



## Методика оценки функциональной безопасности маршрутизаторов на основе вероятностно-физической модели

С. Н. Полесский<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-8066-5162](https://orcid.org/0000-0002-8066-5162), [spolessky@hse.ru](mailto:spolessky@hse.ru)

С. Р. Тумковский<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-1647-2171](https://orcid.org/0000-0002-1647-2171), [stumkovskiy@hse.ru](mailto:stumkovskiy@hse.ru)

В. Э. Цветков<sup>а</sup>, аспирант, старший преподаватель, [orcid.org/0009-0004-3709-276X](https://orcid.org/0009-0004-3709-276X)

П. С. Королев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-5720-0498](https://orcid.org/0000-0002-5720-0498)

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Таллинская ул., 34, Москва, 123458, РФ

**Введение:** функциональная безопасность сетевых маршрутизаторов, используемых в критической информационной инфраструктуре, требует количественной оценки на основе надежных данных. Существующие методики оценки показателей безопасности не отражают влияние физических механизмов деградации в реальных условиях эксплуатации, что снижает достоверность результатов и затрудняет принятие обоснованных технических решений. **Цель:** повысить точность количественной оценки функциональной безопасности маршрутизаторов путем разработки методики, учитывающей деградационные процессы и параметры состояния оборудования в условиях эксплуатации. **Результаты:** проведена верификация пяти подходов к оценке надежности: поэтапного анализа на базе экспоненциального распределения, анализа статистики отказов, оценки на основе определяющих параметров состояния, метода Вейбайеса и смешанной модели пропорциональных рисков. Сравнительный анализ показал, что классические однопараметрические модели дают относительную погрешность от 29 до 48 %, игнорируя физические механизмы деградации. На основе смешанной модели пропорциональных рисков с распределением Вейбулла разработана методика уточненной оценки показателей функциональной безопасности, обеспечивающая минимальную погрешность на уровне 4,2 % при оценке средней наработки до отказа. Экспериментальная апробация проведена на маршрутизаторе Keenetic Starter с использованием ускоренных испытаний и мониторинга диагностических параметров (температуры, загрузки процессора, использования памяти). Вероятностно-физический подход, основанный на контроле ключевых параметров состояния, позволяет скорректировать оценку средней наработки и рассчитать среднюю частоту опасного отказа. **Практическая значимость:** повышение точности оценки показателей надежности и уровня полноты безопасности, снижение совокупных затрат на обеспечение функциональной безопасности сетевых маршрутизаторов в составе критической информационной инфраструктуры, а также повышение обоснованности технических решений при проектировании защищенных сетевых систем.

**Ключевые слова** — функциональная безопасность критической инфраструктуры, уровень полноты безопасности, функция плотности вероятности, маршрутизатор, средняя наработка до отказа.

**Для цитирования:** Полесский С. Н., Тумковский С. Р., Цветков В. Э., Королев П. С. Методика оценки функциональной безопасности маршрутизаторов на основе вероятностно-физической модели. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 49–60. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60, EDN: SJKZBG

**For citation:** Poleskiy S. N., Tumkovskiy S. N., Tsvetkov V. E., Korolev P. S. Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 49–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60, EDN: SJKZBG

### Введение

Сетевые маршрутизаторы на протяжении длительного времени занимают важное место в составе критически значимой информационной инфраструктуры (КИИ), широко применяемой в различных отраслях. В настоящее время обеспечение безопасности таких объектов регулируется рядом нормативных документов, в числе которых:

- приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239;
- постановление Правительства РФ от 08.02.2018 № 127;
- национальный стандарт РФ ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 [1].

Стандарт представляет собой фундаментальный документ в области функциональной

безопасности, регламентирующий требования к жизненному циклу электрических, электронных и программно-управляемых систем, предназначенных для обеспечения защиты жизни, здоровья людей и охраны окружающей среды. Несмотря на то, что данный стандарт разрабатывался преимущественно для промышленных и технологических систем с повышенными требованиями к безопасности, его методологические положения обладают универсальным характером и могут быть адаптированы для решения задач анализа функциональной безопасности компонентов КИИ. Применение положений ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 обеспечивает системный подход к оценке рисков и идентификации опасных отказов [2]. Стандарт также регламентирует

разработку и верификацию мер для достижения требуемого уровня полноты безопасности.

Одним из основных количественных показателей при проведении такой оценки выступает уровень полноты безопасности (УПБ). Однако применимость существующих методических указаний ограничена в условиях переменной интенсивности отказов, характерной для многих объектов КИИ. Ориентация исключительно на один тип отказа способна исказить результат, что влечет за собой риск недоступности системы вследствие отказа наименее надежного элемента [3].

Невозможно провести корректную оценку функциональной безопасности без объективных данных о параметрах надежности, в частности безотказности оборудования. При этом заниженные прогнозные значения УПБ, полученные на основе упрощенных допущений, часто приводят к излишним мерам обеспечения надежности, таким как избыточное резервирование, что увеличивает структурную сложность системы, ее стоимость и снижает общую эксплуатационную эффективность.

Таким образом, отсутствие целесообразных, адаптированных под реальные условия эксплуатации количественных методик оценки функциональной безопасности сетевых маршрутизаторов затрудняет принятие обоснованных технических решений. Это влечет нерациональное расходование ресурсов и повышает риски нарушения устойчивости функционирования КИИ. Многочисленные уязвимости могут вызывать отказы устройств и повышать угрозу недоступности КИИ. В связи с этим целью настоящей работы является разработка подхода к повышению точности оценки УПБ маршрутизаторов с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации. Необходимость исследования обусловлена тем, что существующие методики не отражают специфику деградационных процессов в реальных условиях, что существенно снижает достоверность оценки и практическую применимость выводов.

## Обзор предметной области

Функциональная безопасность является неотъемлемой частью общей безопасности технических систем и тесно связана с их надежностью. Эта взаимосвязь особенно важна для областей, где предъявляются повышенные требования к обеспечению безотказной и устойчивой работы в условиях возможных отказов отдельных элементов или подсистем. Реализация функциональной безопасности направлена на снижение рисков, связанных с отказами, и достигается за

счет проектирования архитектуры, обеспечивающей предотвращение и контроль опасных состояний [4].

Одним из примеров тесной связи между функциональной безопасностью и надежностью служит метод расчета вероятности опасного отказа в час (Probability of Failure per Hour, PFH), основанный на использовании средней наработки до отказа (Mean Time to Failure, MTTF). Данный подход подчеркивает, что корректное количественное определение параметров надежности непосредственно влияет на точность оценки уровня функциональной безопасности.

Таким образом, надежность компонентов системы выступает одним из базовых факторов, определяющих уровень ее функциональной безопасности. Более надежные элементы снижают вероятность возникновения опасных отказов, тем самым повышая соответствие системы требованиям конкретного уровня полноты безопасности.

Согласно положениям теории надежности, отказы технических систем условно подразделяются на три основные категории: производственные, связанные с дефектами, возникающими на этапе изготовления; внезапные, происходящие без предварительных признаков; постепенные, развивающиеся в результате накопления деградационных процессов [5]. Такая классификация отражает различия в степени предсказуемости момента наступления отказа.

Внезапные отказы характеризуются отсутствием предварительных диагностируемых признаков и, как правило, проявляются в виде мгновенной утраты работоспособности отдельного компонента или всей системы. Выявление таких отказов с использованием стандартных методов технического контроля затруднено или практически невозможно.

Постепенные отказы характеризуются монотонным отклонением эксплуатационных параметров от номинальных значений, что создает возможность для их раннего обнаружения посредством диагностических методов и применения prognostических моделей. Однако развитие методов анализа технического состояния выявляет ограниченность жесткого деления отказов на внезапные и постепенные. Современные исследования указывают на условность этой границы, вызванную в первую очередь уровнем доступных диагностических средств.

Многие отказы считаются внезапными исключительно по причине отсутствия возможности мониторинга параметров, предшествующих их возникновению. Расширение спектра контролируемых характеристик и совершенствование мониторинга позволяют пересматривать данную классификацию в пользу более гибкого подхода,

основанного на реальной наблюдаемости процессов деградации.

Время наработки до отказа представляет собой случайную величину и описывается с использованием вероятностных распределений. От корректности выбора модели распределения зависит точность оценки надежности, поскольку различные модели могут давать существенно отличающиеся результаты. Современная теория надежности базируется на вероятностной парадигме, где отказы трактуются как случайные события, а система рассматривается в бинарной логике: работоспособна или нет. Хотя подобные подходы обладают строгим математическим обоснованием, на практике они зачастую не отражают физическую сущность отказов и игнорируют реальные условия эксплуатации конкретных компонентов. Это может приводить к снижению точности и надежности получаемых оценок.

В процессе оценки надежности технических систем применяются как однопараметрические, так и двухпараметрические вероятностные модели. Каждая из них имеет ограниченную сферу применения и используется с учетом особенностей отказных процессов и доступной информации [6].

К однопараметрическим распределениям относятся:

- экспоненциальное распределение;
- нормальное распределение;
- логнормальное распределение.

Двухпараметрическими распределениями являются:

- альфа-распределение;
- распределение Вейбулла;
- диффузионное немонотонное/монотонное распределение.

В инженерной практике преобладают экспоненциальная и вейбулловская модели. Последняя лучше отражает реальные данные, но требует большего объема выборки и вычислительных ресурсов. При анализе надежности уникальных или высоконадежных изделий классические статистические методы ограничены из-за дефицита достоверной информации об отказах. Кроме того, представление отказов как исключительно случайных событий затрудняет установление связи между показателями надежности и физическими механизмами деградации. Это предопределяет необходимость применения интегративных подходов, объединяющих вероятностное моделирование с анализом физической природы отказов и механизмов деградации.

Классификация методов оценки надежности определяется характером исходной информации об объекте и этапом его жизненного цикла. Методы оценки надежности классифицируются на априорные, апостериорные и комбинирован-

ные. Априорные методы основаны на теоретическом моделировании отказов и применяются преимущественно на стадии проектирования при отсутствии эксплуатационных данных. Апостериорные методы используют эмпирические данные, полученные в ходе эксплуатации, испытаний или мониторинга. Комбинированные методы объединяют теоретическое моделирование с результатами наблюдений, обеспечивая баланс между расчетной обоснованностью и практической достоверностью на разных этапах жизненного цикла системы.

Современное направление в области надежности связано с разработкой методов, интегрирующих физико-механические модели процессов деградации с вероятностными оценками. Комплексный подход обеспечивает адаптивность оценки надежности, позволяя учитывать реальные эксплуатационные условия даже при ограниченной статистике, что особенно важно на разных этапах жизненного цикла оборудования.

Для оценки параметров распределений, описывающих надежность технических систем на основе экспериментальных данных, наиболее обоснованным и широко применяемым считается метод максимального правдоподобия [7]. Этот подход позволяет получить статистически устойчивые и асимптотически несмещенные оценки с минимальной дисперсией. Метод эффективно использует информацию, содержащуюся в выборке, и особенно подходит для задач, где доступен достаточный массив наблюдений и реализуемы численные алгоритмы оптимизации.

В тех случаях, когда вычислительные ресурсы ограничены или необходимы приближенные расчеты, в инженерной практике используется моментный метод. Его суть заключается в приравнивании эмпирических моментов распределения к соответствующим теоретическим моментам [8]. Несмотря на меньшую точность по сравнению с методом максимального правдоподобия, при выборках свыше 100 наблюдений расхождения в результатах, как правило, не оказывают существенного влияния на итоговую надежность оценку.

Вероятностно-физический подход [9] представляет собой современную методологию анализа надежности, в которой технический объект рассматривается не как статическая система, а как динамически изменяющаяся структура, подверженная постепенному накоплению повреждений. В этой концепции отказ рассматривается не как внезапное событие, а как закономерный исход длительного воздействия физических и химических факторов. Ключевая идея заключается в том, что каждый элемент системы со временем претерпевает деградационные изменения, например, в результате износа, уста-

лостных процессов, коррозионного разрушения или диффузии.

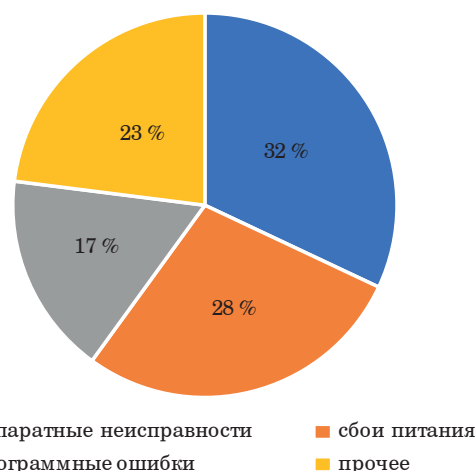
Принципиальное отличие вероятностно-физических моделей от чисто вероятностных заключается в наличии физически осмысленных параметров, отражающих реальные механизмы старения и разрушения компонентов. Это обеспечивает более глубокую интерпретацию результатов и позволяет повысить точность оценки надежности за счет учета индивидуальных особенностей функционирования изделия. При наличии измеряемого параметра, характеризующего ресурс или состояние элемента (например, температуры, сопротивления, выходной мощности), и возможности его мониторинга становится доступной реализация прогностического подхода к оценке надежности [10]. В этом случае двухпараметрические вероятностно-физические модели позволяют адаптировать надежностный анализ к конкретным условиям эксплуатации, что особенно актуально для критически важных систем с нестандартными режимами работы.

Таким образом, вероятностно-физический подход обеспечивает как теоретическую обоснованность, так и практическую применимость методов оценки надежности в условиях ограниченной статистической информации, позволяя осуществлять индивидуализированное прогнозирование ресурса.

Маршрутизаторы являются ключевым элементом в составе КИИ, обеспечивая функционирование большинства сетевых сервисов и каналов связи. Около 82 % сетевых устройств в их инфраструктуре составляют именно маршрутизаторы. Несмотря на сравнительно высокую надежность — при среднегодовой вероятности отказа менее 5 % — масштаб их распространения делает данный класс оборудования одним из основных источников сбоев, способных повлиять на устойчивость и доступность сетевых систем. Основными источниками отказов при этом выступают аппаратные неисправности, нестабильность электропитания, а также программные сбои. Соотношение указанных факторов представлено на рис. 1.

Сходные закономерности фиксируются и в инфраструктуре других ведущих технологических компаний. По статистике, порядка 3 % маршрутизаторов, используемых компанией Microsoft в дата-центрах, выходят из строя в течение первых 80 дней эксплуатации.

Проведенный анализ позволяет заключить, что по мере усложнения архитектуры маршрутизаторов и внедрения новых технологических решений возрастает число потенциальных уязвимостей. Многие из них могут приводить к отказу устройств, что в свою очередь создает угрозу недоступности КИИ.



■ **Рис. 1.** Статистический анализ отказов сетевых маршрутизаторов Microsoft

■ **Fig. 1.** Statistical analysis of Microsoft network router failures

### Подготовка исходных данных

Для выполнения надежностного анализа программно-аппаратных систем требуется заранее сформировать достоверную и репрезентативную базу данных. Это обеспечивается тщательным планированием объема, условий и порядка проведения испытаний для получения информации, необходимой для обоснованных оценок надежности и функциональной безопасности. Основной задачей на данном этапе является получение объективных параметров, позволяющих количественно оценить среднюю наработку до отказа. В качестве основы анализа используются данные, отражающие моменты отказов, текущее состояние устройства и признаки развития деградиационных процессов.

При наличии доступа к исследуемому устройству рациональным является проведение ускоренных испытаний, направленных на искусственное интенсифицирование отказных процессов. Такой подход позволяет в ограниченные сроки получить статистически значимые данные, а также выявить тренды изменения параметров, предшествующих наступлению отказа.

Ускоренные испытания предполагают создание условий, при которых внешние воздействия усиливаются для сокращения времени до наступления отказа, сохраняя при этом достоверность получаемых данных [11]. В зависимости от цели исследования применяются различные режимы: штатный (нормальный), с усиленными нагрузками (форсированный) либо их комбинации (комбинированный), позволяющие воспроизвести более сложные сценарии эксплуатации и ускорить проявление деградиационных эффектов [12].

Форсированные режимы особенно эффективны для высоконадежных устройств, таких как маршрутизаторы, где при нормальных условиях отказов мало и длительность традиционных испытаний сопоставима со сроком службы устройства.

Предметом исследования выбран маршрутизатор Keenetic Starter – представитель массового класса сетевых устройств, применяемых в домашних и малых корпоративных сетях.

Согласно литературным источникам, МТТФ подобных устройств составляет от 20 000 до 30 000 часов [13]. В рамках текущей работы для целей моделирования и последующей проверки результатов расчетов принято усредненное ориентировочное значение  $MTTF = 30\ 000$  ч.

Для получения достаточного объема информации в разумные сроки было решено провести ускоренные определяющие испытания с форсированным воздействием. Такой подход позволяет целенаправленно ускорить развитие отказов, что критически важно для выявления закономерностей деградации и построения статистически обоснованных надежностных моделей.

Для имитации условий эксплуатации маршрутизатора при высоких нагрузках были задействованы программные инструменты iperf3 и hping3, представляющие собой надежные средства нагрузочного тестирования телекоммуникационного оборудования. Благодаря их совместному применению воспроизведены разнообразные сценарии сетевой активности, максимально приближенные к реальной рабочей среде.

Такой подход обеспечил комплексную оценку надежности устройства при воздействии различных типов трафика, включая интенсивную передачу данных, имитацию атак на сетевой уровень и обращение с фрагментированными пакетами. Это позволило объективно проанализировать устойчивость маршрутизатора к нагрузочным

воздействиям. Результаты, зафиксированные в процессе экспериментальных испытаний, представлены в табл. 1.

В ходе испытаний с периодичностью наблюдений один день регистрировались значения скорости передачи данных, характеризующие текущую нагрузку и производительность устройства. Результаты измерений зафиксированы:

- скорость передачи – [75,0; 74,93; 74,83; 74,75; 74,69; 74,64; 74,55; 74,45] Мбит/с;
- приращение  $\Delta Z$  – [0,07; 0,1; 0,08; 0,06; 0,05; 0,09; 0,1];
- начальное значение  $\Pi_0$  – 75 Мбит/с;
- предельное значение  $\Pi$  – 5 Мбит/с.

### Анализ методик оценки надежности

Анализ надежности маршрутизатора Keenetic Starter с применением экспоненциального закона распределения времени безотказной работы начинается с построения структурной модели устройства, включающей выделение ключевых функциональных элементов, определяющих его работоспособность. Расчет средней наработки до отказа для устройства в целом осуществляется на основе ориентировочных значений надежности каждого элемента.

В качестве исходных данных использованы справочные значения МТТФ, приведенные в нормативных справочниках по надежности MIL-HDBK-217 и HDBK-217Plus, соответствующие типовым условиям эксплуатации электронных устройств:

- ОЗУ, флеш-память, ЦПУ – 60 000 ч;
- блок питания, антенны Wi-Fi – 60 000 ч;
- порты Ethernet – 90 000 ч.

Средняя наработка до отказа устройства при поэлементном анализе рассчитывается как величина, обратная сумме обратных значений средней наработки до отказа компонентов. При этом учитывается общее количество элементов  $n$ , входящих в состав устройства [14]:

$$MTTF = \sum_i^n \frac{1}{MTTF_i} \quad (1)$$

На основе поэлементного анализа и ориентировочных данных, представленных выше, рассчитанное значение  $MTTF = 20\ 225$  ч.

Каждый отказ устройства может быть соотнесен с определенным механизмом деградации, обусловленным физико-химическими или конструктивными факторами. В этом контексте распределение отказов представляется в виде совокупности подмножеств, каждое из которых характеризуется долей отказов  $p_j$ , приходящейся на соответствующий механизм отказа.

■ **Таблица 1.** Анализ отказов и результатов мониторинга маршрутизатора Keenetic Starter

■ **Table 1.** Analysis of failures and monitoring results of the Keenetic Starter router

Вид отказа	Ресурс, ч	ОЗУ, Мбайт	ЦПУ, %	Температура, °С
Программные сбои	32 900	34,6	86	58
Программные сбои	22 500	32,7	87	59
Программные сбои	20 400	34,2	88	62
Тепловая перегрузка	29 600	27,5	45	67
Тепловая перегрузка	23 500	26,3	55	65

Для исследуемого маршрутизатора выполнена количественная оценка вклада различных механизмов деградации. Полученные значения представлены в табл. 2.

Значение обобщенного коэффициента вариации  $v$  вычисляется из выражения

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^m p_i^2}}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество рассматриваемых процессов деградации;  $v_i$  – коэффициент вариации, соответствующий  $i$ -му механизму отказа;  $p_i$  – доля отказов, обусловленная  $i$ -м процессом деградации.

Подставив значения из табл. 2 в формулу (2), получим результирующее значение обобщенного коэффициента вариации  $v = 0,8$ .

Для дальнейшего анализа используется функция эмпирического распределения  $F_j$ , значения которой сопоставляются с соответствующими квантилями нормированного нормального распределения  $U_{F_j}$ , определяемыми как

■ **Таблица 2.** Классификация видов отказов маршрутизатора Keenetic Starter

■ **Table 2.** Classification of failure types of the Keenetic Starter router

Тип отказа	Доля отказов $p_j$	Коэффициент вариации $v$
Механический износ портов	0,10	0,40
Тепловая перегрузка	0,08	0,18
Деградация памяти	0,07	0,50
Повреждение пайки	0,07	0,70
Нестабильность питания	0,18	0,30
Сбои цепей питания	0,10	0,50
Программные сбои	0,17	0,22
Прочие причины	0,23	0,8

■ **Таблица 3.** Расчетные значения квантилей нормального распределения уровня  $F_j$

■ **Table 3.** Calculated values of the quantiles of the normal distribution of level  $F_j$

Параметр	Значения квантилей при числе отказов $n$				
	1	2	3	4	5
$t_j$	20 400	22 500	23 500	29 600	32 900
$F_j$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$U_{F_j}$	0,312	0,412	0,522	0,634	0,763

аргументы функции стандартного нормального распределения для уровня  $F_j$ . Соответствующие значения ресурса  $t_j$ , эмпирической функции  $F_j$  и квантилей  $U_{F_j}$  приведены в табл. 3.

Средняя наработка до отказа в данном виде анализа вычисляется по выражению

$$MTTF = \frac{1}{m} \left( \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{U_{F_j}} \right). \quad (3)$$

На основе значений из табл. 3  $MTTF = 50\,972$  ч.

Для оценки текущего технического состояния компонентов маршрутизатора целесообразно использовать диагностический параметр, обладающий высокой чувствительностью к изменениям, связанным с процессами деградации. Такой параметр может выступать в роли индикатора надежности, обеспечивая возможность прогнозирования отказа до его фактического наступления.

Средняя скорость изменения этого параметра  $a$  вычисляется на основе числа наблюдаемых приращений  $m$ , шага измерений по времени  $\Delta t$  и приращений параметра деградации между соседними измерениями  $\Delta Z_i$ :

$$a = \frac{1}{m \cdot \Delta t} \sum_{i=1}^m \Delta Z_i. \quad (4)$$

Выражение для расчета коэффициента вариации имеет вид

$$v = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left( \Delta Z_i - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta Z_j \right)^2 \right]^{1/2} \times \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta Z_i \right)^{-1}. \quad (5)$$

На основе определенных значений  $a$  и  $v$  можно количественно описать надежность элемента, что дает возможность прогнозировать наступление отказа и заблаговременно завершать эксплуатацию устройства, минимизируя вероятность внезапного отказа и сопутствующих потерь. Средняя наработка до отказа рассчитывается по выражению

$$MTTF = \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right) \frac{P_0 - P}{a}. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае  $MTTF$  составляет 22 042 ч.

Для получения более достоверной оценки надежности маршрутизатора следует учитывать воздействие основных факторов эксплуатации, включая температурные условия, уровень загрузки

процессора и активность использования оперативной памяти [15]. Пренебрежение этими аспектами может привести к недостоверной или заниженной характеристике надежности устройства.

При анализе надежности технических систем важно учитывать влияние множества факторов, определяющих различные механизмы отказа [16]. В таких условиях функция плотности вероятности отказа может быть представлена в виде суммарной модели, объединяющей вклады отдельных механизмов. Модель включает число типов отказов  $p$ , коэффициенты  $\lambda_g$ , отражающие долю отказов, связанных с механизмом  $g$ , а также функцию плотности вероятности отказа  $f_g(t, z_t)$ , зависящую от времени  $t$  и состояния системы  $z_t$ :

$$f(t, z_t) = \sum_{g=1}^p \lambda_g f_g(t, z_t). \quad (7)$$

Функция  $f_g(t, z_t)$  определяется как произведение функции интенсивности отказов  $h_g(t, z_t)$  и функции надежности  $R_g(t, z_t)$ :

$$f_g(t, z_t) = h_g(t, z_t) \cdot R_g(t, z_t). \quad (8)$$

Связь между функцией интенсивности отказов и функцией надежности описывается экспоненциальным выражением, содержащим интеграл от функции интенсивности отказов:

$$R_g(t, z_t) = \exp\left[-\int_0^t h_g(t, z_t) dt\right]. \quad (9)$$

Для распределения Вейбулла функция интенсивности отказов включает параметр формы  $\beta_g$ , который определяет характер изменения интенсивности, параметр масштаба  $\eta_g$ , связанный с характерным временем отказа, а также вектор коэффициентов чувствительности  $\gamma$ , отражающий влияние параметров мониторинга:

$$h_g(t, z_t) = \frac{\beta_g}{\eta_g} \left(\frac{t}{\eta_g}\right)^{\beta_g-1} \exp(\gamma \cdot z_t). \quad (10)$$

Идентификация параметров функции плотности вероятности отказов требует данных о времени наступления отказов и значений ключевых параметров устройства на фиксированных моментах времени [17–19]. Методом максимального правдоподобия в сочетании с алгоритмом оптимизации Нелдера – Мида [20]

$$L(\beta, \eta, \gamma, \lambda) = \prod_{g=1}^p \left( \prod_{i=1}^{n_g} \lambda_g f_g(t_i, z_t) \prod_{s=1}^{m_g} \lambda_g R_g(t_s, z_t) \right) \quad (11)$$

могут быть получены оптимальные оценки параметров модели:  $\beta_1 - 4,36$ ;  $\eta_1 - 3000$ ;  $\beta_2 - 2,86$ ;  $\eta_2 - 3000$ ;  $\lambda - 0,60$ ;  $\gamma_1 - -10,00$ ;  $\gamma_2 - -8,02$ ;  $\gamma_3 - -2,90$ .

Кривые плотности распределения Вейбулла, соответствующие различным типам отказов (рис. 2), отражают характерные различия во временных параметрах процессов деградации.

Средняя наработка до отказа определяется как интеграл от произведения времени на функцию плотности распределения времени до отказа  $f(t)$ :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (12)$$

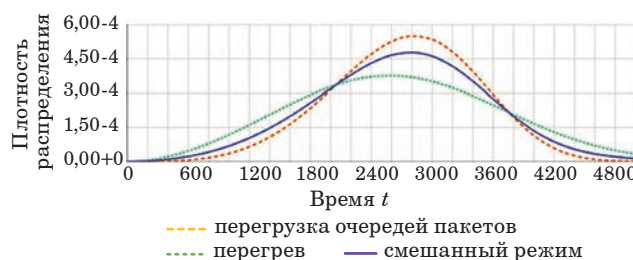
На основе расчета по данному выражению значение MTTF составляет 28 790 ч.

Анализ Вейбайеса представляет собой частный случай оценки параметров распределения Вейбулла, при котором параметр формы  $\beta$  задается заранее, а наличие по крайней мере одного отказа в выборке считается заведомо неизбежным [21]. Этот подход применяется в условиях ограниченного объема данных, в частности при малых или нулевых выборках отказов.

Для корректного применения метода предполагается выполнение трех условий: известно значение параметра формы  $\beta$  для рассматриваемого вида отказа; зафиксировано количество зарегистрированных отказов; в выборке обязательно произойдет как минимум один отказ.

При соблюдении указанных предпосылок параметр масштаба  $\eta$  вычисляется методом максимального правдоподобия с использованием следующего выражения. В формуле используются заданный параметр формы  $\beta$ , времена отказов  $t_i$  для  $i$ -го экземпляра и общее количество отказов  $NF$ :

$$\eta = \left( \frac{\sum_{i=1}^m t_i^\beta}{NF} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (13)$$



■ **Рис. 2.** Кривые плотности распределения Вейбулла  
 ■ **Fig. 2.** Weibull distribution density curves

При заданном значении параметра формы  $\beta = 2$  и на основании выражения (13) получено значение параметра масштаба  $\eta = 26\,203$ .

Средняя наработка до отказа для распределения Вейбулла при известных параметрах формы и масштаба рассчитывается по формуле

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right). \quad (14)$$

На основании проведенных расчетов получено значение  $MTTF = 23\,222$  ч.

Анализ Вейбайеса, как правило, уступает по точности классическому анализу Вейбулла, однако применяется при ограниченности исходных данных.

### Разработка методики оценки функциональной безопасности

Значения средней наработки до отказа маршрутизатора Keenetic Starter (табл. 4) рассчитаны с применением различных методов, рассмотренных в настоящем исследовании. В качестве эталона используется значение  $MTTF = 30\,000$  ч.

Результаты вычислений относительной погрешности показали, что оценка средней наработки до отказа, выполненная с использованием смешанной модели пропорциональных рисков, характеризуется минимальным отклонением и наибольшим соответствием эталонному значению.

Средняя частота опасного отказа в час

$$PFH = \frac{1}{MTTF}. \quad (15)$$

- **Таблица 4.** Средняя наработка до отказа
- **Table 4.** Mean time to failure

Метод	MTTF, ч	Относительная погрешность, %
Поэлементный анализ (распределение экспоненциальное)	20 225	48,33
Анализ на основе статистики отказов	50 972	41,1
Анализ на основе статистических характеристик процессов деградации	22 042	36,1
Анализ Вейбайеса	23 222	29,2
Анализ на основе смешанной модели пропорциональных рисков	28 790	4,2

Сопоставление рассчитанного значения  $PFH = 3,47 \times 10^{-5}$  1/ч для маршрутизатора Keenetic Starter с установленными в ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 диапазонами для уровней полноты безопасности показало, что полученное значение не соответствует ни одному из допустимых уровней УПБ. Этот результат указывает на непригодность использования данного устройства в составе КИИ. Эксплуатация оборудования с подобными показателями надежности может привести к сбоям в функционировании автоматизированных систем управления, нарушениям технологических процессов, потере контроля над объектами, а также созданию рисков для информационной безопасности.

Разработанная методика оценки функциональной безопасности основана на последовательном выполнении четырех основных этапов.

Структура методики представлена на рис. 3 в виде IDEF0-диаграммы.

На первом этапе (блок А1) проводятся испытания исследуемого объекта с регистрацией времени отказов, мониторингом ключевых параметров устройства и классификацией каждого отказа по типу с использованием анализа FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).

Второй этап (блок А2) включает расчет параметров функций плотности вероятности отказов по выражениям (7)–(11) и вычисление  $MTTF$  по формуле (12).

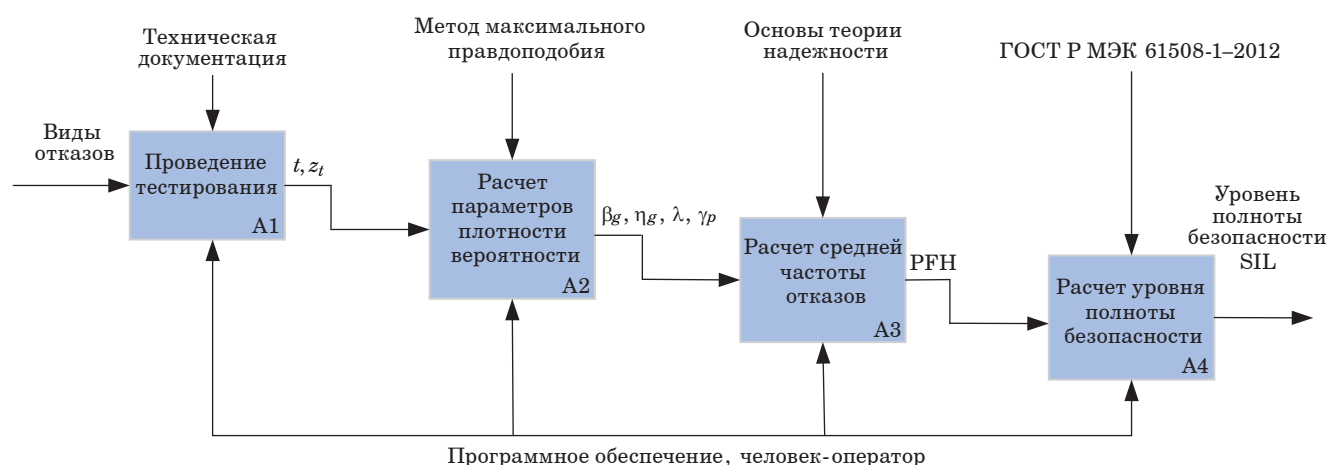
На третьем этапе (блок А3) выполняется определение средней частоты опасного отказа  $PFH$  согласно формуле (15).

Заключительный этап (блок А4) предусматривает вычисление уровня полноты безопасности на основе полученного значения  $PFH$  в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012.

При отсутствии возможности собрать полный набор входных данных для расчетов рекомендуется использовать метод Вейбайеса [формулы (13), (14)] в качестве альтернативного подхода для приближенной оценки средней наработки до отказа, что позволяет заменить выполнение блоков А1–А2.

### Оценка экономического эффекта предлагаемой методики

Для подтверждения эффективности разработанной методики была проведена оценка ее экономического эффекта. Экономический эффект определяется как разность суммарных ожидаемых затрат при использовании классических моделей надежности и предложенной вероятностно-физической методики. Совокупные затраты  $C_{total}$  могут быть представлены выражением



■ **Рис. 3.** Методика оценки функциональной безопасности [22]  
 ■ **Fig. 3.** Methodology for assessing functional safety [22]

$$C_{total} = C_{res} + C_{risk}, \quad (16)$$

где  $C_{res}$  — затраты на резервирование оборудования;  $C_{risk}$  — ожидаемый экономический ущерб от опасных отказов:

$$C_{risk} = PFH \cdot T \cdot C_{fail}. \quad (17)$$

Здесь  $T$  — период эксплуатации;  $C_{fail}$  — ущерб от одного отказа, связанный с простоем сети и восстановлением работоспособности.

На основании выражений (16), (17) можно рассмотреть правдоподобный сценарий эксплуатации маршрутизатора в составе КИИ. Например, при стоимости простоя сети 150 тыс. руб./ч и среднем времени восстановления 2 ч ущерб от одного отказа  $C_{fail} = 300$  тыс. руб. В качестве периода эксплуатации взято значение  $T = 43\,800$  ч.

Согласно табл. 4 для классической математической модели, основанной на экспоненциальном распределении (MTTF = 20 225 ч), ожидаемый ущерб  $C_{risk1}$  составляет 649,69 тыс. руб.

Более того, высокая неопределенность оценки приводит к необходимости резервирования устройства, что требует около 100 тыс. руб. дополнительных затрат. В этом случае совокупные затраты  $C_{total1} = 749,69$  тыс. руб.

В случае же предложенной методики, разработанной на основе анализа смешанной модели пропорциональных рисков, согласно табл. 4 (MTTF = 28 790 ч) ожидаемый ущерб  $C_{risk2} = 456,41$  тыс. руб.

Повышенная точность оценки позволяет отказаться от избыточного резервирования, и тогда суммарные затраты определяются только ожидаемым риском отказа, т. е.  $C_{total2} = C_{risk2} = 456,41$  тыс. руб.

Тогда экономический эффект применения предложенной методики  $\Delta C = C_{total1} - C_{total2} = 293,28$  тыс. руб.

Данное значение соответствует снижению совокупных затрат разработанной методики оценки примерно на 39 %.

### Заключение

Экспоненциальное распределение, предполагающее постоянную интенсивность отказов, игнорирует процессы старения и накопления повреждений, что существенно ограничивает применимость данной модели при оценке надежности. Пренебрежение деградационными процессами может привести к ошибочным инженерным решениям, поскольку в расчетах не учитывается необходимость использования надежных материалов или выполнения профилактических мероприятий.

Для более точной оценки надежности необходимо учитывать физические характеристики компонентов. Проведенное исследование показало, что наилучшие результаты достигаются при использовании смешанной модели пропорциональных рисков, учитывающей как статистику отказов, так и значения диагностических параметров.

Ключевыми преимуществами разработанной методики оценки функциональной безопасности являются высокая точность определения надежности характеристик и уровня полноты безопасности. Относительная погрешность при оценке средней наработки до отказа маршрутизатора Keenetic Starter составила 4,2 %, что подтверждает достоверность результатов и адекватность примененной модели. Точность определения уровня функциональной безопасности

достигается за счет корректного расчета интенсивности отказов, средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы, что особенно важно для систем критического назначения. Более того, предложенная методика экономически эффективнее существующей методики, основанной на экспоненциальном распределении, примерно на 39 %.

## Литература

- ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012. *Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования*. М., Стандартинформ, 2014. 58 с.
- Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. *Надежность и эффективность современного электроснабжения: монография*. Нижний Новгород, XXI век, 2021. 160 с.
- Лепешкин О. М., Карпов М. А., Остроумов О. А., Синюк А. Д. Методологический подход управления обеспечением функциональной безопасности и функциональной устойчивости системы связи критически важных объектов и объектов критической информационной инфраструктуры. *FISP-2021: Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации: сб. докл. III Всерос. науч. конф.*, Ставрополь, 30 ноября 2021 г. Ставрополь, 2021, с. 105–110. EDN: СТКМГQ
- Скляр В. В. *Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами*. М., Литрес, 2023. 384 с.
- O'Connor A. N. *Probability Distributions used in Reliability Engineering*. RIAC, 2011. 208 p.
- Meeker W. Q., Escobar L. A., Pascual F. G. *Statistical Methods for Reliability Data*. New York, John Wiley & Sons, 2021. 704 p.
- Perlman M. D. On the strong consistency of approximate maximum likelihood estimators. *Proceedings of the Sixth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, June 21–July 18 1970, Univ. California, Berkeley, California, 1970, vol. 1, pp. 263–281.
- Manole T., Ho N. Refined convergence rates for maximum likelihood estimation under finite mixture models. *International Conference on Machine Learning*, PMLR, 2022, pp. 14979–15006. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08786>
- Wang H., Liserre M., Blaabjerg F., Rimmen P., Jacobsen J., Kvisgaard T. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 97–114. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2290282>
- Lall P., Pecht M. G., Hakim E. B. *Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability: A Physics of Failure Approach*. CRC Press, 2020. 336 p.
- Zhan C., Zhu L., Dai J., Zhang Y., Liu J., Liu Z. Wear-out mechanism of press-pack IGBTs under accelerated aging test. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 10, no. 5, pp. 5132–5141. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3085590>
- Schall J. W., Glaws A., Doumon N. Y., Silverman T. J., Owen-Bellini M., Terwilliger K., Uddin M. A., Rana P. J. S., Berry J. J., Huang J., Schelhas L. T., Kern D. B. Accelerated stress testing of perovskite photovoltaic modules: Differentiating degradation modes with electroluminescence imaging. *Solar RRL*, 2023, vol. 7, no. 14, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1002/solr.202300229?urlappend>
- Peiravi A. Application of string matching in Internet Security and Reliability. *Marsland Press Journal of American Science*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 25–33.
- ГОСТ Р 27.013-2019. *Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности*. М., Стандартинформ, 2019. 46 с.
- Shama M. S., Alhathi A., Almulhim F., Gemeay A. M., Meraou M. A., Mustafa M. S., Hossam E., Aljohani H. M. Modified generalized Weibull distribution: Theory and applications. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38942-9>
- Ghazal M. G. M. A new extension of the modified Weibull distribution with applications for engineering data. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2023, vol. 74, Art. 103523. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103523>
- Xia G., Xie X., Wan J., Zhao W. Usability evaluation and maintenance decision of the optical cable based on Weibull proportional hazard model. *Proceedings of the 2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*, IEEE, 2020, pp. 1159–1162. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS51417.2020.00282>
- Zhang Q., Hua C., Xu G. A mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction utilising lifetime and monitoring data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 43, no. 1–2, pp. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.10.013>
- Lucan K., Dazer M., Waller J., Bertsche B. Analysis of the Weibull estimation for competing failure

## Финансовая поддержка

В данной научной работе использованы результаты проекта № ФИ-2025-4, выполненного в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2026 году.

modes. *Proceedings of the 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, IEEE, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAM.2018.8463053>

20. Takenaga S., Ozaki Y., Onishi M. Practical initialization of the Nelder – Mead method for computationally expensive optimization problems. *Optimization Letters*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 283–297. <https://doi.org/10.1007/s11590-022-01953-y>

21. Nahrath N. Practical experience in reliability analysis with low sample size and competing failure modes. *Proceedings of the 2022 6th International Con-*

*ference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, IEEE, 2022, pp. 99–103. <https://doi.org/10.1109/ICSRS56243.2022.10067411>

22. Демокидов А. Р., Полесский С. Н., Иванов И. А. Способ расчета уровня полноты безопасности современных маршрутизаторов. *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сб. тр. IV Национальной науч.-практ. конф.*, Калининград, 27–31 мая 2025 г., Калининград, 2025, с. 361–365.

UDC 62-192

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60

EDN: SJKZBG

### Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model

S. N. Polesskiy<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-8066-5162](https://orcid.org/0000-0002-8066-5162), [spolessky@hse.ru](mailto:spolessky@hse.ru)

S. N. Tumkovskiy<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-1647-2171](https://orcid.org/0000-0002-1647-2171), [stumkovskiy@hse.ru](mailto:stumkovskiy@hse.ru)

V. E. Tsvetkov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, Senior Lecturer, [orcid.org/0009-0004-3709-276X](https://orcid.org/0009-0004-3709-276X)

P. S. Korolev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-5720-0498](https://orcid.org/0000-0002-5720-0498)

<sup>a</sup>HSE University, 34, Tallinskaya St., 123458, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** The functional safety of network routers used in critical information infrastructure requires quantitative assessment based on dependability data. Existing safety assessment methods do not account for the influence of physical degradation mechanisms under real operating conditions, which reduces the credibility of the results and complicates the adoption of well-founded engineering decisions. **Purpose:** Is to improve the accuracy of the quantitative assessment of router functional safety by developing a methodology that takes into account degradation processes and equipment state parameters under operational conditions. **Results:** Five approaches to dependability assessment were verified: element-wise analysis based on the exponential distribution, analysis of failure statistics, estimation based on defining state parameters, the Weibayes method, and a mixed proportional hazards model. Comparative analysis shows that classical single-parameter models yield a relative error ranging from 29 to 48%, as they ignore the physical mechanisms of degradation. Based on a mixed proportional hazards model with a Weibull distribution, a refined methodology for assessing functional safety measures has been developed, providing a minimum error of 4.2% in estimating the mean time to failure. Experimental validation was performed on a Keenetic Starter router using accelerated testing and monitoring of diagnostic parameters (temperature, CPU load, and memory utilization). A probabilistic–physical approach based on monitoring key state parameters makes it possible to refine the estimate of the mean time to failure and to calculate the average frequency of dangerous failures. **Practical relevance:** The proposed methodology not only improves the accuracy of assessing dependability measures and the safety integrity level, but also reduces the total costs of ensuring the functional safety of network routers within critical information infrastructure, while enhancing the substantiation of engineering decisions in the design of secure networked systems.

**Keywords** – functional safety in critical infrastructure, safety integrity level, probability density function, router, mean time to failure.

**For citation:** Polesskiy S. N., Tumkovskiy S. N., Tsvetkov V. E., Korolev P. S. Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 49–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60, EDN: SJKZBG

### Financial support

The study uses the results of project No. FI-2025-4, carried out within the framework of the Basic Research Program at National Research University “Higher School of Economics”, in 2026.

### References

- IEC 61508-1:2010. *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements*. Moscow, Standardinform, 2014. 58 p. (In Russian).
- Papkov B. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L. *Nadyozhnost' i effektivnost' sovremennogo elektrosnabzheniya: monografiya* [Reliability and efficiency of modern power supply. Nizhny Novgorod, XXI Century Publ., 2021. 160 p. (In Russian).
- Lepeshkin O. M., Karpov M. A., Ostroumov O. A., Sinyuk A. D. Methodological approach to ensuring functional safety and functional stability of communication systems for critical facilities and critical information infrastructure. *Trudy III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii “Fundamental'nye problemy informacionnoy bezopasnosti v usloviyah cifrovoy transformatsii”* [Proc. of the All-Russian Scient. Conf. “Fundamental problems of information security in the context of digital transformation”]. Stavropol, 2021, pp. 105–110 (In Russian). EDN: CTKMGQ
- Skylar V. *Obespechenie bezopasnosti ASUTP v sootvetstvi s sovremennymi standartami* [Ensuring SCADA security in accordance with modern standards]. Moscow, Litres Publ., 2023, 384 p. (In Russian).
- O'Connor A. N. *Probability Distributions used in Reliability Engineering*. RIAC, 2011. 208 p.
- Meeker W. Q., Escobar L. A., Pascual F. G. *Statistical Methods for Reliability Data*. New York, John Wiley & Sons, 2021. 704 p.
- Perlman M. D. On the strong consistency of approximate maximum likelihood estimators. *Proceedings of the Sixth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, June 21–July 18 1970, Univ. California, Berkeley, California, 1970, vol. 1, pp. 263–281.
- Manole T., Ho N. Refined convergence rates for maximum likelihood estimation under finite mixture models. *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2022, pp. 14979–15006. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08786>
- Wang H., Liserre M., Blaabjerg F., Rimmens P., Jacobsen J., Kvisgaard T. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. *IEEE Journal of Emerging*

- and Selected Topics in Power Electronics, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 97–114. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2290282>
10. Lall P., Pecht M. G., Hakim E. B. *Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability: A Physics of Failure Approach*. CRC Press, 2020. 336 p.
  11. Zhan C., Zhu L., Dai J., Zhang Y., Liu J., Liu Z. Wear-out mechanism of press-pack IGBTs under accelerated aging test. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 10, no. 5, pp. 5132–5141. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3085590>
  12. Schall J. W., Glaws A., Doumon N. Y., Silverman T. J., Owen-Bellini M., Terwilliger K., Uddin M. A., Rana P. J. S., Berry J. J., Huang J., Schelhas L. T., Kern D. B. Accelerated stress testing of perovskite photovoltaic modules: Differentiating degradation modes with electroluminescence imaging. *Solar RRL*, 2023, vol. 7, no. 14, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1002/solr.202300229?urlappend>
  13. Peiravi A. Application of string matching in Internet Security and Reliability. *Marsland Press Journal of American Science*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 25–33.
  14. State Standard R 27.013-2019. *Dependability in technics. Reliability assessment methods*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 46 p. (In Russian).
  15. Shama M. S., Alhathi A., Almulhim F., Gemeay A. M., Mer-aou M. A., Mustafa M. S., Hossam E., Aljohani H. M. Modified generalized Weibull distribution: Theory and applications. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38942-9>
  16. Ghazal M. G. M. A new extension of the modified Weibull distribution with applications for engineering data. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2023, vol. 74, Art. 103523. <https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2023.103523>
  17. Xia G., Xie X., Wan J., Zhao W. Usability evaluation and maintenance decision of the optical cable based on Weibull proportional hazard model. *Proceedings of the 2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*, IEEE, 2020, pp. 1159–1162. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS51417.2020.00282>
  18. Zhang Q., Hua C., Xu G. A mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction utilizing lifetime and monitoring data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 43, no. 1–2, pp. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.10.013>
  19. Lucan K., Dazer M., Waller J., Bertsche B. Analysis of the Weibull estimation for competing failure modes. *Proceedings of the 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, IEEE, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAM.2018.8463053>
  20. Takenaga S., Ozaki Y., Onishi M. Practical initialization of the Nelder – Mead method for computationally expensive optimization problems. *Optimization Letters*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 283–297. <https://doi.org/10.1007/s11590-022-01953-y>
  21. Nahrath N. Practical experience in reliability analysis with low sample size and competing failure modes. *Proceedings of the 2022 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, IEEE, 2022, pp. 99–103. <https://doi.org/10.1109/ICSRS56243.2022.10067411>
  22. Demokidov A. R., Poleskiy S. N., Ivanov I. A. The method for calculation safety integrity level of modern routers. *Sbornik trudov IV Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii "Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovacionnye proekty"* [Proc. of the IV National Scient. and Pract. Conf. "Fundamental, exploratory, applied research and innovative projects"]. Kaliningrad, 2025, pp. 361–365 (In Russian).

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле вверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>