Оригинальная статья / Original article

УДК 004.02

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172

CC BY 4.0

Методика анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем

Г. В. Петушков [1] ✉

[1] Российский технологический университет «РТУ МИРЭА»,
пр. Вернадского, д. 78, Москва 119454, Российская Федерация

✉ e-mail: petushkov@mirea.ru

Резюме

Целью работы. *Методика и анализ моделей надежности системы, включающих мониторинг состояния отдельных компонентов и оценку отказов на основе интенсивности отказов и вероятности безотказной работы модулей. Работа направлена на создание эффективных методов прогнозирования отказов и оценки времени восстановления системы, учитывая параметры отказов отдельных модулей и их взаимодействие. Также в рамках работы предполагается моделирование мониторинга состояния и функционирования системы.*

Методы. *Методы исследования включают анализ надежности системы с использованием интенсивностей отказов, моделирование вероятности безотказной работы компонентов системы, вычисление среднего времени до отказа, использование вероятностных распределений для определения состояния системы, мониторинг состояния системы в реальном времени, оценку времени восстановления системы, а также разработку алгоритмов для обнаружения отказов и управления восстановлением работы системы, методы моделирования*

Результаты. *Результаты исследования показывают, что с увеличением времени работы системы вероятность безотказной работы каждого компонента снижается из-за накопления отказов. Моделирование показало, что надежность системы зависит от интенсивности отказов каждого модуля и их взаимосвязи в системе. Для трех разных систем с различными интенсивностями отказов были проведены расчеты изменения вероятности безотказной работы (R(t)) в зависимости от времени. Анализ показал, что с увеличением времени работы вероятность отказа системы возрастает, что подтверждается уменьшением значения R(t) по мере увеличения времени t. При моделировании восстановления системы было установлено, что время восстановления зависит от количества отказавших модулей и интенсивностей их отказов. Система мониторинга успешно реагирует на изменения в реальном времени, выявляя значимые события, такие как отказ модулей, и оценивая время восстановления системы с учетом текущих данных о состоянии компонентов.*

Заключение. *В ходе проведенного исследования был разработан и реализован метод моделирования надежности системы на основе анализа интенсивностей отказов ее компонентов и вероятности безотказной работы (R(t)). Рассмотренные методы позволили вычислить среднее время до отказа системы, а также оценить время восстановления системы после отказа, что является ключевым фактором для обеспечения бесперебойной работы критически важных систем. Была продемонстрирована эффективность системы мониторинга, которая на основе данных о состоянии компонентов (M(t)) может оперативно выявлять отказные события и прогнозировать время восстановления, что позволяет оперативно принимать меры по восстановлению работоспособности системы.*

© Петушков Г. В., 2025

***Ключевые слова**: надежность системы; интенсивность отказов; вероятность безотказной работы; время до отказа; система мониторинга; восстановление системы; моделирование надежности; отказные события; управление надежностью; прогнозирование отказов.*

***Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Петушков Г. В. Методика анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 155-172. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172.

Поступила в редакцию 27.12.2024 *Подписана в печать 03.02.2025* *Опубликована 14.04.2025*

Methodology of reliability analysis and monitoring of aircraft operation

Grigory V. Petushkov [1] ✉

[1] MIREA – Russian Technological University
78, Vernadskogo str., Moscow 119454, Russian Federation

✉ e-mail: petushkov@mirea.ru

Abstract

***Purpose of research.**. Methodology and analysis of system reliability models, including monitoring the condition of individual components and failure assessment based on the failure rate and the probability of failure-free operation of modules. The work is aimed at creating effective methods for predicting failures and estimating system recovery time, taking into account the failure parameters of individual modules and their interaction. The work also involves modeling the monitoring of the state and functioning of the system.*

***Methods.** Research methods include analyzing system reliability using failure rates, modeling the probability of uptime of system components, calculating the average time to failure, using probability distributions to determine system status, monitoring system status in real time, estimating system recovery time, as well as developing algorithms for detecting failures and managing system recovery, modeling methods.*

***Results.** The results of the study show that as the system's operating time increases, the probability of uptime for each component decreases due to the accumulation of failures. The simulation showed that the reliability of the system depends on the failure rate of each module and their relationship in the system. For three different systems with different failure rates, the change in the probability of uptime (R(t)) was calculated as a function of time. The analysis showed that as the operating time increases, the probability of system failure increases, which is confirmed by a decrease in the value of R(t) as the time t increases. When modeling system recovery, it was found that the recovery time depends on the number of failed modules and the intensity of their failures. The monitoring system successfully reacts to changes in real time, identifying significant events such as module failure, and estimating system recovery time based on current component status data.*

***Conclusion.** In the course of the research, a method for modeling system reliability based on an analysis of the failure rates of its components and the probability of uptime (R(t)) was developed and implemented. The methods considered made it possible to calculate the average time to system failure, as well as to estimate the system recovery time after failure, which is a key factor in ensuring the smooth operation of critical systems. The effectiveness of the monitoring system has been demonstrated, which, based on data on the state of components (M(t)), can quickly identify failure events and predict recovery time, which allows for prompt measures to restore system operability.*

Keywords: *system reliability; failure rate; probability of uptime; time to failure; monitoring system; system recovery; reliability modeling; failure events; reliability management; failure prediction.*

Conflict of interest. *The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Petushkov G. V. Methodology of reliability analysis and monitoring of aircraft operation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 155-172 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172.

Received 27.12.2024 *Accepted 03.02.2025* *Published 14.04.2025*

***

Введение

Надежность вычислительных систем (далее ВС) представляет собой комплексное свойство, которое, в зависимости от целей и условий эксплуатации системы, может включать такие характеристики, как безотказность, долговечность, ремонто-пригодность и работоспособность, а также их различные комбинации. Любой элемент ВС можно рассматривать как самостоятельную систему, как правило, более низкого порядка. Каждый элемент системы описывается своей функцией [1]. В данной статье под надежностью понимается безотказность, что означает способность системы поддерживать работоспособность в течение заранее установленного времени.

С развитием современных аппаратных средств, которые обеспечивают высокую производительность как по времени выполнения операций, так и по объему памяти, на фоне усиливающейся конкуренции между разработчиками систем, акцент смещается с производительности на обеспечение надежности.

Процесс расчета надежности вычислительных систем позволяет не только провести сравнительный анализ различных вариантов структурной организации системы, но и обосновать выбор наиболее эффективного решения, а также проверить соответствие характеристик надежности требованиям технического задания. Тем не менее, оценка надежности вычислительных систем остается трудоемким процессом, а программные средства для построения моделей надежности и расчета этих характеристик пока недостаточно развиты. Это подчеркивает актуальность разработки методик и программных средств для оценки надежности вычислительных систем. Периодическая потребность в реконфигурации таких систем актуализирует следующие вопросы: – выбор и разработка методов реконфигурации с акцентом на минимизацию времени выполнения процедуры, что связано с необходимостью обработки данных в реальном времени в синергетике [2]; – выбор и разработка методов формирования сообществ вычислительных устройств с оптимизацией по заданной целевой функции.

Материалы и методы

Для реализации сетевых ВС, которые служат основой функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем с переменной (реконфигурируемой) структурой, можно использовать различные модификации сетей взаимодействующих автоматов, сетей Петри и других исполнимых сетевых моделей.

Такая сеть является одной из наиболее известных и широко применяемых моделей для описания распределенных и параллельных систем. Она представляет собой ориентированный двудольный граф, где вершины делятся на переходы и позиции. Позиции в сети обозначают условия и могут содержать метки, а дуги в графе указывают на постусловия, связанные с переходами, которые представляют события, происходящие в сети [3-4].

Оценка соответствия показателей надежности вычислительных систем заданным требованиям может быть проведена с использованием одного из трех методов: вычислений, испытаний и комбинирования:

1. Метод вычислений: используется на стадии проектирования для оценки того, насколько выбранная архитектура системы может выполнить требования по надежности. Он основывается на представлении системы в виде схемы, которая позволяет рассчитать показатели надежности по характеристикам ее элементов.

2. Метод испытаний: включает в себя сбор данных, получаемых в процессе проведения как отдельных, так и комплексных тестов, направленных на проверку функциональности аппаратных и программных компонентов системы.

3. Комбинированный метод: сочетает в себе данные из испытаний отдельных частей системы с расчетами по модели, которая учитывает всю структуру системы для оценки ее надежности.

Для оценки наилучшим образом подходят расчетные методы, основанные на моделях динамики надежности [5-6]. Основными подходами к моделированию надежности являются:

– Модель причинно-следственных связей (МПС) – используется для оценки вероятности отказов и анализирует последовательность событий, ведущих к сбою.

– Граф надежности (ГН) – визуализирует все возможные пути для обеспечения успешного функционирования системы.

– Схема надежности (СН) – представляет элементы системы и их взаимодействия, на основе которых рассчитываются показатели надежности.

Модель причинно-следственных связей предпочтительна для диагностики и идентификации неисправностей систем реального времени [7]. Тем не менее, при применении такой модели для расчета надежности системы возникает потребность в более сложной декомпозиции, если отказ компонентов не является независимым, что может усложнить использование иерархических моделей с резервированием [8].

Чем интенсивнее проводится эксплуатация системы, тем интенсивнее выявляются ошибки, быстрее растет надежность системы и соответственно ее качество. Вычислительные системы управления производственными процессами, компоненты которых обычно включают аппаратно-программные комплексы, представляющие собой индустриальные контроллеры (ИК) с соответствующим программным обеспечением. Такие системы могут относиться к одному из двух типов: резервные контроллеры и стандартные контроллеры для автоматизации.

Для повышения надежности, контроллеры часто работают в режиме резервирования, а стандартные контроллеры при отказе восстанавливаются с помощью запасных частей и комплектующих.

Учитывая временный характер объединения вычислительных узлов в систему обработки данных, становится очевидно, что структура будет произвольной, и однозначное разбиение ее на параллельно-последовательные участки вряд ли представляется возможным, Формирование архитектуры таких вычислительных систем обработки актуализирует вопрос о том, какая архитектура будет считаться предпочтительной [9].

При реализации сетевых модулей, как основы реализации функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем с переменной (реконфигурируемой) структурой, возможно использовать различные модификации сетей взаимодействующих автоматов, сетей Петри и других исполнимых сетевых моделей [10].

Для высоконадежных систем, доступ к контроллеру и замена его элементов обслуживающим персоналом считаются невозможными, и можно выделить следующие основные компоненты контроллера, которые могут быть заменены при их отказе. Качество таких решений зависит от времени перераспределения рабочей нагрузки [11]:

– процессорный блок (Центральный процессор, графические и вычислительные ускорители);

– устройства ввода сигналов (датчики температуры, давления и т.д.);

– устройства ввода сигналов (датчики температуры, давления, сенсоры для мониторинга состояния оборудования);

– системы хранения данных (жесткие диски, твердотельные накопители, RAID-массивы);

– элементы охлаждения (вентиляторы, тепловые мосты, системы жидкостного охлаждения).

Механизм реконфигурации вычислительной системы [12] позволяет выполнять динамическую реконфигурацию с минимальными задержками, объединяя проверенные технологии, такие как много контекстная и частичная реконфигурация, с новыми подходами, включая сопоставление тегов и профили реконфигурации, в единую методику [13].

Ключевым преимуществом данного механизма является высокая масштабируемость и гибкость, что позволяет адаптировать его к различным аппаратным

платформам, обеспечивая эффективное использование в любой реконфигурируемой вычислительной среде. В отличие от традиционных методов, этот механизм поддерживает работу даже в условиях высокой гетерогенности архитектур, включая пользовательские реконфигурируемые системы, что делает его универсальным решением для широкого спектра вычислительных задач.

Компоненты ВС обладают своими показателями надежности, чаще всего выражаемыми через интенсивность отказов λ, которая для периода нормальной эксплуатации считается постоянной. Распределение отказов контроллера представляет собой простой пуассоновский поток, где интенсивность отказов каждого компонента λ и среднее время до его отказа T связаны соотношением T=1/λ. Интенсивность отказов контроллера Λ равна сумме интенсивностей отказов всех n компонентов, так как отказ каждого компонента приводит к отказу всей системы.

Расчет общей интенсивности отказов системы, состоящей из нескольких компонентов, выглядит следующим образом:

$$\Lambda=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{T_i} \quad (1)$$

где Λ – общая интенсивность отказов всей системы;

n – количество компонентов в системе;

T_i – среднее время до отказа i-го компонента.

Рассчитав общую интенсивность отказов системы, учитывая, что для каждого компонента имеется свое среднее время до отказа T_i. Каждый компонент системы может иметь свое собственное значение времени работы до отказа, и интенсивность его отказа связана с этим временем обратной зависимостью. Чем меньше среднее время до отказа компонента, тем выше его интенсивность отказов, меньше системное обеспечение решений векторного критерия эффективности [14].

Для системы с n компонентами, общая интенсивность отказов Λ является суммой величин, которые обратно пропорциональны средним временам до отказа каждого из компонентов. Для оценки безотказности системы следует использовать обобщенный критерий сложных систем [15-16], который может показать основную надежность.

Безотказная вероятность работы системы $R(t)$ для независимых отказов всех компонентов может быть выражена как:

$$R(t)=e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t}, \quad (2)$$

где λ_i – интенсивность отказа i-го компонента; n – количество компонентов в системе.

Среднее время до отказа системы $T_{среднее}$ может быть получено как интеграл от функции надежности $R(t)$:

$$T_{ср}=\int_0^{\infty} R(t)\,d=\int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t}\,dt. \quad (3)$$

Решение этого интеграла дает среднее время до отказа системы:

$$T_{\text{среднее}}=\frac{1}{\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n}. \quad (4)$$

Общая вероятность безотказной работы системы и среднее время до отказа для системы с независимыми отказами всех компонентов могут быть выражены через суммы интенсивностей отказов λ_i всех компонентов в расчете на сложность информационных конструкций [17].

При возникновении неопределенной информационной ситуации и комплементарности [18, 19], для ВС с функциональными единицами системы, соединенными смешанным способом, для нормального функционирования требуется, чтобы не менее k из n элементов работали без отказа. Если блоки системы имеют одинаковые вероятности безотказной работы и независимость отказов, вероятность безотказной работы системы R(t) и среднее время безотказной работы могут быть выражены одной объединенной формулой:

$$R(t)=\binom{n}{k}e^{-\lambda tk}(1-e^{-\lambda t})^{n-k}, \quad (5)$$

где $p(t)=e^{-\lambda t}$ – вероятность безотказной работы блока на интервале времени [0,t]; $\binom{n}{k}$ — количество способов выбрать k блоков из n, а λ — интенсивность отказов каждого блока.

Среднее время безотказной работы системы T рассчитывается как интеграл:

$$T=\int_0^{\infty}\binom{n}{k}e^{-\lambda tk}(1-e^{-\lambda t})^{n-k}dt. \quad (6)$$

Если блоки системы имеют различные интенсивности отказов, расчет надежности и среднего времени работы становится более сложным, требуя учета всех возможных успешных комбинаций блоков.

Структурная схема надежности с узлами и связями [19] представляет собой иерархическую модель, включающую как простые, так и составные элементы. Простые элементы (ПЭ) являются неделимыми и характеризуются определенной интенсивностью отказов. Составные элементы (СЭ) состоят из нескольких связанных между собой простых или составных элементов, при этом соединения между ними могут быть последовательными, параллельными или смешанными. При расчете надежности необходимо учитывать тип этих соединений.

Методика расчета надежности структурной схемы с использованием функций надежности (вероятности безотказной работы) компонентов:

1. Начинаем с верхнего уровня иерархии и проверяем тип текущего компонента: простой или составной. Если элемент простой, переходим к следующему шагу, если составной – продолжаем по схеме.

2. Для составного элемента проверяются компоненты, его образующие:

– если все компоненты простые, рассчитываем вероятность безотказной работы для этого составного элемента с учетом типа их соединения, затем переходим к следующему шагу;

– если один из компонентов составной, продолжаем анализировать на более низком уровне иерархии.

3. Заменяем составной элемент на простой элемент с расчетной функцией надежности.

4. Возвращаемся на более высокий уровень иерархии и повторяем шаги 2-3, если не достигнут самый верхний уровень.

5. Когда достигаем верхнего уровня, переходим к расчету функции надежности всей системы.

6. Если рассмотрены все компоненты верхнего уровня, переходим к следующему шагу.

7. На основе полученной функции надежности рассчитываем среднее время до отказа системы.

Этот процесс позволяет моделировать надежность сложных систем, включая анализ и вычисление ключевых показателей для каждого компонента и всей системы в целом.

Для анализа работы вычислительной системы можно построить систему дифференциальных уравнений, которые определяют ключевые характеристики ее надежности. Эти уравнения предназначены для вычисления вероятности нахождения системы в определенном состоянии в момент времени t. Вначале для расчета времени безотказной работы $p(t)$ строится граф состояний системы, на котором отмечаются все отказные состояния, из которых невозможно перейти в соседние исправные состояния. Затем, на основе графа состояний формулируется система дифференциальных уравнений.

Дифференциальные уравнения, описывающие количественные характеристики надежности, готовности и ремонтопригодности вычислительной системы, необходимо определить вероятности пребывания системы в различных состояниях на основе графа состояний. Для этого нужно сформулировать правило составления уравнений для вероятности пребывания системы в i-м состоянии в момент времени t. Дифференциальное уравнение для вероятности $P_i(t)$ пребывания системы в i-м состоянии будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\lambda_i P_i(t) + \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} P_j(t), \qquad (7)$$

где $P_i(t)$ – вероятность нахождения системы в i-м состоянии в момент времени t; λ_i – интенсивность перехода из состояния i в отказное состояние (или в другое состояние, где система уже отказала); λ_{ji} – интенсивность перехода из состояния j в состояние i; $\sum_{j \neq i} \lambda_{ji} P_j(t)$ – сумма переходных потоков из других состояний j в состояние i.

Данная система уравнений позволяет вычислить вероятности нахождения вычислительной системы в каждом состоянии для разных типов состояний (рабочее, отказное, ремонтируемое и т. д.), что, в свою очередь, дает возможность рассчитать характеристики надежности, готовности и ремонтопригодности системы.

Для оценки надежности вычислительной системы, состоящей из мно-

гофункциональных модулей, важно учитывать не только распределение функциональных модулей по узлам системы, но и то, как отказ каждого модуля влияет на выполнение различных функций. Методика для расчета вероятности того, что хотя бы одна функция из множества d функций может быть выполнена в одном из m многофункциональных модулей.

Матрица размещения функциональных модулей системы сопоставляется функциональный модуль, который либо исправен, либо отсутствует. Матрица размещения функциональных модулей по узлам системы $\{\varphi_{ij}\}$ имеет размерность $n \times m$, где n – количество типов функциональных модулей, а m – количество узлов. Элемент $\varphi_{ij}=1$ означает, что в j-м узле размещен исправный функциональный модуль i-го типа, в противном случае $\varphi_{ij}=0$.

Время безотказной работы системы зависит от времени безотказной работы функциональных модулей, и оценка этой зависимости требует учета специфики размещения модулей по узлам системы. Для этого используется комбинаторно-вероятностный метод включения-исключения, который позволяет учитывать взаимосвязи между функциями и модулями, а также оценивать время безотказной работы системы.

Вероятность выполнения хотя бы одной функции, когда система состоит из m многофункциональных модулей, каждый из которых может выполнять одну или несколько функций из множества d функций $\{f_1, f_2, \ldots, f_d\}$. Вероятность того, что хотя бы одна функция будет выполнена в j-м модуле, можно выразить как:

$$P_j(t)=1-\prod_{i=1}^{d}(1-P_{ij}(t)), \quad (8)$$

где: $P_{ij}(t)$ – вероятность того, что функциональный модуль i-го типа в узле j будет работать без отказа в момент времени t;

$P_j(t)$ – вероятность того, что хотя бы одна функция будет выполнена в j-м модуле.

Метод включения-исключения

Для более точных расчетов, в зависимости от взаимозависимости выполнения функций и отказов модулей, применяется метод включения-исключения. Этот метод позволяет учитывать все возможные пересечения между функциями, что дает более точные оценки надежности.

Оценка времени безотказной работы системы может быть получена с помощью комбинирования вероятностей выполнения функций в каждом модуле с учетом взаимных отказов.

В случае сложности вычислений с полным методом включения-исключения, можно использовать приближенные методы, которые будут давать оценки с заданной погрешностью, но значительно упрощают расчет, сохраняя приемлемую точность для практических применений.

Система мониторинга играет важную роль в поддержании надежности и эффективности работы вычислительных

систем. Основные задачи, которые решает такая система, включают:

Получение и сохранение значений $M(t)$: Система мониторинга должна получать данные о состоянии вычислительной системы на каждом этапе времени. Эти данные могут включать информацию о текущих значениях различных показателей, таких как загрузка процессора, состояние памяти, количество отказов, интенсивности отказов компонентов и другие параметры, влияющие на функционирование системы. Значения $M(t)$ представляют собой набор измеряемых характеристик, которые могут изменяться во времени в зависимости от работы системы. Эти значения должны быть зафиксированы и сохранены для дальнейшего анализа и принятия решений.

После получения данных система мониторинга должна анализировать информацию для выявления значимых событий. Это может включать обнаружение отклонений от нормальной работы системы, таких как превышение пороговых значений параметров, возникновение отказов или снижение производительности. Система мониторинга должна иметь возможность эффективно выделять такие события, которые могут оказать существенное влияние на работу системы, аварийные ситуации или близкие к отказу компоненты. Выявление таких событий является основой для принятия оперативных решений.

На основании обнаруженных значимых событий система мониторинга должна инициировать соответствующие меры реагирования. Это может включать в себя автоматический запуск процессов восстановления, уведомление оператора о возникшей проблеме, активацию дополнительных резервных ресурсов или выполнение других действий, направленных на минимизацию воздействия сбоя на систему. Механизмы отклика должны быть настроены таким образом, чтобы эффективно устранять последствия сбоев или отклонений и восстанавливать нормальную работу системы в кратчайшие сроки.

Задачи системы мониторинга интегрируются в общую систему управления надежностью, которая позволяет не только отслеживать состояние вычислительных систем, но и принимать своевременные меры для минимизации рисков отказов и повышения устойчивости системы.

Результаты и их обсуждение

Рассчитанные значения для трех систем подтверждают, что с увеличением общего числа компонентов и интенсивности их отказов вероятность безотказной работы на заданном временном интервале существенно снижается. Предположим, что для ВС №1 с общей интенсивностью отказов Λ=0,035, вероятность безотказной работы через 1 час составляет 0,9656, а через 10 часов снижается до 0,7047. В ВС №2, где интенсивность отказов выше (Λ=0,06), вероятность безотказной работы через 10 часов падает до 0,5488. Для ВС №3 с Λ=0,05,

вероятности безотказной работы через 1 и 10 часов составляют соответственно 0,9512 и 0,3679.

Среднее время до отказа зависит от интенсивности отказов компонентов: для первой оно составляет 28,57 часов, для второй – 16,67 часов, а для третьей – 20,0 часов.

Чем меньше среднее время до отказа, тем быстрее система выходит из строя, что также отражает зависимость между интенсивностью отказов и временем работы системы что показано на табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов для трех различных систем с учетом временных интервалов и вероятности безотказной работы

Table 1. Calculation results for three different systems considering time intervals and probability of failure

Параметр / Parameter	Система 1 / System 1	Система 2 / System 2	Система 3 / System 3
Интенсивности отказов компонентов (λ_i)	λ_1=0,01, λ_2=0,02, λ_3=0,005	λ_1=0,01, λ_2=0,005, λ_3=0,02, λ_4=0,015, λ_4=0,01	λ_1=0,01, λ_2=0,02, λ_3=0,015, λ_4=0,005
Общая интенсивность отказов (Λ)	Λ=0.035	Λ=0.06	Λ=0.05
Среднее время до отказа (СВДО), ч	$T_{среднее}$=28.57	$T_{среднее}$=16.67	$T_{среднее}$=20.0
Время (t), ч	1	1	1
Вероятность безотказной работы $R(t)$	$R(1)\approx0.9656$	$R(1)\approx0.9418$	$R(1)\approx0.9512$
Время (t), ч	5	5	5
Вероятность безотказной работы $R(t)$	$R(5)\approx0.8395$	$R(5)\approx0.7408$	$R(5)\approx0.7788$
Время (t), ч	10	10	10
Вероятность безотказной работы $R(t)$	$R(10)\approx0.7047$	$R(10)\approx0.5488$	$R(20)\approx0.3679$

Данные результаты могут быть использованы для оптимизации надежности распределенных систем, выбора подходящих компонентов и планирования обслуживания оборудования в зависимости от требуемых уровней надежности. С увеличением общей интенсивности отказов системы, вероятность ее безот-

казной работы на заданном интервале времени значительно уменьшается. Это объясняется тем, что при большем числе компонентов или высокой интенсивности отказов отдельных компонентов система быстрее выходит из строя.

Среднее время до отказа T "среднее" также связано с суммарной интенсивностью отказов и напрямую влияет на надежность системы. Для корректного планирования эксплуатации распределенных вычислительных систем важно учитывать как индивидуальные интенсивности отказов компонентов, так и их взаимодействие в общей системе.

Рис. 1 иллюстрирует изменения вероятности безотказной работы $R(t)$ для трех различных систем в зависимости от времени t. Ось x на графике отображает время, выраженное в часах, в то время как ось y показывает величину надежности $R(t)$, которая представляет собой вероятность того, что система будет функционировать без отказа в течение указанного времени.

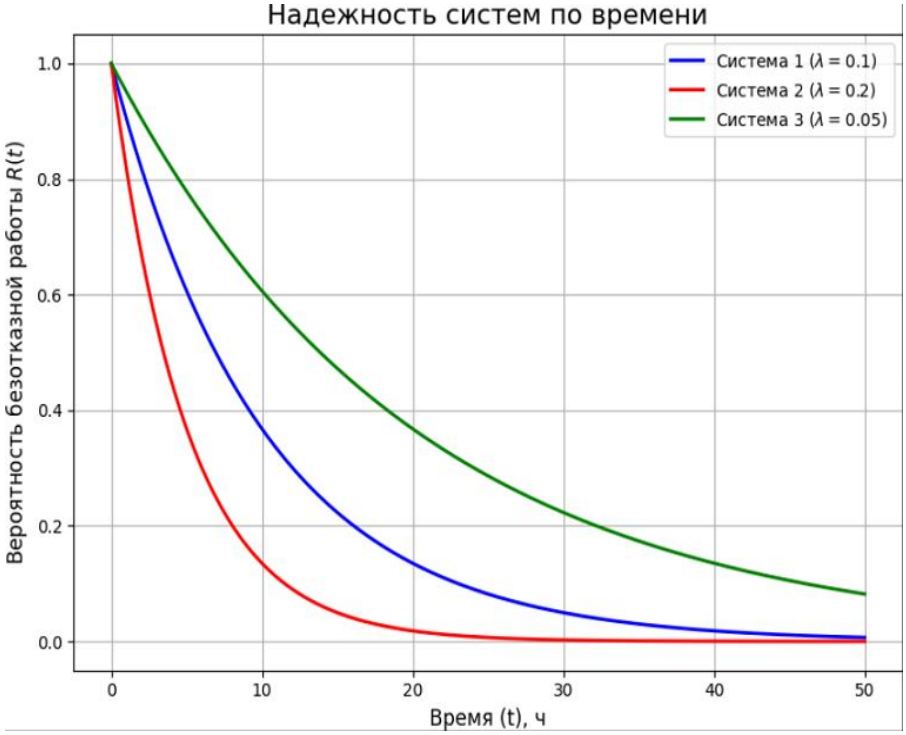

Рис 1. Надежность каждой системы меняется с течением времени в зависимости от их интенсивности отказов

Fig. 1. The reliability of each system varies over time depending on their failure rate

Для каждой системы на графике представлена отдельная линия, показывающая, как ее надежность изменяется с течением времени. Зависимость надежности от времени: вероятность безотказной работы $R(t)$ зависит от интенсивности отказов каждого компонента системы. С течением времени эта вероятность уменьшается, так как элементы системы подвергаются износу или сбоям, что приводит к увеличению риска их отказа. Чем выше интенсивность от-

казов системы (то есть, чем выше значение λ_i для ее компонентов), тем быстрее система теряет свою надежность. Кривые на графике могут иметь разные наклоны в зависимости от значений интенсивности отказов для каждой из систем. Система с более высокими значениями интенсивности отказов будет иметь более крутое снижение надежности.

Проведем расчет трех реальных систем на надежность на базе - процессоров Intel Xeon, AMD EPYC и Baikal-S с разными характеристиками (табл. 2).

Таблица 2. Конфигурации вычислительных систем

Table 2. Configurations of computing systems

Название ВС / SUN Name	Система 1: Intel Xeon / System 1: Intel Xeon	Система 2: AMD EPYC / System 2: AMD EPIC	Система 3: Baikal-S / System 3: Baikal-S
ЦП (CPU)	2 × Intel Xeon Gold (без резервирования)	2 × AMD EPYC (без резервирования)	4 × Baikal-S (без резервирования)
ОЗУ (RAM)	4 модуля DDR5 (отказывает при выходе 2 и более модулей)	8 модулей DDR4 (отказывает при выходе 3 и более модулей)	6 модулей DDR4 (отказывает при выходе 3 и более модулей)
Жесткие диски	4 SSD NVMe (RAID 0, отказывает при выходе 1 и более дисков)	2 HDD (RAID 1, отказывает при выходе 1 и более дисков)	3 HDD (RAID 5, отказывает при выходе 2 и более дисков)
Блоки питания	1	1	2
Сетевые адаптеры	2	2	1

Интенсивность отказов (λ) вычисляется на основе открытых данных о средней наработке на отказ (MTTF/MTBF), полученных из отраслевых стандартов надежности (Telcordia SR-332, MIL-HDBK-217, IEC 62380), статистики отказов серверных систем (данные из крупных ЦОДов), а также технической документации производителей оборудования.

Данные значения могут изменяться в зависимости от условий эксплуатации, температурного режима, качества электропитания и рабочих нагрузок.

Для расчета вероятностей отказов компонентов в данных системах, используя методы вероятностного моделирования (1)-(6), получаем следующие значения (табл. 3).

Таблица 3. Результат тестирования на отказоустойчивость вычислительных систем

Table 3. Result of fault tolerance testing of computing systems

Компонент / Component	Intel Xeon (RAID 0, DDR5)	AMD EPYC (RAID 1, DDR4)	Baikal-S (RAID 5, DDR4)
CPU	0.9995	0.9994	0.9993
RAM	0.78	0.61	0.69
Жесткие диски	0.9992 (SSD)	0.999 (HDD)	0.998 (HDD)
PSU	0.9992	0.9992	0.9992
NIC	0.9997	0.9997	0.9997
Общая вероятность	0.777	0.608	0.688

По итогам тестирования можно сделать следующие выводы: система Intel Xeon (RAID 0, DDR5) демонстрирует лидирующую надежность – 77,7%, но использование RAID 0 увеличивает риск потери данных, Baikal-S (RAID 5, DDR4) обеспечивает надежность 68,8%, что делает ее более устойчивой к отказам, чем AMD EPYC с RAID 1 60,8%. Это преимущество Baikal-S связано с использованием RAID 5. ВС AMD EPYC (RAID 1, DDR4) имеет наименьшую надежность из-за высокой вероятности отказа оперативной памяти, особенно если в системе установлено 8 модулей. При выборе между этими конфигурациями стоит учитывать, что если основной приоритет – высокая производительность и допустим риск потери данных, то лучше выбрать Intel Xeon. Если же необходим баланс между надежностью и производительностью, то оптимальным вариантом станет Baikal-S. В случае, когда главную роль играет сбор и резервирование данных, предпочтительнее будет система AMD EPYC с RAID 1.

Описанная методика относится к методу включения-исключения в анализе надежности вычислительных систем. Метод используется для расчета вероятности безотказной работы системы, состоящей из нескольких компонентов, принимая во внимание вероятность их отказов и возможные комбинации работоспособных элементов. К ключевым особенностям данной методики можно отнести: поддержка масштабируемости и гибкости в различных аппаратных средах; учет отказов компонентов через интенсивности отказов λ_i и среднее время до отказа T_i; использование распределения отказов по пуассоновскому закону; оценка вероятности безотказной работы системы $R(t)$ на основе суммарной интенсивности отказов; математическое описание системы с учетом

переходов между состояниями и вероятностей их нахождения в каждом состоянии; учет многофункциональности модулей и вероятности выполнения хотя бы одной функции системой. Данный метод может применятся в анализе надежности сложных систем, особенно, когда система состоит из функционально дублированных или резервируемых модулей с разными вероятностями отказа. К минусам метода можно отнести: высокую вычислительную сложность при увеличении числа компонентов, сложность вычислений возрастает экспоненциально; сложность реализации требует точного учета зависимостей между отказами элементов системы; не всегда эффективен для больших систем при большом количестве элементов; не учитывает динамическое поведение системы; анализ производится на основе статических вероятностей отказов.

При сравнении с другими методами: метод Монте-Карло, который более удобен для анализа сложных и нелинейных систем, но требует значительных вычислительных ресурсов и многократных симуляций; Марковские модели, хорошо подходят для систем с восстанавливаемыми компонентами и возможностью переходов между состояниями; метод блочного анализа (Fault Tree Analysis, FTA) удобен для визуализации отказов и их причин, но плохо масштабируется при сложных зависимостях между компонентами; аналитические методы на основе уравнений надежности позволяют получать точные решения для некоторых классов систем, но часто требуют упрощения модели.

Метод включения-исключения наиболее полезен для систем со сложными зависимостями между отказами компонентов и случаев, когда необходимо оценить вероятность выполнения хотя бы одной из нескольких функций. Однако для больших и динамических систем он может уступать методам Монте-Карло и Марковским процессам.

Выводы

Использование вероятностных методов позволяет моделировать систему и рассчитывать ее характеристики с учетом требований к надежности, времени безотказной работы и ремонтопригодности. Это позволяет учитывать все возможные комбинации исправных и неисправных элементов, что критически важно для оценки общей надежности ВС.

Рассмотренные вычислительные системы (Intel Xeon, Baikal-S, AMD EPYC) демонстрируют, как различные архитектуры и структуры модулей влияют на общую надежность.

При проектировании и анализе таких систем важно учитывать все возможные комбинации элементов, их влияние на общее состояние и способы восстановления после отказов. Использование методов включения-исключения и численных методов для получения приближенных оценок позволяет более точно оценить надежность системы, особенно в условиях различных интенсивностей отказов компонентов.

Список литературы

1. Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем // Перспективы науки и образования. 2014. № 1. С. 38-43.

2. Болбаков Р.Г. Эмерджентность сложных систем // Славянский форум. 2019. № 1 (23). С. 100–105.

3. Shooman M. L. Reliability of Computer Systems and Networks: Analysis and Design. Wiley J. & Sons, 2004.

4. Кирьянчиков В. А. Расчет показателей надежности системы анализа результатов пусков ракет космического назначения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 8.

5. Кайхан Эрджиес. Распределенные системы реального времени. Теория и практика. М.: ДМК-Пресс, Лаборатория знаний, 2020. 382 с.

6. Луканов А.С. Системы реального времени. Самара: Издательство Самарского университета, 2020. 156 с.

7. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов / Е.М. Лаврищева, Н.В. Пакулин, А.Г Рыжов., С.В. Зеленов // Труды ИСП РАН. 2018. Т. 30, вып. 3.

8. Клименко А. Б. Повышение ресурсной эффективности распределенных архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 2. С. 124-139. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139

9. Зинкин С.А., Мустафа Садек Джафар, Карамышева Н.С. Концептуальные представления и модификации сетей Петри для приложений в области синтеза функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем с переменной структурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 6(81). С. 143-167.

10. Safronenkova I.B., Melnik Y. E. An Estimation of the Workload Relocation Techniques Application in Distributed CAD Systems Area // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 330. P. 572-581.

11. Hinkelmann H., Zipf P., Glesner M. A scalable reconfiguration mechanism for fast dynamic reconfiguration // *2009 19th International Conference on Field Programmable Logic and Applications.* 2009. P. 145–152.

12. Huang Y., Sun S., Chu J. Energy- and time-optimal reconfiguration of spacecraft clusters with collision avoidance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2023. Vol. 237(13). P. 1394–1411.

13. Шевченко С. В. Оптимизация распределенных вычислений в системах параллельной обработки данных // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. №3 (7).

14. Ворожцов А. С., Тутова Н. В., Тутов А. В. Оптимизация размещения облачных серверов в центрах обработки данных // T-Comm. 2015. №6.

15. Цветков В. Я. Основы теории сложных систем. СПб.: Издательство «Лань», 2019. 152.

16. Болбаков Р.Г. Сложность информационных конструкций // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 4 (16). С. 58–63.

17. Розенберг И.Н. Информационная ситуация как сложная система // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 69–77.

18. Буравцев А.В., Цветков В.Я. Сложные организационно вычислительные системы // Перспективы науки и образования. 2018. № 4 (34). С. 293–300.

19. Щенников А.Н. Комплементарность сложных вычислений // Славянский форум. 2018. № 2 (20). С. 118–123.

References

1. Kuj S.A. Multidimensional consideration of complex systems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of science and education*. 2014; (1): 38-43 (In Russ.).

2. Bolbakov R.G. Emergence of complex systems. *Slavyanskii forum = Slavic Forum.* 2019; (1): 100-105 (In Russ.).

3. Shooman M. L. Reliability of Computer Systems and Networks: Analysis and Design. Wiley J. & Sons, 2004.

4. Kiryanchikov V. A. Calculation of reliability indicators of the system for analysing the results of space rocket launches. *Izv. SPbGETU «LETI». = Izvestia SPbGETU 'LETI'*. 2016; (8). (In Russ.).

5. Kayhan Erciyes: Distributed real-time systems. Theory and practice. Moscow: DMK-Press, Laboratoriya znanii; 2020. 382 p. (In Russ.).

6. Lukanov A.S. Real-time systems. Tutorial. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo universiteta; 2020. 156 p. (In Russ.).

7. Lavrischeva E.M., Pakulin N.V., Ryzhov A.G., Zelenov S.V. Analysis of the methods of reliability assessment of equipment and systems. Practical application of methods. *Trudy ISP RAN = Proceedings of ISP RAS*. 2018; 30 (3).

8. Klimenko A. B. Distributed Data Proceeding Systems Architectures Resource Efficiency Improvement on the Basis of Apriory Data about the Jobs Late Completion Times. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 124-139 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139

9. Zinkin S.A., Mustafa Sadeq Jaafar, Karamysheva N.S. Conceptual Representations and Modifications of Petri Nets for Applications in the Area of Synthesis of a Functional

Architecture of Distributed Computational Systems with Variable Structure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 22(6): 143-167

10. Safronenkova I.B., Melnik Y. E. An Estimation of the Workload Relocation Techniques Application in Distributed CAD Systems Area. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 330: 572-581.

11. Hinkelmann H., Zipf P., Glesner M. A scalable reconfiguration mechanism for fast dynamic reconfiguration. In *2009 19th International Conference on Field Programmable Logic and Applications.* 2009. P. 145–152.

12. Huang Y., Sun S., Chu J. Energy- and time-optimal reconfiguration of spacecraft clusters with collision avoidance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2023; 237(13): 1394–1411.

13. Shevchenko S. V. Optimisation of distributed computing in parallel data processing systems. *ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii = ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Management*. 2018; (3). (In Russ.).

14. Vorozhtsov A. S.; Tutova N. V., Tutov A. A.. V. Optimisation of cloud servers in data processing centres. *T-Comm*. 2015; (6). (In Russ.).

15. Tsvetkov V. Ya. Fundamentals of the theory of complex systems. St. Petersburg: Izdatel'stvo «Lan'»; 2019. 152 p. (In Russ.).

16. Bolbakov R.G. Complexity of information constructions. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational resources and technologies*. 2016; (4): 58-63. (In Russ.).

17. Rosenberg I.N. Information situation as a complex system. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational resources and technologies*. 2017; (3): 69-77. (In Russ.).

18. Buravtsev A.V., Tsvetkov V.Ya. Complex organizational and computational systems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of Science and Education*. 2018; (4): 293-300. (In Russ.).

19. Schennikov A.N. Complementarity of complex computations. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2018; (2): 118-123. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Петушков Григорий Валерьевич,
младший научный сотрудник Центра популяризации науки и высшего образования, Институт молодежной политики и международных отношений РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: petushkov@mirea.ru

Grigory V. Petushkov, Junior Researcher, Centre for Popularisation of Science and Higher Education, Institute of Youth Policy and International Relations, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation,
e-mail: petushkov@mirea.ru