный университет имени А.А. Ежевского»

Научный руководитель:

Краковский Юрий Мечеславович

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Информационные системы и защита
информации» ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты:

Батурин Владимир Александрович

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФГБУН «Институт
динамики систем и теории управления имени
В.М. Матросова» Сибирского отделения
Российской академии наук

Кедрин Виктор Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теория вероятностей и дискретная математика»
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный
университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»

Защита состоится 21 июня 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по
адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 24, корпус 9, зал заседаний ученого
совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Байкальского
государственного университета по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ,
корпус 2, аудитория 101, (www.bgu.ru).

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск,
ул. Ленина 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «__»_____2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Т.И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие техники и технологий привело к созданию и совершенствованию методов и средств обеспечения надежного функционирования систем различного назначения, включая системы, имеющие структуру. При решении вопросов надежности существенное значение имеет использование математических, статистических и компьютерных средств и технологий. Исследованию показателей надежности и техническому обслуживанию оборудования посвящена значительная по числу и многообразию литература. При этом можно отметить следующих отечественных и зарубежных специалистов, внесших существенный вклад в теорию надежности: Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.К., Болотин В.В., Гнеденко Б.В., Дружинин Г.В., Каштанов В.А., Острейковский В.А., Ушаков И.А., Байхельт Ф., Богданофф Дж., Франкен П. и др.

Диссертационное исследование основано на базовой предпосылке структурной теории надежности о том, что более обосновано постулировать законы распределения времени наработки и восстановления компонент сложного оборудования, а не самого оборудования. Это связано с тем, что компоненты характеризуются единой элементной базой, единообразными техническими решениями, что и позволяет описывать их выбранными законами распределения.

Далее, используя функциональные связи компонент, особенности их технического обслуживания и ремонта, средствами компьютерного моделирования создаются выборочные значения для времени наработки, восстановления и цикла относительно оборудования, как объекта. Отметим отечественных и зарубежных специалистов, внесших вклад в развитие методов компьютерного (имитационного) моделирования, включая численный вероятностный анализ: Добронев Б.С., Ермаков С.М., Краковский Ю.М., Нейман В.Г., Попова О.А., Цвиркун А.Д., Цисарь И.Ф., Филиппов В.А., Кельтон В., Лоу А., Прицкер А. и др.

Учитывая значимость количественной оценки показателей надежности современного сложного многокомпонентного оборудования, предлагаемое диссертационное исследование является важной задачей при решении научных и прикладных вопросов, основанных на математическом моделировании, численных методах и комплексах программ.

Все выше сказанное обосновывает актуальность выбранной темы диссертационной работы и позволяет сформулировать ее цель и задачи.

Целью диссертационной работы является разработка численных моделей и вычислительных алгоритмов, а также реализация их в виде программного комплекса для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования на основе компьютерного моделирования.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести формализацию восстанавливаемого многокомпонентного оборудования, на основе которой разработать постановку и технологию комплексного исследования его показателей надежности средствами численного вероятностного анализа.
2. Создать численные модели и вычислительные алгоритмы оценки показателей надежности многокомпонентного оборудования для различных вариантов его технического обслуживания по результатам вычислительного эксперимента на имитационной модели.
3. Разработать численные алгоритмы оценки показателей надежности оборудования на основе результатов его натурных испытаний.

4. Создать программный комплекс, содержащий имитационную модель и реализующий разработанное алгоритмическое обеспечение для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования.

5. Провести комплексное исследование показателей надежности оборудования на основе компьютерного моделирования по различным исходным данным.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертационной работе является многокомпонентное восстанавливаемое оборудование различного назначения. Предмет диссертационного исследования – методы численного вероятностного анализа применительно к вычислению показателей надежности многокомпонентного восстанавливаемого оборудования на основе результатов его компьютерного моделирования.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18: п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», п. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования».

Методы исследования и достоверность результатов. При решении поставленных задач в работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, численные и вероятностно-статистические методы, а также методы объектно-ориентированного программирования. Для реализации программного обеспечения вычисления показателей надежности использовался язык программирования пакета MATLAB. Достоверность результатов, полученных в ходе проведения комплексного исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования на исходных данных различного объема, подтверждена их сравнением с фактическими, заранее известными результатами, полученными в результате тестирования по типовым распределениям.

Научную новизну диссертации представляют следующие положения, которые выносятся на защиту:

1. Формализованное описание восстанавливаемого многокомпонентного оборудования, включающее технологию комплексного исследования показателей надежности средствами численного вероятностного анализа.

2. Численные алгоритмы, как разновидность численного вероятностного анализа, для оценки основных показателей надежности восстанавливаемого многокомпонентного оборудования по результатам его компьютерного моделирования.

3. Вычислительные алгоритмы, как разновидность численного вероятностного анализа, для оценки коэффициента оперативной готовности, параметра потока отказов и функции отказов восстанавливаемого многокомпонентного оборудования по результатам его компьютерного моделирования.

4. Программный комплекс исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования, учитывающий варианты его технического обслуживания, режимы получения статистических данных и реализующего разработанные численные модели и вычислительные алгоритмы.

Практическая значимость. Практическая значимость результатов исследования заключается в создании и применении численных моделей и вычислительных алгоритмов, а также реализация их в виде программного комплекса для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования на основе компьютерного модели-

рования. Созданный программный комплекс апробирован на различных исходных данных, характеризующих надежность многокомпонентного оборудования. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе, о чем имеется справка о внедрении.

Разработанные алгоритмы и созданное на их основе программное обеспечение могут найти применение при решении практических задач в других предметных областях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: региональная НПК «Современные проблемы и перспективы развития АПК» (Иркутск, 2014); VII всероссийская НПК (с международным участием) «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (Томск, 2014); международная НПК молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск, 2015); международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2015); международная НПК «Современные научные достижения» (Прага, 2016).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 научных работ в виде статей и докладов, включая два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Из них 5 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, число публикаций без соавторов – 3.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований. Общий объем работы составляет 140 страниц, 48 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена научная и практическая новизна, представлено краткое содержание диссертационной работы по главам.

В первой главе обоснована необходимость комплексного исследования показателей надежности сложного оборудования. При этом приведены основные термины и определения теории надежности, приведены основные показатели невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов. Пусть наработка T является случайной величиной. Тогда она описывается функцией распределения, плотностью распределения вероятностей и числовыми характеристиками. При определении закона распределения вероятностей для наработки используется два основных подхода: 1) Исходя из статистических данных, постулируется и обосновывается закон распределения вероятностей для наработки. Здесь, как правило, используются типовые законы: нормальный, гамма, Вейбулла и др. 2) Обосновывается модель изменения параметра технического состояния объекта, исходя из которой, аналитически выводится закон распределения вероятностей для наработки. В этом направлении используются распределения Бирнбаума-Саундерса, обратный гауссовский и др.

Приведены основные понятия численного вероятностного анализа, как раздела вычислительной математики, предметом которого является решение задач со стохастическими неопределенностями в данных с использованием численных операций над плотностями вероятностей случайных величин и их функций. Обоснована возможность применения численного вероятностного анализа для оценки показателей надежности сложного оборудования на основе компьютерного моделирования. Результатом первой главы является формулировка цели и задач диссертационного исследования.

Во второй главе описано созданное алгоритмическое и программное обеспечение комплексного исследования показателей надежности восстанавливаемого многокомпонентного оборудования. В соответствии с особенностями технического обслуживания

компонент, выделим среди восстанавливаемого оборудования три варианта, различающиеся показателями и методами оценки показателей надежности.

Вариант *A*: при отказе оборудования происходит восстановление только отказавшей компоненты, временем восстановления можно пренебречь (считаем, что среднее время восстановления любой компоненты значительно меньше среднего времени ее наработки). В этом случае многокомпонентное оборудование характеризуется временем его наработки. Вариант *B*: при отказе оборудования происходит восстановление всех компонент, временем восстановления можно пренебречь (считаем, что суммарное среднее время восстановления компонент значительно меньше среднего времени любой наработки). В этом случае многокомпонентное оборудование характеризуется временем его наработки. Вариант *C*: при отказе оборудования происходит восстановление всех компонент, время восстановления учитывается (считаем, что суммарное среднее время восстановления компонент соизмеримо меньше среднего времени любой наработки и его надо учитывать). В этом случае многокомпонентное оборудование характеризуется временем его наработки, восстановления и цикла, как суммы наработки и восстановления после каждого отказа. При первичной обработке выборок для всех вариантов определяются точечные и интервальные оценки математического ожидания наработки, восстановления или цикла.

Дополнительно рассмотрен режим испытания оборудования, когда для оценки показателей надежности используются не результаты компьютерного моделирования, а результаты его натуральных испытаний. Показатели надежности предложено разделить на две группы: 1) основные, которые присущи оборудованию не зависимо от варианта обслуживания; 2) дополнительные, которые зависят от варианта обслуживания.

К основным показателям надежности отнесено: средняя наработка между отказами; гамма-процентный ресурс; средний остаточный ресурс; гамма-процентный остаточный ресурс. К дополнительным показателям отнесено: а) для вариантов *A* и *B* – параметр потока отказов и функция отказов, б) для варианта *C* – параметр потока восстановления, функция восстановления, коэффициент оперативной готовности и коэффициент готовности. В качестве вероятностных моделей для времени наработки и восстановления в работе обоснованы следующие распределения: нормальное (N); усеченное нормальное на интервале $(0; +\infty)$ (UN); логарифмически нормальное (LN); Вейбулла (W); Бирнбаума-Саундерса (BS); гамма (G).

Исследование показателей надежности многокомпонентного оборудования является комплексным, т.к. имеется возможность изменять следующие факторы: 1) варианты технического обслуживания; 2) исходные данные, включая число компонент, тип вероятностных моделей; 3) показатели надежности (основные или дополнительные); 4) методы оценки показателей надежности (аналитические или численные).

Чтобы использовать аналитический подход, по статистическим данным необходимо подобрать теоретическое распределение. В практике математической статистики для этой задачи используются критерии согласия. В работе для случая небольшого объема выборки (режим испытаний) рекомендован модифицированный критерий Колмогорова, а для большого объема выборки (режим компьютерного моделирования) – критерий Пирсона (χ^2).

В общем случае, если не удастся подобрать теоретический закон, предлагается численный метод определения показателей надежности, который является научной новизной работы.

Разобьем наблюдаемый интервал наработки $(0, b)$ узлами на J подинтервалов длиной

$$\Delta t = b/J; t_j = j \cdot \Delta t, j = \overline{1, J}, t_0 = 0; t_j = b.$$

Введем следующие обозначения: n_j – число выборочных значений, попавших в подинтервал (t_{j-1}, t_j) (частоты), $\sum_{j=1}^J n_j = n$, n – объем выборки; $m_j = \sum_{i=1}^j n_i / n$ – накопленные относительные частоты, $m_J = 1$;

$$k_j = 1 - m_j; j = \overline{1, J}, k_0 = 1. \quad (1)$$

В математической статистике при обработке экспериментальных данных используется ступенчатая аппроксимация для функции распределения.

В этом случае статистическая вероятность безотказной работы

$$P^c(t) = k_j, t_{j-1} \leq t < t_j, j = \overline{1, J}; \quad (2)$$

$$P^c(0) = k_0 = 1; P^c(t) = 0, t_{j-1} \leq t < t_j.$$

Заменим ступенчатую аппроксимацию линейной, которая широко используется в численных методах. Переход от ступенчатой к непрерывной вероятности безотказной работы, является первым этапом перехода к численному вероятностному анализу. В этом случае численную вероятность безотказной работы получим как совокупность отрезков прямых, соединяющих точки (t_j, k_j)

$$P_r(t) = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ k_{j-1} + (t - t_{j-1})(k_j - k_{j-1})J/b, & t_{j-1} \leq t < t_j, j = \overline{1, J} \\ 0, & t \geq b \end{cases} \quad (3)$$

Численная средняя наработка с учетом (3)

$$\bar{t}_r = \int_0^b P_r(t) dt = \frac{b}{J} (0,5 + \sum_{j=1}^J k_j). \quad (4)$$

Численный гамма-процентный ресурс с учетом (3)

$$P_r(t) = \gamma \rightarrow t_r(\gamma) = t_{j-1} + (\gamma - k_{j-1})b / [(k_j - k_{j-1})J], \quad (5)$$

где $k_{j-1} \geq \gamma > k_j, j = \overline{1, J}$. Рекомендуемое значение для вероятности $\gamma - (0,9 - 0,95)$.

Остаточный ресурс при условии, что до времени x объект не достиг предельного состояния

$$Y_x = T - x. \quad (6)$$

Введем статистическую вероятность безотказной работы для остаточного ресурса

$$P_x^c(y) = p_j(i) = k_{j+i} / k_j, p_j(0) = 1, \quad (7)$$

где $x = j \cdot b / J, j = \overline{1, J_0}, J_0 \leq J - 2; y = i \cdot b / J, i = \overline{0, J - j}$. Численная вероятность безотказной работы для остаточного ресурса (6) с учетом (7)

$$P_x^r(y) = \begin{cases} 0, & y \geq b - x \\ p_j(i-1) + (y - t_{i-1})(p_j(i) - p_j(i-1)) \cdot J/b, & t_{i-1} \leq y < t_i, \\ 1, & y < 0 \end{cases} \quad (8)$$

где $x = j \cdot b / J; t_i = i \cdot b / J, i = \overline{1, J - j}$.

Численный средний остаточный ресурс с учетом (8)

$$\tilde{y}_x = \int_0^{b-x} P_x^r(y) dy = \frac{b}{J} \left[0,5 + \sum_{i=1}^{J-j} p_j(i) \right]. \quad (9)$$

Численный гамма-процентный остаточный ресурс с учетом (8)

$$P_x^r(t) = \gamma \rightarrow \tilde{y}_j(\gamma) = t_{i-1} + \frac{(\gamma - p_j(i-1)) \cdot b}{p_j(i) - p_j(i-1)} \cdot \frac{1}{J}, \quad (10)$$

где $p_j(i-1) \geq \gamma > p_j(i)$, $i = \overline{1, J-j}$, $p_j(0) = 1$.

Зная статистическую вероятность безотказной работы (2) можно найти статистическую функцию распределения, а затем и численную функцию аналогично (3)

$$F_r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ m_{j-1} + (t - t_{j-1})(m_j - m_{j-1})J/b, & t_{j-1} \leq t < t_j, \quad j = \overline{1, J} \\ 1, & t \geq b \end{cases} \quad (11)$$

Учитывая (11), получим численный алгоритм моделирования случайной величины по результатам компьютерного моделирования

$$F_r(t) = r \rightarrow t = t_{j-1} + (r - m_{j-1})b/[(m_j - m_{j-1})J], \quad 0 \leq t < b, \quad (12)$$

где $m_{j-1} \leq r < m_j$, $j = \overline{1, J}$ (r – значения псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале $(0, 1)$).

Численные алгоритмы (3)-(12), используемые для вычисления основных показателей надежности по результатам компьютерного моделирования, являются научной новизной работы.

Параметр потока отказов описывается интегральным уравнением восстановления

$$w(t) = f(t) + \int_0^t w(x)f(t-x)dx, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 1/\bar{t}. \quad (13)$$

где $f(t)$ – плотность распределения вероятностей величин наработок оборудования между отказами. Интегральное уравнение восстановления (13) является уравнением Вольтерра 2-го рода, которое имеет единственное решение. В общем случае это уравнение решается аналитически, численно или с использованием преобразования Лапласа. Для всех этих методов необходимо знать плотность распределения вероятностей наработок оборудования между отказами.

Используя преобразование Лапласа, для параметра потока отказов определяется отображение

$$w^0(s) = f^0(s)/(1 - f^0(s)), \quad (14)$$

где $w^0(s) = \int_0^{\infty} w(t) \cdot \exp(-st) dt$ – преобразование Лапласа параметра потока отказов,

$f^0(s)$ – преобразование Лапласа плотности распределения вероятностей. При использовании преобразования Лапласа плотность распределения вероятностей должна быть на интервале от 0 до ∞ . Далее по выражению (14) находят обратное преобразование Лапласа.

В диссертации найден параметр потока отказов для линейного закона при $a=1$, используя преобразование Лапласа, когда плотность распределения вероятностей времени наработки имеет вид

$$f(t) = 1/b - 2t/b^2; \quad 0 \leq t < b. \quad (15)$$

Преобразование Лапласа для функции (15) на интервале от 0 до ∞ равно

$$f^0(s) = (2bs - 2)/(b^2s^2). \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в (14) и преобразуя полученное преобразование Лапласа, получим

$$w(t) = (2/b) \cdot \cos(t/b) \cdot \exp(t/b), \quad 0 \leq t < b, \quad w(0) = 2/b. \quad (17)$$

Функция (17) совпадает с параметром потока отказов (13) для линейного распределения (15) на интервале $(0, b)$. Функция отказов для линейного распределения (15) на интервале $(0, b)$ получается интегрированием функции (17), в результате получим

$$W(t) = \exp(t/b) \cdot [\cos(t/b) + \sin(t/b)] - 1, \quad 0 \leq t < b, \quad W(0) = 0. \quad (18)$$

Функции (17) и (18) используются для тестирования полученных ниже численных алгоритмов. Введем следующие обозначения: l – номер реализаций при моделировании, $l = \overline{1, L}$, где L – число реализаций; b – максимальное значение наработки оборудования между отказами; j – номер интервала; J – число интервалов на отрезке $(0, b)$; $\Delta t = b/J$ – длина интервала; $t_j = j \cdot \Delta t$ – значение j -го узла, $j = \overline{1, J_m}$, где J_m – число интервалов при моделировании, $J_m > J$; $m_l(t_j)$ – число отказов оборудования для l -й реализации за время t_j , $m_l(0) = 0$.

Тогда число отказов оборудования при моделировании по всем реализациям

$$M(t_j) = \sum_{l=1}^L m_l(t_j), \quad j = \overline{1, J_m}, \quad (19)$$

а оценка функции отказов с учетом (19)

$$W_r(t_j) = \tilde{M}(t_j) = M(t_j)/L = \sum_{l=1}^L m_l(t_j)/L, \quad j = \overline{1, J_m}. \quad (20)$$

При увеличении $j(t_j)$, $W_r(t_j)$ стремится к прямой с угловым коэффициентом $1/\tilde{t}$, где \tilde{t} – оценка средней наработки оборудования.

Так как параметр потока отказов (13) является производной от функции отказов, то численная его оценка равна

$$w_r(t_j) = (\tilde{M}(t_j) - \tilde{M}(t_{j-1})) \cdot J/b, \quad j = \overline{1, J_m}. \quad (21)$$

Подставляя в (20) оценку (21), получим

$$w_r(t_j) = \left(\sum_{l=1}^L n_{lj} / L \right) \cdot \frac{J}{b}, \quad j = \overline{1, J_m}, \quad (22)$$

где $n_{lj} = m_l(t_j) - m_l(t_{j-1})$ – частота отказов для j -го интервала (t_{j-1}, t_j) и l -й реализации. При увеличении $j(t_j)$ $w_r(t_j) \approx 1/\tilde{t}$.

Для вычисления частот n_{lj} необходимо моделировать процесс восстановления

$$t_{kl} = \sum_{i=1}^k x_{il}, \quad t_{kl} \leq t_{J_m}, \quad (23)$$

где x_{il} – наработки оборудования. Если

$$t_{j-1} \leq t_{kl} < t_j, \quad \text{то } n_{lj} = n_{lj} + 1, \quad l = \overline{1, L}. \quad (24)$$

Пусть $m_l(t_{J_m})$ – число отказов за время J_m для l -й реализации. Это число равно

$$m_l(t_{J_m}) = \sum_{j=1}^{J_m} n_{lj} = K_l, \quad l = \overline{1, L}. \quad (25)$$

Тогда объем выборки наработок x_{il} равен

$$n_0 = \sum_{l=1}^L m_l(t_{J_m}) = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^{J_m} n_{lj}. \quad (26)$$

По этой выборке найдем точечную (\tilde{t}) и интервальную ($t_1; t_2$) оценки среднего значения наработки оборудования

$$\tilde{t} = \frac{1}{n_0} \left(\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} x_{il} \right); \quad t_1 = \tilde{t} - \delta; \quad t_2 = \tilde{t} + \delta, \quad (27)$$

$$\delta = \frac{z_\gamma \cdot s}{\sqrt{n_0}}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} x_{il}^2 - n_0 \cdot \tilde{t}^2}{n_0 - 1}}, \quad (28)$$

здесь z_γ – квантиль нормального распределения; величина K_l определяется формулой (25). Формулы (19)-(28) образуют вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов по результатам компьютерного моделирования, являющийся научной новизной диссертации.

В варианте *C* технического обслуживания оборудования в отличие от вариантов *A* и *B* учитывается время восстановления компонентов. Поэтому вместо обычного процесса восстановления используется альтернирующий процесс

$$(T_q, Y_q), \quad q = 1, 2, \dots, \quad (29)$$

где T_q – случайные величины, описывающие время наработки многокомпонентного оборудования в q -м цикле; Y_q – случайные величины, описывающие время восстановления многокомпонентного оборудования в q -ом цикле. Предполагается, что величины T_q имеют одинаковые плотности распределения вероятностей $f(t)$ и математические ожидания \bar{t}_n . Величины Y_q так же имеют одинаковые плотности распределения вероятностей $g(t)$ и математические ожидания \bar{t}_g . Математические ожидания для цикла

$$\bar{t}_c = \bar{t}_n + \bar{t}_g. \quad (30)$$

Плотность распределения вероятностей для цикла

$$f_c(t) = \int_0^\infty f(x)g(t-x)dx. \quad (31)$$

Параметр потока восстановления

$$w_c(t) = f_c(t) + \int_0^t w_c(z)f_c(t-z)dz, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} w_c(t) = 1/\bar{t}_c. \quad (32)$$

Коэффициент оперативной готовности

$$Q_\tau = \int_{\tau}^{\infty} P(t) dt / \bar{t}_c, \quad (33)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы для многокомпонентного оборудования.

При $\tau = 0$ коэффициент оперативной готовности (33) называется коэффициентом готовности и вычисляется по формуле

$$Q_0 = \bar{t}_n / \bar{t}_c. \quad (34)$$

Коэффициент готовности (34) является важнейшим показателем надежности для восстанавливаемого оборудования, так как он оценивает вероятность того, что оборудование находится в работоспособном состоянии.

Для варианта С в результате компьютерного моделирования создаются три выборки – для наработки, восстановления и цикла. Эти значения используются при вычислении дополнительных показателей. Рассмотрим численный алгоритм вычисления коэффициента оперативной готовности и коэффициента готовности, который является научной новизной работы.

Численный алгоритм для коэффициента оперативной готовности при $\tau = t_{j-1}$ имеет вид

$$Q_r(t_{j-1}) = \frac{b}{J \cdot \bar{t}_{rc}} \left(\frac{k_{j-1}}{2} + \sum_{i=j}^J k_i \right), 0 \leq t_{j-1} < b, \quad (35)$$

где \bar{t}_{rc} – численный средний цикл, который определяется по формуле

$$\bar{t}_{rc} = (0,5 + \sum_{j=1}^J k_{c,j}) b / J. \quad (36)$$

Численная модель для коэффициента готовности по данным компьютерного моделирования

$$Q_{0r} = \bar{t}_r / \bar{t}_{rc}, \quad (37)$$

где \bar{t}_r – численная средняя наработка (4); \bar{t}_{rc} – численный средний цикл (36).

Дополнительно в работе определяются точечная (\tilde{Q}_0) и интервальная (\tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2) оценки для коэффициента готовности по данным выборок. Точечная оценка

$$\tilde{Q}_0 = \tilde{t}_n / \tilde{t}_c, \quad (38)$$

где \tilde{t}_n, \tilde{t}_c – точечные оценки для математических ожиданий наработки и цикла.

Интервальная оценка (доверительный интервал)

$$\tilde{Q}_1 = \tilde{Q}_0 + \delta; \quad \tilde{Q}_2 = \tilde{Q}_0 - \delta, \quad (39)$$

где

$$\delta = z_\gamma \cdot s; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^n t_{nq}^2 - 2\tilde{Q}_0 \sum_{q=1}^n t_{nq} \cdot t_{cq} + \tilde{Q}_0^2 \sum_{q=1}^n t_{cq}^2}{\frac{n-1}{n} \left(\sum_{q=1}^n t_{cq} \right)^2}}. \quad (40)$$

Здесь z_γ – квантиль нормированного нормального распределения, соответствующий доверительной вероятности γ ; s – оценка среднеквадратического отклонения коэффициента готовности оборудования; t_{nq}, t_{cq} – выборочные значения для выборок наработки и цикла. Величина (37) должна попадать в доверительный интервал (39) с учетом (40). Этот факт используется для проверки адекватности имитационной модели.

На основе разработанного алгоритмического обеспечения, описанного выше, автором создан программный комплекс для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования на языке программирования пакета MATLAB. Запуск программы происходит открытием исполняемого файла «CRRI.exe». При открытии программы появляется главное окно с основным меню (рис. 1). Далее можно приступить к выбору режима и варианта обслуживания оборудования.

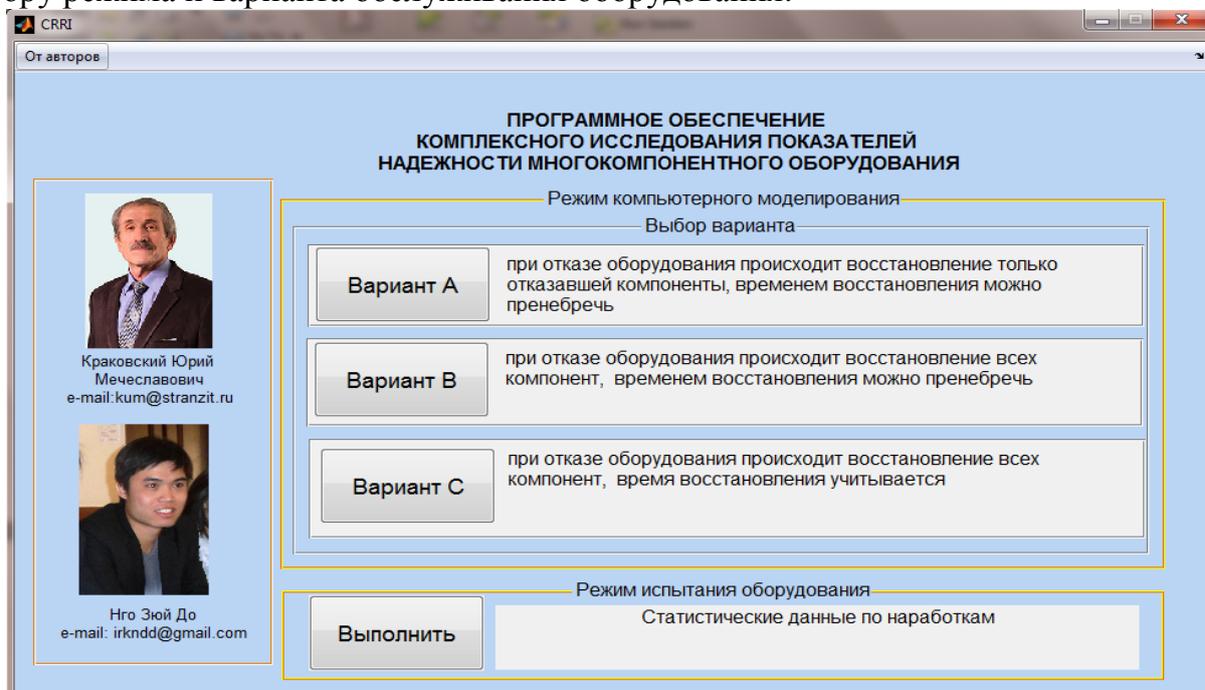


Рис. 1. Главное окно программы

В третьей главе проведена апробация созданного алгоритмического и программного обеспечения. По материалам литературных источников выбраны пять вариантов исходных данных с различным числом компонент и видами вероятностных моделей. В таблице 1 приведены исходные данные для исследования 4-х компонентного оборудования по варианту А: МОН – математическое ожидание времени наработки (МОН) для i -го компонента; КВН – коэффициент вариации наработки. Приведем результаты исследования для этого варианта. В таблице 2 приведены оценки исходных данных, полученных компьютерным моделированием. Результаты совпадают, что подтверждает высокое качество моделирования случайных величин с заданным законом распределения вероятностей. Итоговым результатом имитационного моделирования является выборка наработок многокомпонентного оборудования объема n , равного 20000.

Исходные данные при $I=4$

Таблица 1

Компоненты	М	Г	Э	У
ФР для наработки ($F_i(t)$)	N	LN	W	BS
\bar{t}_{ni} (МОН), мес.	9,0	12,0	20,0	25,0
k_{vi} (КВН)	0,25	0,45	0,45	0,40

Для оценок исходных данных (табл. 2) получены следующие точечные и интервальные оценки математического ожидания наработки оборудования:

$$\tilde{t} = 3,510 ; (t_1; t_2) = (3,491; 3,519). \quad (41)$$

Компоненты	М	Г	Э	У
\tilde{t}_{ni} (МОН), мес.	9,00	12,01	19,86	24,94
\tilde{k}_{vi} (КВН)	0,250	0,449	0,451	0,402

Точечная оценка коэффициента вариации наработки оборудования равна: 0,714.

На рисунке 2 представлена гистограмма частот времени наработки оборудования, число интервалов равно 20. Исходя из формы гистограммы, была выдвинута гипотеза о линейном законе наработки (15) с математическим ожиданием $\bar{t} = b/3$. Используя метод моментов, получим следующее значение параметра:

$b = 3 \cdot \tilde{t} = 10,5$ (мес.). Проверим гипотезу о том,

что теоретическое распределение статистически соответствует эмпирическому. В качестве критерия согласия используем критерий Пирсона (χ^2), $\chi^2_{набл} = 21,7$. При уровне значимости $q = 0,05$, $\chi^2_q(14) = 23,7$. Исходя из полученных результатов, можно принять гипотезу о том, что выборочные значения времени наработки оборудования, полученные по исходным данным (табл. 1), можно аппроксимировать распределением (15) при $q = 0,05$ и $b = 10,5$.

Пусть $b = 10,5$; $J = 100$; $L = 50000$; $J_m = 200$. Найдем численный параметр потока отказов (22) по результатам компьютерного моделирования, величины x_{il} в формуле (23) моделируются по формуле (12).

Объем выборки (26) $n_0 = 287632$. Сначала найдем точечную и интервальную оценки (27) с учетом (28) для математического ожидания наработки

$$\tilde{t} = 3,499 ; (t_1; t_2) = (3,490; 3,508). \quad (42)$$

Математическое ожидание наработки $\bar{t} = b/3 = 3,5$ попадает в доверительный интервал (42), что подтверждает высокое качество моделирования.

На рисунке 3 представлены значения численного (22, линия 1) и теоретического (17, линия 2) параметра потока отказов при $b = 10,5$; 0,286 – это предельное значение, равное $1/\tilde{t} = 3/b$ (линия 3).

Параметр потока отказов для линейного распределения, начиная со значения $2/b = 0,190$ увеличивается,

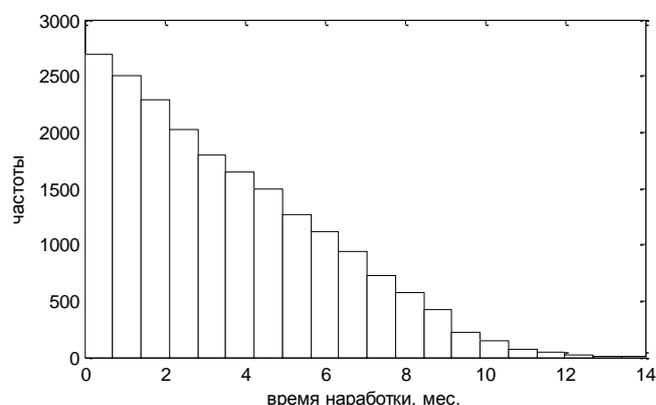


Рис. 2. Гистограмма частот для времени наработки оборудования

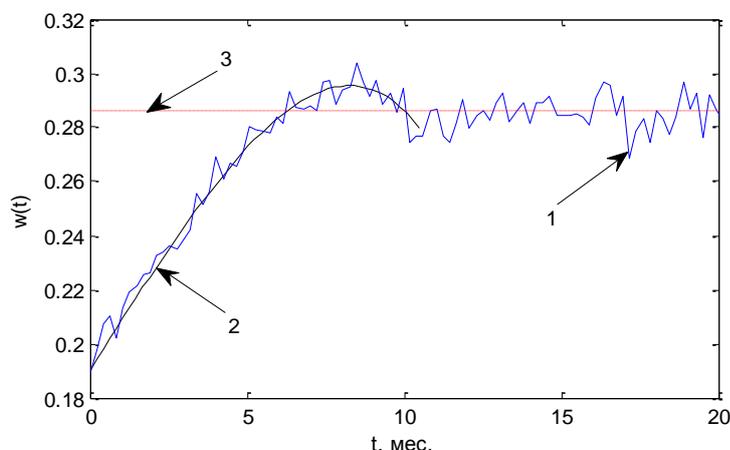


Рис. 3. Значения численного (1) и теоретического (2) Параметра потока отказов

превышает предельное значение, а затем колеблется около этого значения. Учитывая хорошее совпадение значений, вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов (19)-(28) рекомендуется для общего случая, когда не ставится задача подбора теоретического распределения для наработки по результатам компьютерного моделирования многокомпонентного оборудования.

На рисунке 4 представлены значения оценки функции отказов (20), полученные по результатам компьютерного моделирования (линия 1), теоретическая функция отказов (18) для линейного распределения (линия 2) и прямая $t/\bar{t} = 0,286 \cdot t$ (линия 3). Как видно из графиков (рис. 4), функции (20) и (18) на интервале изменения наработки линейного распределения практически совпадают, а начиная приблизительно со значения 10 месяцев, параллельны прямой. Полученные результаты также подтверждают корректность предложенного вычислительного алгоритма. Таким образом, в результате компьютерного эксперимента показана высокая точность оценки дополнительных показателей надежности многокомпонентного оборудования для варианта А его обслуживания.

Для варианта С объектом исследования выбрано оборудование, содержащее пять компонентов. Первым этапом компьютерного моделирования являются выборки объема n для времени наработки, восстановления и цикла многокомпонентного оборудования. В результате получена следующая точечная оценка коэффициента готовности оборудования (37): $\tilde{Q}_0 = 0,703$. Доверительный интервал для коэффициента готовности (39) при $\gamma = 0,95$ ($z_\gamma = 1,96$)

$$(Q_1; Q_2) = (0,701; 0,705). \quad (43)$$

По алгоритмам (4), (36) найдем численную среднюю наработку ($\bar{t}_r = 6,289$) и численный средний цикл ($\bar{t}_{rc} = 8,951$). По формуле (34) получим $Q_{0,r} = 0,703$. Данное значение попало в доверительный интервал (43). Результаты апробация других вариантов технического обслуживания оборудования и режима его испытаний приведены в главе 3 диссертации. Во всех случаях численные алгоритмы вычисления показателей надежности показали высокую точность, проверенную результатами тестирования по известным законам распределения.

В заключении приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Создано формализованное описание восстанавливаемого многокомпонентного оборудования, учитывающее разнообразные вероятностные модели времени наработки, варианты его технического обслуживания и режимы получения статистических данных, а также обоснованы показатели надежности оборудования, разделенные на основные и дополнительные, обеспечивающие его комплексное исследование.

2. Созданы и описаны численные модели оценки основных показателей надежности по данным компьютерного моделирования. Эти модели, как разновидность численного вероятностного анализа, являются научной новизной работы и содержат численные

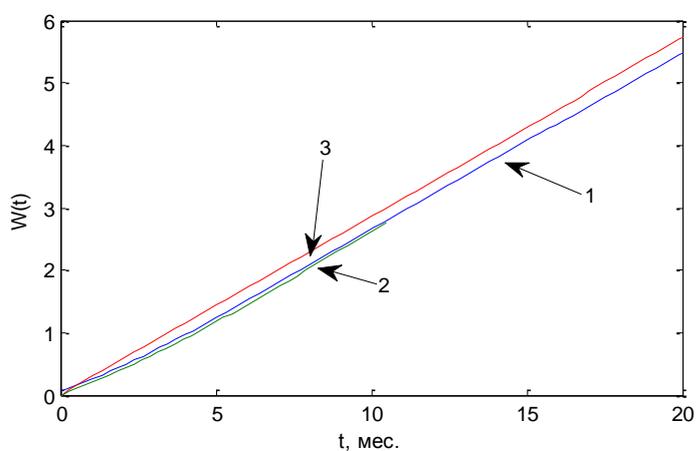


Рис. 4. Значения численной (1) и теоретической (2) функции отказов

алгоритмы вычисления: вероятности безотказной работы, средней наработки, гамма-процентного ресурса, вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, среднего остаточного ресурса, гамма-процентного остаточного ресурса.

3. Разработаны численные модели оценки дополнительных показателей надежности по данным компьютерного моделирования. Эти модели, как разновидность численного вероятностного анализа, являются научной новизной работы и содержат: вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов и функции отказов для обычного процесса восстановления; вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока восстановления и функции восстановления для альтернирующего процесса восстановления; численную модель для коэффициента оперативной готовности и коэффициента готовности. Найден доверительный интервал для коэффициента готовности многокомпонентного оборудования.

4. Создан программный комплекс для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования, включающего режим компьютерного моделирования и режим испытаний оборудования, варианты технического обслуживания, вычисление основных и дополнительных показателей надежности численными методами и основных показателей надежности численно-аналитическими методами. Программный комплекс реализован на языке программирования пакета MATLAB. Имеются два свидетельства о государственной регистрации программ.

5. Созданные численные модели, реализованные вычислительными алгоритмами и использующие информацию компьютерного моделирования, протестированы с использованием линейного, усеченного показательного и нормального распределений. Результаты тестирования показали высокую точность численных алгоритмов оценки основных и дополнительных показателей надежности оборудования по данным компьютерного моделирования.

6. Проведена апробация алгоритмического и программного обеспечения на модельных исходных данных. Комплексное исследование основных и дополнительных показателей надежности многокомпонентного оборудования проведено с учетом вариантов его технического обслуживания и режимов получения статистических данных.

7. Результаты диссертационного исследования, включающие численные модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение, внедрены в учебный процесс, о чем получена справка.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Нго, З. Д. Влияние вида функции распределения наработки на показатели остаточного ресурса / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3 (43). – С. 55 – 59.

2. Нго, З. Д. Имитационная модель многокомпонентного оборудования для определения закона распределения его наработки / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 7. – С. 26 – 32.

3. Нго, З. Д. Вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 10. – С. 16 – 20.

4. Нго, З. Д. Численные модели оценки показателей надежности многокомпонентного оборудования по результатам компьютерного моделирования / Ю. М. Краковский, О. А. Захарова, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 66 – 70.

5. Нго, З. Д. Численные модели оценки коэффициента оперативной готовности и параметра потока восстановления многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 131– 136.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611166 от 27 января 2016 г. Программа моделирования многокомпонентного оборудования для определения закона распределения его наработки / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613202 от 21 марта 2016 г. Комплексное исследование показателей надежности многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016.

В других изданиях:

8. Нго, З. Д. Аналитический подход при оценке остаточного ресурса оборудования на основе статистических данных/ Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вопросы естествознания. – 2014. – №2(3). – С. 36 – 42.

9. Нго, З. Д. Оценка гамма-процентного остаточного ресурса оборудования по статистическим данным / З. Д. Нго // Сборник докладов VII Всероссийской НПК «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». – 2014. – Том 1. – С. 290 – 295.

10. Нго, З. Д. Проверка нормального распределения при незначительном числе наблюдения с помощью критериев согласия / З. Д. Нго // Материалы конференции «Современные проблемы и перспективы развития АПК». – 2014. – Том 2. – С. 83 – 88.

11. Нго, З. Д. Алгоритмическое обеспечение для моделирования времени наработки и восстановления технологического оборудования / З. Д. Нго // Материалы международной НПК молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК». – 2015. – С. 54 – 58.

12. Нго, З. Д. Оценка параметра потока отказов оборудования методом имитационного моделирования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // VI Международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». – 2015. –Том 2. – С. 323 – 327.

13. Нго, З. Д. Программный комплекс для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго / Материалы XII международной НПК «Современные научные достижения». – 2016. –Том 13. – С. 17 – 21.

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать 03.03.2016 г.

Тираж 100 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета им. А.А. Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,
пос. Молодежный