

УДК 004.052

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-815-823

## Гарантированные оценки гамма-процентного остаточного ресурса оборудования систем хранения данных

Михаил Иванович Ломакин<sup>1</sup>✉, Александр Владимирович Докукин<sup>2</sup>,  
Ирина Юрьевна Олтян<sup>3</sup>, Юлия Михайловна Ниязова<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация

<sup>4</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Российская Федерация

<sup>1</sup> lomakin@vniigochs.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>

<sup>2</sup> dokukin@vniigochs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>

<sup>3</sup> oltyan@vniigochs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2178-5033>

<sup>4</sup> y\_niyazova@edu.miigaik.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5589-4855>

### Аннотация

**Введение.** Активное развитие цифровых технологий, технологии интернета вещей, виртуальных испытаний требуют увеличения объемов собираемой и используемой информации, которая размещается в системах хранения данных (СХД). Стремительный рост объема данных ведет к ужесточению требований к СХД, например, основным из них — повышение надежности хранения больших объемов информации. Данное требование предполагает необходимость оценки надежности оборудования СХД. Для этих целей требуется оценка таких показателей надежности как вероятность безотказной работы, вероятность отказов, средний остаточный ресурс, гамма-процентный ресурс. Традиционно показатели надежности оцениваются при экспоненциальном распределении времени отказа. В реальной ситуации выборки времени отказов оборудования СХД являются малыми, по которым невозможно однозначно идентифицировать исходное распределение. В работе предложена модель оценки показателей надежности как гамма-процентный остаточный ресурс в условиях неполных данных, представленных малыми выборками случайных величин времени безотказной работы оборудования. Научная новизна работы состоит в получении общего решения задачи определения гарантированного гамма-процентного остаточного ресурса оборудования в условиях неполных данных, представленных малыми выборками наработок до отказа оборудования. **Метод.** Математическая формализация задачи оценки гамма-процентного остаточного ресурса оборудования СХД в условиях неполных данных, представленных малыми выборками, выполнена в виде модели стохастического уравнения. Решением уравнения является гарантированная (нижняя, верхняя) оценка гамма-процентного остаточного ресурса оборудования. **Основные результаты.** Предложена модель оценки гамма-процентного остаточного ресурса оборудования СХД в условиях неполных данных. Решена в общем случае задача нахождения гарантированных (нижних и верхних) оценок гамма-процентного остаточного ресурса оборудования на множестве функций распределения времени безотказной работы оборудования с заданными моментами, равными выборочным моментам, определяемым по малым выборкам. При двух моментах времени безотказной работы оборудования получены аналитические соотношения для определения гамма-процентного остаточного ресурса. Работоспособность модели продемонстрирована на примере определения нижней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса модели дискового массива HP EVA P6500. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы специалистами при оценке и оптимизации гамма-процентного остаточного ресурса оборудования СХД.

### Ключевые слова

система хранения данных, гамма-процентный ресурс, модель, моменты распределения, вероятность, гарантированные оценки

**Ссылка для цитирования:** Ломакин М.И., Докукин А.В., Олтян И.Ю., Ниязова Ю.М. Гарантированные оценки гамма-процентного остаточного ресурса оборудования систем хранения данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 815–823. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-815-823

© Ломакин М.И., Докукин А.В., Олтян И.Ю., Ниязова Ю.М., 2024

## Guaranteed estimates of the gamma percent residual life of data storage equipment

Mikhail I. Lomakin<sup>1</sup>✉, Alexander V. Dokukin<sup>2</sup>, Irina Yu. Oltyan<sup>3</sup>, Yulia M. Niyazova<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation

<sup>4</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064, Russian Federation

<sup>1</sup> lomakin@vniigochs.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>

<sup>2</sup> dokukin@vniigochs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>

<sup>3</sup> oltyan@vniigochs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2178-5033>

<sup>4</sup> y\_niyazova@edu.miigaik.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5589-4855>

### Abstract

The active development of digital technologies, Internet of Things technologies, and virtual tests requires an increase in the volume of information collected and used, which is placed in data storage systems. The rapid growth of data volume leads to stricter requirements for storage. One of the main requirements for storage is to increase the reliability of storing large amounts of information. This implies the need to assess the reliability of storage equipment. For these purposes, it is necessary to evaluate such reliability indicators as the probability of failure-free operation, the probability of failures, the average residual resource, and the gamma percent resource. Traditionally, reliability indicators are evaluated with an exponential distribution of failure time. In a real situation, the samples of failure times of storage equipment are small, for which it is impossible to uniquely identify the initial distribution. In this article, a model is proposed for evaluating reliability indicators as a gamma percent residual resource in conditions of incomplete data presented by small samples of random variables of equipment uptime. The scientific novelty of the presented work consists in obtaining a general solution to the problem of determining the guaranteed gamma percent residual life of equipment in conditions of incomplete data presented by small samples of developments before equipment failure. The mathematical formalization of the problem of estimating the gamma percent residual life of storage equipment in conditions of incomplete data presented by small samples is performed in the form of a stochastic equation model, the solution of which is a guaranteed (lower, upper) estimate of the gamma percent residual life of equipment. A model for estimating the gamma percent residual life of storage equipment in conditions of incomplete data is presented. In the general case, the problem of finding guaranteed (lower and upper) estimates of the gamma percent residual life of equipment on a set of functions for the distribution of uptime of equipment with specified moments equal to sample moments determined from small samples is solved. At two points in the uptime of the equipment, analytical ratios were obtained to determine the gamma percent residual life. The performance of the model is demonstrated by the example of determining the lower guaranteed estimate of the gamma percent residual resource of the HP EVA P6500 disk array model. The results obtained can be used by specialists in evaluating and optimizing the gamma percent residual life of storage equipment.

### Keywords

data storage system, gamma percentage resource, model, distribution moments, probability, guaranteed estimates

**For citation:** Lomakin M.I., Dokukin A.V., Oltyan I.Yu., Niyazova Yu.M. Guaranteed estimates of the gamma percent residual life of data storage equipment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 815–823 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-815-823

### Введение

В настоящее время наблюдается стремительный рост объема данных, используемых в информационных системах. Согласно докладу Международной корпорации данных в 2019 году этот объем составлял примерно 45 зеттабайт, а в 2025 — 175 зеттабайта<sup>1</sup> [1, 2]. Эффективное хранение таких больших объемов информации выдвигает жесткие требования к системам хранения данных (СХД).

СХД (или дисковая подсистема) — совокупность специализированного оборудования и программного обеспечения, которая предназначена для хранения и передачи больших массивов информации. СХД обеспечивает возможность организации хранения и ввода-вывода данных за счет использования дисковых площадок, характеризуемых [3] оптимальным распределением ресурсов.

Характерным представителем СХД данного класса являются дисковые массивы RAID<sup>2</sup> (избыточный массив независимых дисков), состоящие из  $n$  дисков, устойчивых к отказам до  $s - 1$  дисков и отказывающих вместе с потерей всех данных при отказе  $s$  и более дисков [4], и требующие пересоздания массива «с нуля» и восстановления данных из резервной копии.

Одним из основных требований к СХД, наряду с показателями, характеризующими скорость ввода-вывода данных и временем, необходимым для восстановления после сбоя, является надежность хранения. В связи с этим изучению вопросов экономически эффективного обеспечения требуемого уровня надежности функционирования оборудования СХД посвящен целый ряд работ [4–24]. В [5–13] изучены базовые методологические проблемы обеспечения надежности СХД, в том

<sup>2</sup> RAID (Redundant Array of Independent Disks) — это метод виртуализации («избыточный массив независимых дисков»). Представляет собой технологию, позволяющую объединять несколько дисков в единый логический том — с улучшенными параметрами.

<sup>1</sup> 1 зеттабайт равен  $10^9$  терабайт

числе методы построения высоконадежных, отказоустойчивых СХД.

В большом количестве исследований для оценки показателей надежности использован математический аппарат моделирования на основе применения цепей Маркова. Данный математический аппарат дает возможность оценки целого ряда показателей, характеризующих надежность СХД, включая среднее время наработки на отказ и восстановления, коэффициент готовности. Например, в работе [4] рассмотрен «набор состояний каждого фрагмента данных. Состояние 0 будет соответствовать неповрежденному кортежу из дисковых блоков. Отказ диска будет приводить к переходу из состояния  $i$  в состояние  $i + 1$ . Восстановление утраченного дискового блока будет соответствовать переходу из состояния  $i$  в состояние  $i - 1$ . Переход в состояние с индексом  $n - k + 1$  будет означать необратимую потерю данных. Такие состояния называются поглощающими, поскольку, однажды попав в него, система остается в нем навсегда. Поскольку вероятности перехода между состояниями в такой модели не зависят от предыстории, то такая система является классической цепью Маркова с непрерывным временем».

Полученная СХД описывается с помощью системы уравнений Колмогорова, в которой используются интенсивности перехода СХД из некоторого  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние. При этом предполагается, что данные интенсивности известны. В связи с тем, что количество дисков в СХД велико, то и количество состояний в системе уравнений Колмогорова также экспоненциально растет. При этом в [4] предложен «метод нахождения приближенно асимптотического решения для случая, когда среднее время между дисковыми отказами много больше времени восстановления после отказа». Этот метод также предполагает наличие полной информации об интенсивностях перехода системы.

В работах [14–16] использованы результаты работ [17, 18] и рассмотрены несколько специализированных моделей отказоустойчивой СХД. Исследователи исходят из предположения, что отказоустойчивый массив данных состоит из множества элементов с идентичными характеристиками, при этом он остается работоспособным при отказе не более  $s - 1$  элементов. Также полагаются известными интенсивности перехода отказоустойчивого массива данных из состояния  $j = 0 \dots s - 1$  в следующее состояние  $j + 1$ , вследствие сбоя функционирования очередного элемента. Кроме того, также полагаются известными интенсивности перехода из работоспособных состояний отказоустойчивого массива данных одномоментно в аварийное состояние  $s$  по причине критической ошибки системы управления массивом. Далее в работах [14–16] использована система уравнений Колмогорова, из которой с помощью предложенной рекуррентной схемы вычислений получены соответствующие показатели надежности СХД. Приведены примеры оценки показателей надежности для дисковых массивов с чередованием данных RAID-0, RAID-5 и RAID-6. Отметим, что в [14–16] предположено, что известна полная информация об интенсивностях переходов.

В [19] развиваются идеи работ [14–16, 20–22] и разработаны модели надежности на основе уравнений Колмогорова для массивов дисков RAID-5, RAID-6, RAID-10.

Входными параметрами моделей надежности является группа параметров, характеризующая интенсивность RAID: отказов дисков в RAID-массиве (одинакова для всех дисков), регенерации данных для диска в RAID-массиве, ошибок чтения диска в RAID-массиве, полного восстановления системы из аварийного состояния. Выходными параметрами моделей являются: среднее время наработки на отказ, коэффициент готовности, среднее время восстановления.

В работах [23, 24] оценивание характеристик надежности СХД выполнено с учетом типичного профиля функционирования СХД, включая такие показатели, как соотношение операций ввода и вывода данных, последовательного или случайного режима операций ввода/вывода данных, размеров информационного блока данных, объема проводимых операций ввода и вывода. Особенности указанных профилей учтены в модели за счет указания величин коэффициентов у соответствующих интенсивностей переходов СХД из одного состояния в другое или интенсивностей потока обслуженных заявок на ввод/вывод данных.

В [11, 25] рассмотрены вопросы анализа и оптимизации готовности компьютерной системы с учетом ее структуры, в которой узлы являются дублированными компьютерными системами. Произведен анализ готовности компьютерной системы к выполнению запросов с помощью марковских моделей с известными интенсивностями переходов.

В работе [26] анализируется информационная система с контейнерной виртуализацией, модель которой представлена многоканальной системой массового обслуживания с неограниченной очередью, входной поток рассматривается как простейший с экспоненциальной организацией обслуживания.

В [4, 11, 14–26] предположено, что известна полная информация об интенсивностях переходов СХД из некоторого  $i$ -го состояния в некоторое  $j$ -е состояние, что не совсем соответствует реальной ситуации. В работе [22] при анализе надежности оборудования СХД приведены статистические данные об отказах и сбоях оборудования (дисковых массивов): HP XP24000, HP EVA P6500, HP EVA P6350, IBM STORWIZE V7000 за 2014–2018 гг., количество отказов которых составляет несколько единиц на несколько сотен дисков. Например, в модели дискового массива HP XP24000, состоящего из 312 дисков в 2018 г. было всего четыре отказа дисков. Это говорит о том, что информация об отказах оборудования СХД представлена малыми выборками, по которым нельзя оценить достоверно интенсивности переходов для уравнений Колмогорова.

Кроме того, следует отметить, что показатели долговечности СХД в известных работах практически не рассматривались. В [19] предложено соотношение для среднего ресурса СХД при условии, что распределение наработки оборудования СХД до отказа (или ее элементов) является экспоненциальным, с известными

параметрами и известен коэффициент запаса устойчивости по ресурсу записи (считывания). При этом об остаточном среднем ресурсе только упоминается, хотя этот ресурс является достаточно важным, в частности, для принятия решений о замене элементов СХД.

Цель настоящей работы состоит в определении такого показателя долговечности СХД как гамма-процентный остаточный ресурс в условиях неполных данных, представленных малой выборкой времени безотказной работы оборудования СХД.

### Постановка задачи

При исследовании процессов функционирования СХД возникает необходимость в оценке их долговечности. Оценку долговечности информационных систем, в том числе и оборудования СХД и их элементов, проводят с помощью показателей остаточного ресурса. Как правило, используют такие показатели как средний остаточный ресурс и гамма-процентный остаточный ресурс [27]. Для систем, по которым имеется достаточная статистическая информация о процессах их функционирования, представленная наработками до отказа, по которым можно однозначно идентифицировать исходное распределение времени наработки до отказа, задача оценки показателей остаточного ресурса достаточно исследована в ряде работ [27–31].

Гарантированные оценки среднего остаточного ресурса (а также гарантированные оценки высших моментов остаточного ресурса) технической системы при неполной информации об исходных распределениях времени наработки на отказ представлены в работе [31], гарантированные оценки остаточного среднего времени развития чрезвычайной ситуации как остаточного ресурса некоторой системы получены в работе [32].

Пусть  $x$  — время безотказного функционирования оборудования СХД, например, дискового массива. Под остаточным временем функционирования сверх времени  $y$  будем понимать длительность функционирования СХД от момента  $y$  до возникновения отказа (до предельного состояния) [27].

Обозначим значение остаточного времени функционирования оборудования СХД через условную случайную величину  $x_T$ . Тогда получим

$$x_T = (x - y)|(x > y),$$

где «|» — знак условия (это не знак деления).

Определим функцию распределения остаточного времени функционирования оборудования (остаточного ресурса) через случайную величину  $x_T$  в виде [28–31]:

$$G(t) = P(x - y < t|x > y) = \frac{P(t < x < t + y)}{1 - F(t)} = \frac{F(t + y) - F(t)}{1 - F(t)} = 1 - \frac{P(t + y)}{P(y)},$$

где  $P(t) = 1 - F(t)$  — вероятность безотказной работы оборудования;  $F(t)$  — функция распределения времени функционирования оборудования.

Получим гамма-процентный остаточный ресурс из уравнения [27–30]

$$\frac{P(t + y)}{P(y)} = \frac{\gamma}{100} = \beta. \quad (1)$$

Из уравнения (1) найдем  $t = T_\gamma(y)$ , параметр  $\gamma$  — измеряется в процентах.

Пусть  $xv = (xv_1, xv_2, \dots, x)$  — выборка значений случайной величины  $x$ . Составляющие выборки  $xv_i > 0$  — независимые одинаково распределенные величины из некоторого неизвестного распределения  $F(t)$ . Выборка  $xv$  является конечной выборкой малого объема, по которой невозможно восстановить исходное распределение  $F(t)$ .

Необходимо на основе выборки  $xv$  определить оценки гамма-процентного остаточного ресурса оборудования СХД  $t = T_\gamma(\tau)$ .

### Метод решения поставленной задачи

Найдем на основе выборки  $x$  начальные моменты (далее — моменты) случайной величины  $x$ :

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xv_i^j; j = \overline{1, k}; k > 0. \quad (2)$$

Определим аналогично [30–35] множество функций распределения  $F_0$ , имеющих (известных)  $k$  моментов, равных моментам, определенным в соответствии с выражением (2), в виде:

$$F_0 = \{F(t): \int_0^\infty t^j dF(t) = m_j, j = \overline{1, k}\}. \quad (3)$$

Рассмотрим следующую задачу: найти гарантированные (нижние, верхние) оценки вероятности безотказной работы оборудования на множестве функций распределения, известных до моментов, определяемых выражением (3), т. е.

$$P_T(s) = \min_{F(t) \in F_0} (\max) P(s). \quad (4)$$

В выражении (4)  $P(s) = 1 - F(s)$ , где  $F(s)$  — функция распределения времени функционирования оборудования;  $s$  — переменная — время функционирования оборудования.

В работах [33, 34] получено общее решение задачи нахождения гарантированных (нижних и верхних) оценок функции распределения, на множестве функций распределения, известных до моментов.

Это решение состоит в следующем.

Наибольшее (наименьшее) значение интеграла

$$J(F) = \int_0^s c(t) dF(t)$$

при  $F(t) \in F_0$  достигается:

— на единственном ступенчатом распределении  $F(t)$ , у которого среди точек роста  $t_1, t_2, \dots, t_\nu$  имеется точка  $s$ ;

— при нечетном  $k$  число точек роста  $\nu$  функции распределения  $F(t)$  определяется соотношением  $\nu = (k + 3)/2$ , причем  $0 = t_1 < t_2 < \dots < t_\nu < \infty$ ;



- при четном  $k$  число точек роста  $v$  функции распределения  $F(t)$  определяется соотношением  $v = k/2 + 1$ , причем  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_v < \infty$ ;
- числа  $p_j > 0$ ,  $t_j, j = 1, 2, \dots, v$  удовлетворяют системе уравнений:

$$m_j = \sum_{i=1}^v t_i^j p_i; j = \overline{1, k}; k > 0.$$

Функция  $c(t)$  должна иметь неотрицательную  $k + 1$ -ю производную.

В рассматриваемом случае  $c(t) = 1$ , следовательно, условие неотрицательности  $k + 1$ -ой производной функции  $c(t) = 1$  выполняется.

Рассмотрим уравнения:

$$y_1 = \frac{P(t+y)}{P(y)};$$

$$y_2 = \frac{\min_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{P(y)};$$

$$y_3 = \frac{\min_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{\max_{F(t) \in F_0} P(y)};$$

$$y_4 = \min_{F(t) \in F_0} P(t+y),$$

примерные графики которых приведены на рис. 1.

Для любого  $y \geq 0$  имеет место неравенство:

$$\frac{P(t+y)}{P(y)} \geq \frac{\min_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{P(y)} \geq \frac{\min_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{\max_{F(t) \in F_0} P(y)} \geq \min_{F(t) \in F_0} P(t+y). \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что в качестве нижней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса могут быть использованы оценки  $T_3(y)$  или  $T_4(y)$ . Оценки  $T_1(y)$  и  $T_2(y)$  на основе имеющихся данных выборки  $x$  определены быть не могут.

Рассмотрим задачу нахождения верхней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса оборудования, представленную следующими уравнениями:

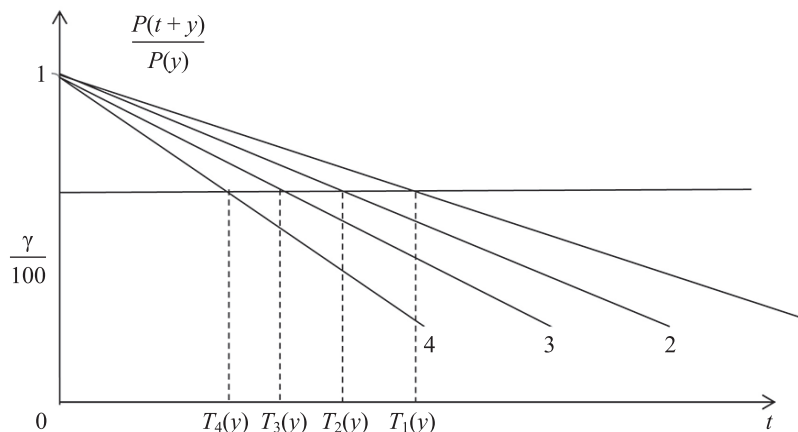


Рис. 1. Примерные графики уравнений  $y_1 - y_4$

Fig. 1. Example graphs of  $y_1 - y_4$

$$y_1 = \frac{P(t+y)}{P(y)};$$

$$y_5 = \frac{\max_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{P(y)};$$

$$y_6 = \frac{\max_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{\min_{F(t) \in F_0} P(y)};$$

$$y_7 = \frac{1}{\min_{F(t) \in F_0} P(y)};$$

примерные графики которых показаны на рис. 2.

Для любого  $y \geq 0$  имеет место неравенство:

$$\frac{P(t+y)}{P(y)} \leq \frac{\max_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{P(y)} \leq \frac{\max_{F(t) \in F_0} P(t+y)}{\min_{F(t) \in F_0} P(y)} \leq \frac{1}{\min_{F(t) \in F_0} P(y)}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что в качестве верхней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса могут быть использованы только  $T_6(y)$ . Оценки  $T_1(y)$ ,  $T_5(y)$  на основе имеющихся данных выборки  $x$  определены быть не могут. Оценка  $T_7(y)$  не существует, так как

$$\frac{1}{\min_{F(t) \in F_0} P(y)} \geq 1 \quad (7)$$

и левая часть неравенства (7) не зависит от  $t$ .

### Примеры нахождения гарантированных оценок гамма-процентного ресурса

**Исходные данные.** Рассмотрим пример определения нижней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса модели дискового массива HP EVA P6500. Виртуальные дисковые массивы хранения HP EVA P6550 Storage линейки СХД EVA P6500 — масштабируемые СХД с двумя Fibre Channel/10GbE контроллерами [34]. Пусть известны два первых момента времени наработки на отказ одного диска из

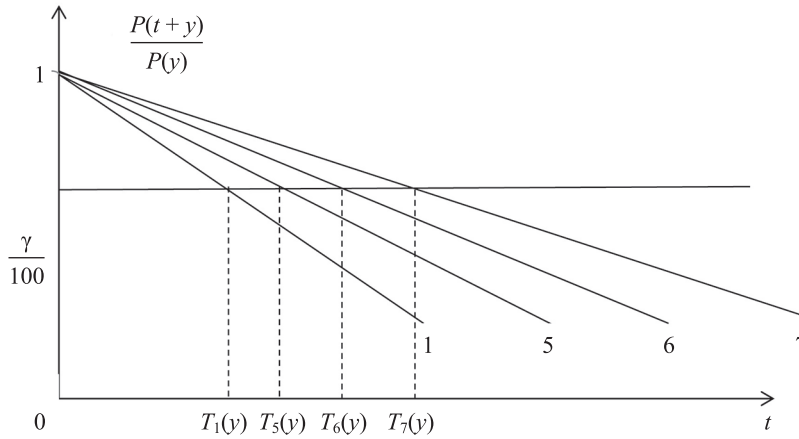


Рис. 2. Примерные графики уравнений  $y_1, y_5 - y_7$

Fig. 2. Example graphs of  $y_1, y_5 - y_7$

дискового массива  $\mu_1, \mu_2$ . По данным об отказах дисков дискового массива, приведенным в работе [22], определены следующие значения первого и второго моментов:  $m_1 = 3,15 \cdot 10^5$  ч;  $m_2 = 1,47 \cdot 10^{11}$  ч<sup>2</sup>. Пусть также известны значения величины  $\gamma$ , которые заданы в интервале 0 до 100 % и значение  $y$ , которое лежит в пределах от 0 до  $m_1 = 3,15 \cdot 10^5$  ч.

**Аналитические соотношения для гарантированных оценок.** Необходимо определить гарантированные (нижние и верхние) оценки гамма-процентного остаточного ресурса диска из дискового массива HP EVA P6500.

В соответствии с работами [33, 34] имеем

$$\min_{F(t) \in F_0} P(t+y) = \frac{(m_1 - t - y)^2}{(m_1 - t - y)^2 + m_2 - m_1^2} \quad \text{при } 0 < t + y \leq m_1. \quad (8)$$

$$\max_{F(t) \in F_0} P(y) = 1 \quad \text{при } 0 < y \leq m_1. \quad (9)$$

Вследствие того, что имеет место соотношение (9), оценки  $T_3(y)$  и  $T_4(y)$  совпадают, тогда нижнюю гарантированную оценку гамма-процентного остаточного ресурса  $T_7(y)$  определим в соответствии с соотношением (8) из уравнения:

$$\frac{(m_1 - t - y)^2}{(m_1 - t - y)^2 + m_2 - m_1^2} = \beta. \quad (10)$$

Выполнив необходимые преобразования уравнения (10), найдем нижнюю гарантированную оценку гамма-процентного остаточного ресурса оборудования

$$t_n = m_1 - y - \sqrt{\frac{\beta(m_2 - m_1^2)}{1 - \beta}} \quad \text{при } y \leq m_1 - \sqrt{\frac{\beta(m_2 - m_1^2)}{1 - \beta}}. \quad (11)$$

Аналогично для верхней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса при двух моментах  $m_1, m_2$  в соответствии с работами [33, 34] имеем

$$\max_{F(t) \in F_0} P(t+y) = \frac{m_2 - m_1^2}{(m_1 - t - y)^2 + m_2 - m_1^2} \quad \text{при } t + y > m_1.$$

$$\min_{F(t) \in F_0} P(t) = \frac{(m_1 - y)^2}{(m_1 - y)^2 + m_2 - m_1^2} \quad \text{при } 0 < y \leq m_1.$$

Для определения верхней гарантированной оценки гамма-процентного остаточного ресурса получим следующее уравнение:

$$\frac{\frac{m_2 - m_1^2}{(m_1 - t - y)^2 + m_2 - m_1^2}}{\frac{(m_1 - y)^2}{(m_1 - y)^2 + m_2 - m_1^2}} = \beta,$$

решая которое найдем

$$t_v = m_1 - y + \sqrt{\frac{(m_2 - m_1^2) \left( 1 - \beta \frac{(m_1 - y)^2}{(m_1 - y)^2 + m_2 - m_1^2} \right)}{\beta \frac{(m_1 - y)^2}{(m_1 - y)^2 + m_2 - m_1^2}}} \quad (12)$$

верхнюю гарантированную оценку гамма-процентного остаточного ресурса оборудования при двух моментах  $m_1, m_2$ .

Выполнив соответствующие расчеты по соотношениям (11) и (12) при  $m_1 = 3,15 \cdot 10^5$  ч;  $m_2 = 1,47 \cdot 10^{11}$  ч<sup>2</sup>;  $\gamma = 50$  %;  $y = 3,15 \cdot 10^4$  ч, получим значения нижней и верхней гарантированных оценок гамма-процентного остаточного ресурса диска из дискового массива HP EVA P6500:  $t_n = 6,48 \cdot 10^4$  ч;  $t_v = 6,06 \cdot 10^5$  ч.

**Гарантированные оценки при различных значениях первого и второго моментов  $m_1$  и  $m_2$ .** В таблице приведены нижние и верхние гарантированные оценки гамма-процентного остаточного ресурса диска из дискового массива при различных значениях первого и второго моментов  $m_1$  и  $m_2$  времени безотказной работы близких к реальным.

Из таблицы видно, что при увеличении первого момента  $m_1$  времени безотказной работы диска наблюдается рост нижней гарантированной оценки гамма-про-

Таблица. Нижние и верхние гарантированные оценки гамма-процентного остаточного ресурса диска  
 Table. Lower and upper guaranteed estimates of gamma-percent the remaining disk resource

$m_1 \cdot 10^5$ , ч	$m_2 \cdot 10^{11}$ , ч <sup>2</sup>	$y \cdot 10^4$ , ч	$\beta$	$t_n \cdot 10^4$ , ч	$t_v \cdot 10^5$ , ч
3,15	1,47	3,15	0,5	6,48	6,06
3,20	1,47	3,20	0,5	7,77	5,90
3,23	1,47	3,23	0,5	8,49	5,82
3,25	1,47	3,25	0,5	8,99	5,76
3,28	1,47	3,28	0,5	9,75	5,68
3,30	1,47	3,30	0,5	10,3	5,62
3,33	1,47	3,33	0,5	11,1	5,53
3,35	1,47	3,35	0,5	11,6	5,48
3,40	1,47	3,40	0,5	13,0	5,33
3,40	1,48	3,40	0,5	12,6	5,40
3,40	1,49	3,40	0,5	12,5	5,43
3,40	1,49	3,40	0,5	12,3	5,45
3,40	1,50	3,40	0,5	12,2	5,48
3,40	1,50	3,40	0,5	12,1	5,50
3,40	1,55	3,40	0,5	10,8	5,75

центного остаточного ресурса диска и уменьшение верхней гамма-процентного остаточного ресурса диска при постоянном втором моменте  $m_2$ , а при увеличении второго момента  $m_2$  наблюдается противоположная тенденция.

В приведенном примере использованы два момента времени безотказной работы диска. При большем числе используемых моментов (большем, чем два) решение задачи определения гарантированных (нижних и верхних) оценок гамма-процентного остаточного ресурса возможно только численно.

### Заключение

Рассмотрена задача оценки показателя долговечности оборудования систем хранения данных — гамма-процентного остаточного ресурса в условиях неполных данных, представленных малыми выборками случайных величин времени безотказной работы обо-

рудования. Данная задача сформулирована как задача определения гарантированных (нижних и верхних) оценок гамма-процентного остаточного ресурса оборудования на множестве распределений времени безотказной работы с заданными моментами, равными моментам, найденным по имеющейся выборке времени безотказной работы, при решении этой задачи использованы результаты решения проблемы Маркова и неравенства между возможными экстремальными оценками гамма-процентного ресурса. Получены аналитические оценки гарантированного (нижнего и верхнего) гамма-процентного остаточного ресурса оборудования при двух используемых моментах.

Актуальность работы состоит в получении общего решения задачи определения гарантированного гамма-процентного остаточного ресурса оборудования систем хранения данных в условиях неполных данных, представленной малыми выборками наработок до отказа оборудования.

### Литература

1. Глобальный кризис хранения данных. Почему места в хранилищах на всех не хватит [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/710838/> (дата обращения: 17.04.2024).
2. Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2020, with forecasts from 2021 to 2025 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> (дата обращения: 17.04.2024).
3. Фарли М. Сеги хранения данных / 2-е изд. М.: Лори, 2004. 576 с.
4. Иваничкина Л.В. Математические модели надежности и методы ее повышения в современных распределенных отказоустойчивых системах хранения данных: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МФТИ, 2018. 114 с.
5. Poymanova E.D., Tatarnikova T.M. Models and methods for studying network traffic // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/weconf.2018.8604470>

### References

1. *The global data storage crisis. Why is there not enough storage space for everyone?* Available at: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/710838/> (accessed: 17.04.2024). (in Russian)
2. *Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2020, with forecasts from 2021 to 2025.* Available at: <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> (accessed: 17.04.2024).
3. Farley M. *Building Storage Networks*. McGraw Hill, 2001, 656 p.
4. Ivanichkina L.V. *Mathematical Models of Reliability and Methods for Its Improvement in Modern Distributed Fault-Tolerant Data Storage Systems*. Moscow, MFTI, 2018, 114 p. (in Russian)
5. Poymanova E.D., Tatarnikova T.M. Models and methods for studying network traffic. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/weconf.2018.8604470>
6. Sovetov B.Ya., Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Organization of multi-level data storage. *Information and Control Systems*, 2019,

6. Советов Б.Я., Татарникова Т.М., Пойманова Е.Д. Организация многоуровневого хранения данных // Информационно-управляющие системы. 2019. № 2(99). С. 68–75. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-2-68-75>
7. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Energy model of data storage process // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/WECONF.2019.8840111>
8. Poymanova E.D., Tatarnikova T.M. Tiered data storage model // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/weconf.2019.8840589>
9. Sovetov B.Ya., Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Storage scaling management mode // Информационно-управляющие системы. 2020. № 5(108). С. 43–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-5-43-49>
10. Крылов Д.Р., Пойманова Е.Д., Тюрликов А.М. Модель реплицируемой системы хранения данных с использованием среднего возраста информации в качестве показателя актуальности данных // Информационно-управляющие системы. 2024. № 3(130). С. 11–23. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2024-3-11-23>
11. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 3. С. 608–617. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617>
12. Татарникова Т.М., Пойманова Е.Д. Модель многоуровневой системы хранения данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 271–279. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-271-279>
13. Татарникова Т.М., Пойманова Е.Д. Методика дифференцированного наращивания емкости системы хранения данных с многоуровневой структурой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 1. С. 66–73. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-1-66-73>
14. Рахман П.А., Каяшев А.И., Шарипов М.И. Модели надежности отказоустойчивых систем хранения данных // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 1(67). С. 155–166.
15. Каяшев А.И., Рахман П.А., Шарипов М.И. Анализ показателей надежности двухуровневых магистральных сетей // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18. № 2(63). С. 197–207.
16. Rakhman P.A., Muraveva E.A., Sharipov M.I. Reliability model of fault-tolerant dual-disk redundant array // Key Engineering Materials. 2016. V. 685. P. 805–810. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.685.805>
17. Shooman M.L. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. John Wiley & Sons Inc., 2002. 552 p.
18. Elerath J.G. Reliability model and assessment of redundant arrays of inexpensive disks (RAID) incorporating latent defects and non-homogeneous Poisson process events. PhD dissertation, University of Maryland, 2007.
19. Пономарев В.А. Моделирование и оптимизация функционирования твердотельной системы хранения данных: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 2019. 190 с.
20. Rummyantsev A., Ivashko E., Chernov I., Kositsyn D., Shabaev A., Ponomarev V. Latency/Wearout in a flash-based storage system with replication on write // Proc. of the 24<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association (FRUCT). 2019. P. 360–366. <https://doi.org/10.23919/fruct.2019.8711984>
21. Атрошенко В.А., Тымчук А.И. К вопросу выбора наилучшего уровня RAID для хранилищ данных информационной системы, обеспечивающей быструю обработку больших данных // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 4. С. 12–16.
22. Гуз И.Д., Острейковский В.А. Анализ эксплуатационной надежности оборудования систем хранения данных // Вестник кибернетики. 2019. № 3(35). С. 35–42. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2019-3-35-42>
23. Nelub V., Gantimurov A., Borodulin A. Economic analysis of data protection in systems with complex architecture using neural network methods // Economic Annals-XXI. 2020. V. 185. N 9-10. P. 178–188. <https://doi.org/10.21003/ea.v185-17>
24. Gantimurov A.P. Analysis and synthesis of the distributed data storage systems. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, BMSTU, 2022, 94 p. (in Russian)
25. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking no. 2(99), pp. 68–75. (in Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-2-68-75>
7. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Energy model of data storage process. Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2019, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/WECONF.2019.8840111>
8. Poymanova E.D., Tatarnikova T.M. Tiered data storage model. Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2019, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/weconf.2019.8840589>
9. Sovetov B.Ya., Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Storage scaling management mode. Information and Control Systems, 2020, no. 5(108), pp. 43–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-5-43-49>
10. Krylov D.R., Poymanova E.D., Turlikov A.M. Modeling a replicated storage system with the use of the average age of information as an indicator of data relevance. Information and Control Systems, 2024, no. 3(130), pp. 11–23. (in Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2024-3-11-23>
11. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 608–617. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617>
12. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Model of multi-level data storage system. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 271–279. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-271-279>
13. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Differentiated capacity extension method for system of data storage with multilevel structure. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 66–73. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-1-66-73>
14. Rahman P.A., Kayashev A.I., Sharipov M.I. Reliability models of the fault-tolerant storage systems. Vestnik UGATU, 2015, vol. 19, no. 1(67), pp. 155–166. (in Russian)
15. Kayashev A.I., Rahman P.A., Sharipov M.I. Reliability analysis of two-level backbone networks. Vestnik UGATU, 2014, vol. 18, no. 2(63), pp. 197–207. (in Russian)
16. Rakhman P.A., Muraveva E.A., Sharipov M.I. Reliability model of fault-tolerant dual-disk redundant array. Key Engineering Materials, 2016, vol. 685, pp. 805–810. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.685.805>
17. Shooman M.L. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. John Wiley & Sons Inc., 2002, 552 p.
18. Elerath J.G. Reliability model and assessment of redundant arrays of inexpensive disks (RAID) incorporating latent defects and non-homogeneous Poisson process events. PhD dissertation, University of Maryland, 2007.
19. Ponomarev V.A. Modeling and optimization of solid-state data storage system functioning. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Petrozavodsk, PetrSU, 2019, 190 p. (in Russian)
20. Rummyantsev A., Ivashko E., Chernov I., Kositsyn D., Shabaev A., Ponomarev V. Latency/Wearout in a flash-based storage system with replication on write. Proc. of the 24<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association (FRUCT), 2019, pp. 360–366. <https://doi.org/10.23919/fruct.2019.8711984>
21. Atroschenko V.A., Tymchuk A.I. On the question of choosing the best raid level for data storages of the information system that provides fast processing of big data. Modern high technologies, 2007, no. 4, pp. 12–16. (in Russian)
22. Guz I.D., Ostreikovskiy V.A. Operational reliability analysis of hardware of data storage systems. Proceedings in Cybernetics, 2019, no. 3(35), pp. 35–42. (in Russian). <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2019-3-35-42>
23. Nelub V., Gantimurov A., Borodulin A. Economic analysis of data protection in systems with complex architecture using neural network methods. Economic Annals-XXI, 2020, vol. 185, no. 9-10, pp. 178–188. <https://doi.org/10.21003/ea.v185-17>
24. Gantimurov A.P. Analysis and synthesis of the distributed data storage systems. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, BMSTU, 2022, 94 p. (in Russian)
25. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking



- кандидата технических наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 94 с.
25. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices // *Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
  26. Фунг В.К., Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Лэ В.Х. Оценка вероятностно-временных характеристик компьютерной системы с контейнерной виртуализацией // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2024. Т. 24. № 2. С. 249–255. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255>
  27. Садыхов Г.С., Савченко В.П., Елисеева О.В. Основы оценок остаточного ресурса изделий // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2011. № S3. С. 83–99.
  28. Савченко В.П., Садыхов Г.С., Кузнецов В.И. Новая методология сверхсрочной безопасной эксплуатации технических объектов // *Петербургский журнал электроники*. 2004. № 3–4. С. 184–188.
  29. Соколов С.В. Оценка остаточного ресурса подсистем СУЗ реактора РБМК-1000 первого блока Смоленской АЭС // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2009. № 3. С. 37–43.
  30. Байхельт Ф., Франкен П. Надёжность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988. 390 с.
  31. Ломакин М.И., Ниязова Ю.М., Сmealов Д.Г. Оценка моментов остаточного времени функционирования производственной системы // *Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции*. 2024. С. 155–158.
  32. Ломакин М.И., Докукин А.В., Мошков В.Б., Олтян И.Ю., Ниязова Ю.М., Сmealов Д.Г. Гарантированные оценки остаточного среднего времени развития чрезвычайной ситуации // *Технологии гражданской безопасности*. 2024. Т. 21. № 1(79). С. 45–49.
  33. Ломакин М.И. Гарантированные оценки вероятности безотказной работы в классе распределений с фиксированными моментами // *Автоматика и телемеханика*. 1991. № 1. С. 154–161.
  34. Lomakin M., Buryi A., Dokukin A., Strekha A., Niyazova J., Balvanovich A. Estimation of quality indicators based on sequential measurements analysis // *International Journal for Quality Research*. 2020. V. 41. N 1. P. 147–162. <https://doi.org/10.24874/ijqr14.01-10>
  35. Ломакин М.И., Докукин А.В. Оценка моментов квантованной случайной величины // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2023. Т. 23. № 3. С. 646–651. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-646-651>
  36. HP EVA P6500 / P6550 STORAGE (QK720A) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.karma-roup.ru/catalog/snyatyе-s-proizvodstva-skhd-hpe/hp\\_eva\\_p6550/?ysclid=lyzu635lga642184594](https://www.karma-roup.ru/catalog/snyatyе-s-proizvodstva-skhd-hpe/hp_eva_p6550/?ysclid=lyzu635lga642184594) (дата обращения: 17.04.2024).
  - into account the physical and information recovery of redundant storage devices. *Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
  26. Phung V.Q., Bogatyrev V.F., Karmanovskiy N.S., Le V.H. Evaluation of probabilistic-temporal characteristics of a computer system with container virtualization. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 249–255. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255>
  27. Sadykhov G.S., Savchenko V.P., Eliseeva O.V. Basics of estimating residual life of products. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2011, no. S3, pp. 83–99. (in Russian)
  28. Savchenko V.P., Sadykhov G.S., Kuznetsov V.I. New methodology for ultra-urgent safe operation of the technical objects. *Petersburg Electronics Journal*, 2004, no. 3–4, pp. 184–188. (in Russian)
  29. Sokolov S.V. The residual lifetime estimation for the RBMK-1000 PCS of the Smolensk NPP's first power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2009, no. 3, pp. 37–43. (in Russian)
  30. Beichelt F., Franken P. *Zuverlässigkeit und Instandhaltung*. Hanser, 1984, 315 p.
  31. Lomakin M.I., Niyazova YU.M., Smekalov D.G. Evaluation of the moments of the remaining operating time of the production system. *Machines and mechanisms reliability and durability collection of materials of the XV<sup>th</sup> all-Russia scientific and practical conference*, 2024, pp. 155–158. (in Russian)
  32. Lomakin M.I., Dokukin A.V., Moshkov V.B., Oltyan I.Yu., Niyazova Ju.M., Smekalov D.G. Guaranteed assessments of emergency development remaining average time. *Civil Security Technology*, 2024, vol. 21, no. 1(79), pp. 45–49. (in Russian)
  33. Lomakin M.I. Guaranteed estimates of the probability of failure-free operation in a class of distributions with fixed moments. *Avtomatika i telemekhanika*, 1991, vol. 1, pp. 154–161. (in Russian)
  34. Lomakin M., Buryi A., Dokukin A., Strekha A., Niyazova J., Balvanovich A. Estimation of quality indicators based on sequential measurements analysis. *International Journal for Quality Research*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 147–162. <https://doi.org/10.24874/ijqr14.01-10>
  35. Lomakin M.I., Dokukin A.V. Estimation of the moments of a quantized random variable. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 646–651. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-646-651>
  36. HP EVA P6500 / P6550 STORAGE (QK720A). Available at: [https://www.karma-roup.ru/catalog/snyatyе-s-proizvodstva-skhd-hpe/hp\\_eva\\_p6550/?ysclid=lyzu635lga642184594](https://www.karma-roup.ru/catalog/snyatyе-s-proizvodstva-skhd-hpe/hp_eva_p6550/?ysclid=lyzu635lga642184594) (accessed: 17.04.2024).

#### Авторы

**Ломакин Михаил Иванович** — доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация, [sc 7003352786](https://orcid.org/0000-0003-4191-1348), [https://orcid.org/0000-0003-4191-1348](mailto:lomakin@vniigochs.ru), [lomakin@vniigochs.ru](mailto:lomakin@vniigochs.ru)

**Докукин Александр Владимирович** — доктор экономических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация, [sc 56161047500](https://orcid.org/0000-0002-3342-8770), <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>, [dokukin@vniigochs.ru](mailto:dokukin@vniigochs.ru)

**Олтян Ирина Юрьевна** — кандидат технических наук, ученый секретарь, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация, [sc 57190430695](https://orcid.org/0000-0002-2178-5033), <https://orcid.org/0000-0002-2178-5033>, [oltyan@vniigochs.ru](mailto:oltyan@vniigochs.ru)

**Ниязова Юлия Михайловна** — кандидат экономических наук, доцент, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Российская Федерация, [sc 57190430695](https://orcid.org/0000-0001-5589-4855), <https://orcid.org/0000-0001-5589-4855>, [y\\_niyazova@edu.miigaik.ru](mailto:y_niyazova@edu.miigaik.ru)

#### Authors

**Mikhail I. Lomakin** — D.Sc., D.Sc. (Economics), Professor, Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation, [sc 7003352786](https://orcid.org/0000-0003-4191-1348), <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>, [lomakin@vniigochs.ru](mailto:lomakin@vniigochs.ru)

**Alexander V. Dokukin** — D.Sc. (Economics), Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation, [sc 56161047500](https://orcid.org/0000-0002-3342-8770), <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>, [dokukin@vniigochs.ru](mailto:dokukin@vniigochs.ru)

**Irina Yu. Oltyan** — PhD, Scientific Secretary, All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation, [sc 57190430695](https://orcid.org/0000-0002-2178-5033), <https://orcid.org/0000-0002-2178-5033>, [oltyan@vniigochs.ru](mailto:oltyan@vniigochs.ru)

**Yulia M. Niyazova** — PhD (Economics), Associate Professor, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064, Russian Federation, [sc 57190430695](https://orcid.org/0000-0001-5589-4855), <https://orcid.org/0000-0001-5589-4855>, [y\\_niyazova@edu.miigaik.ru](mailto:y_niyazova@edu.miigaik.ru)