

Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем

A comparative analysis of the methods of evaluating dependability using Big Data of complex system operation

Бурсиан Е.Ю.¹, Проурзин В.А.^{2*}, Проурзин О.В.¹
Bursian E.Yu.¹, Prouzrin V.A.^{2*}, Prouzrin O.V.¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ²Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук, Российская Федерация, Санкт-Петербург

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Russian Federation, Saint Petersburg, ²Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Saint Petersburg
*prouzrin@gmail.com



Бурсиан Е.Ю.



Проурзин В.А.



Проурзин О.В.

Резюме. Цель. Целью работы является исследование методов оценки показателей надежности на основе анализа больших данных, полученных в результате мониторинга эксплуатации технических систем и их комплектующих. Производится сравнительный анализ эффективности робастных статистических методов оценки показателей надежности сложных технических систем по данным их эксплуатации. **Методы.** В статье применяются методы математической статистики, а именно: робастные методы оценки параметра положения зашумленной выборки и численные методы статистического моделирования. Рассмотрены пять методов оценивания параметра положения (сдвига): выборочное среднее как неробастный метод, используемый для сравнения; выборочная медиана как простейший робастный метод оценки параметра положения; двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов по правилу трех сигм; двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов с использованием бокс-плота Тьюки; робастный метод Хьюбера. Сравнительный анализ методов оценки показателей надежности системы проводился путем статистического моделирования в пакете статистических вычислений R. Рассмотрено пять законов распределений для генерации выборок наработке до отказа и времени восстановления элементов: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логнормальное распределение, гамма-распределение и равномерное распределение. **Результаты.** Статистический анализ больших данных эксплуатации технических систем осложнен неоднородностью и зашумленностью этих данных, а также наличием ошибок и выбросов различной природы. В первую очередь это обусловлено различиями в нагрузках и условиях эксплуатации для каждого объекта. Здесь эта проблема рассмотрена применительно к задаче оценки показателей надежности структурно-сложной монотонной системы с независимым восстановлением элементов. Рассмотрены методы отбраковки аномальных данных и робастного оценивания параметра положения выборки и проведен сравнительный анализ эффективности этих методов для различных законов распределения. Показано, что робастные методы оценивания дают существенный выигрыш в точности по сравнению со стандартным выборочным средним. Наиболее эффективной показала себя двухэтапная процедура, основанная на отсечении выбросов с использованием бокс-плота Тьюки. **Выводы.** Результаты работы позволяют повысить точность оценки показателей надежности, основанной на использовании данных эксплуатации сложных технических систем. Они могут быть использованы в области обработки больших данных и теории надежности сложных систем.

Abstract. Aim. The paper aims to research the methods of evaluating dependability indicators based on the analysis of Big Data obtained in the course of monitoring the operation of technical systems and their components. A comparative analysis is performed of the efficiency of robust statistical methods of evaluating the dependability indicators of complex technical systems based on operation data. **Methods.** The paper uses methods of mathematical statistics, specifically robust methods of evaluating the translation parameter of a noisy sample and numerical methods of statistical modeling. The authors consider five methods of evaluating the translation parameter: sample mean as a nonrobust method used for comparison; sample median as the simplest robust method of evaluating the translation parameter; two-stage evaluation procedure with truncation of outliers according to the three sigma rule; two-stage evaluation procedure with truncation of outliers using Tukey's box-and-whisker plot; Huber's robust method. The comparative analysis of the methods of evaluating system dependability indicators was conducted by means of statistical modeling in the R statistical computation package. Five distribution laws for generating an element's time-to-failure and recovery time

samples were considered: exponential distribution, Weibull distribution, log-normal distribution, gamma distribution and uniform distribution. Results. Statistical analysis of Big Data associated with the operation of technical systems is complicated by the heterogeneity and noisiness of such data, as well as the presence of errors and outliers of varied nature. That is primarily due to the varied loads and operating conditions of each object. Herein this problem is examined as regards the problem of evaluating the dependability indicators of a structurally complex monotonic system with independent element recovery. The paper examines methods of rejecting anomalous data and robust evaluation of the sample position parameter and performs a comparative analysis of the efficiency of such methods for various distribution laws. It is shown that robust methods of evaluation enable significantly higher accuracy as compared to the standard sample mean. The two-stage procedure based on the truncation of outliers and Tukey's box-and-whisker plot proved to be the most efficient. Conclusions. The paper's findings allow improving the accuracy of evaluation of dependability indicators based on complex technical system operation data. They can be used in Big Data processing and complex system dependability theory.

Ключевые слова: большие данные, робастная оценка, статистическое моделирование, надежность, коэффициент готовности.

Keywords: Big Data, robust estimate, statistical modeling, dependability, availability factor.

Для цитирования: Бурсиан Е.Ю., Проурзин В.А., Проурзин О.В. Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем // Надежность. 2023. №4. С. 25-30. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30>

For citation: Bursian E.Yu., Prourzin V.A., Prourzin O.V. A comparative analysis of the methods of evaluating dependability using Big Data of complex system operation. Dependability 2023;4:25-30. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30>

Поступила: 08.06.2023 / **После доработки:** 28.09.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 08.06.2023 / **Upon revision:** 28.09.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение

Оценка показателей надежности технических систем путем проведения испытаний, как правило, требует больших затрат времени и характеризуется высокой стоимостью. Для сложных и уникальных объектов, объектов с редкими отказами, проведение испытаний на надежность может быть практически неосуществимым. С другой стороны, мониторинг эксплуатации существующих объектов позволяет собрать большую базу данных показателей надежности. Эти данные могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки показателей надежности объекта. Подходы и методы работы с такими базами составляют содержание компьютерных технологий работы с большими данными. Основная сложность при анализе больших данных состоит в первую очередь в их разнообразии, изменчивости и недостоверности [1, 2, 3].

Известно, что наличие устойчивости частот (распределений) есть необходимое условие применения классических асимптотических методов математической статистики [4]. Однако при наблюдении больших данных могут меняться условия статистического эксперимента, вероятностные модели «дрейфуют», наблюдаться аномальные значения в данных. Таким образом, при анализе эксплуатационных данных надежности систем следует учитывать то, что значения получены при различных условиях эксплуатации и, соответственно, при различных законах распределений отказов и восстановлений, а также учитывать наличие недостоверных и аномальных данных.

Здесь будет рассмотрен достаточно распространенный случай, когда условия эксплуатации исследуемой технической системы изначально регламентированы. Тогда можно ожидать, что данные по отказам и восстановлению системы и ее узлов, полученные из различных источников, будут большей частью однородны по условиям эксплуатации. Однако при этом неизбежно появление некоторого объема данных, связанных с нестандартными условиями эксплуатации, ошибками и прочими аномалиями. Их наличие требует применения специальных методов отбраковки при анализе общей выборки. Этот случай рассмотрен при разработке методов оценки показателей надежности сложных систем с независимым восстановлением элементов.

При оценивании параметров распределений проблема аномальных данных в выборке имеет важное значение [5–8]. Наличие даже небольшого числа аномальных наблюдений может привести к оценкам, не соответствующим выборочным данным. В борьбе с грубыми погрешностями измерений, если они не были обнаружены в процессе измерений, используют два подхода:

- двухэтапная процедура с исключением аномальных данных и дальнейшая оценка по усеченной выборке [5, 6];
- робастные методы оценивания. В статистике под робастностью понимают нечувствительность к малым отклонениям выборки от предполагаемого закона распределения [7, 8].

Целью работы является исследование методов оценки показателей надежности на основе анализа больших данных, полученных в результате мониторинга экс-

плуатации технических систем и их комплектующих. Производится сравнительный анализ эффективности робастных статистических методов оценки показателей надежности сложных технических систем по данным их эксплуатации.

Задача оценки показателей надежности сложной системы по данным эксплуатации

Ставится задача оценки показателей надежности восстанавливаемых сложных систем по данным компьютерного мониторинга отказов и восстановлений эксплуатации элементов этой системы. Рассматривается случай, когда условия эксплуатации систем регламентированы, т.е. данные по надежности изделий, полученные из различных источников, большей частью будут сходны по условиям эксплуатации. При этом существенная доля выборки содержит данные, полученные при нестандартных условиях эксплуатации с повышенными или пониженными нагрузками, недостоверные данные, выбросы и прочие аномальные данные. Для статистического анализа таких выборок привлекаются методы, устойчивые (или, иначе, робастные) к наличию аномальных данных.

Рассматривается модель системы, состоящей из n узлов (элементов). Зависимость работоспособности системы от работоспособности ее элементов описывается монотонной структурной схемой работоспособности системы. Отказы и восстановления каждого элемента независимы и образуют альтернирующий процесс восстановления с некоторыми функциями распределения.

Отказ системы есть случайное событие, описываемое бинарной переменной X , которая принимает одно из двух значений – 0 (отказ) или 1 (работа). Это событие зависит от n простых независимых событий, описываемых бинарными переменными x_j (работа или отказ элемента). Вводится структурная логическая функция работоспособности системы, задающая зависимость состояния системы X от состояний ее элементов: $X = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Здесь рассматриваются системы с монотонными структурными функциями [9, 10, 11].

Пусть в результате мониторинга эксплуатации узлов системы получены данные о наработках до отказа и длительностях восстановлений каждого элемента системы. Законы распределений отказов и восстановлений, а также данные об эксплуатационных нагрузках неизвестны. Оцениваются коэффициент готовности K системы, средняя наработка между отказами системы T_C и среднее время восстановления системы T_R .

Коэффициент готовности j -го элемента не зависит от вида законов распределения отказов и восстановлений и равен [10]:

$$K_j = \frac{T_j}{T_j + S_j}. \quad (1)$$

Здесь T_j – среднее значение наработки до отказа, S_j – среднее время восстановления j -го элемента системы.

Пусть для каждого элемента монотонной системы с индивидуальным независимым восстановлением элементов известен коэффициент готовности K_j . Тогда [9]:

Коэффициент готовности K системы равен значению структурной функции от коэффициентов готовности элементов системы

$$X = \varphi(K_1, K_2, \dots, K_n). \quad (2)$$

Средняя наработка между отказами T_C системы вычисляется по формуле

$$T_C = \frac{K}{\lambda_C}, \quad (3)$$

где приведенная интенсивность отказов системы:

$$\lambda_C = \sum_{j=1}^n \frac{1}{T_j + S_j} (\varphi|_{K_j=1} - \varphi|_{K_j=0}).$$

3. Среднее время восстановления системы:

$$T_R = \frac{1-K}{\lambda_C}. \quad (4)$$

Итак, оценка показателей надежности монотонных систем с независимым восстановлением элементов сводится к оценке коэффициентов готовности (1) каждого элемента, которые в свою очередь сводятся к оценке среднего значения T_j наработки до отказа и среднего времени S_j восстановления каждого элемента системы. Тем самым основная проблема оценки показателей надежности по полученным выборкам времени отказов и восстановлений каждого элемента системы состоит в адекватной оценке среднего значения (параметра положения) каждой выборки.

Методы робастной оценки параметра положения

Пусть имеется некоторая выборка $\{t_i\}$, $i = 1, \dots, N$. Рассмотрим задачу оценивания параметра положения T этой выборки. В условиях наличия выбросов и аномальных данных оценка параметра положения выборки, произведенная с помощью среднего арифметического, является неустойчивой. Для решения этой проблемы используют процедуры отбраковки аномальных данных и методы робастного оценивания параметра положения выборки [5–8]. Здесь сравниваются пять методов оценки параметра положения.

1. Выборочное среднее или среднее арифметическое выборки: $T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$. Этот простой метод неустойчив к выбросам и аномальным данным. Он здесь применяется для сравнительного анализа.

2. Выборочная медиана. Это простой робастный метод, нечувствительный к выбросам. Выборочная медиана является состоятельной и несмещенной оценкой среднего значения.

3. Двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов по правилу трех сигм; Двухэтапная робастная процедура оценивания состоит из двух шагов. На первом шаге находятся и удаляются выбросы. На втором шаге вычисляется выборочное среднее усеченной выборки.

4. Двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов с использованием бокс-плота Тьюки (иначе еще называемого «ящиком с усами») [3, 6].

5. Робастный метод Хубера [3, 7].

Ставится задача сравнения этих методов оценки параметра положения зашумленной выборки и оценки их эффективности.

Сравнительный анализ методов

Статистический эксперимент состоит в следующем. Пусть требуется оценить среднюю наработку до отказа некоторого изделия. Методом статистического моделирования генерируется выборка случайных наработок изделия, задаваемая смесью трех распределений. Большая часть выборки (70%) сгенерирована по основному закону распределения, характеризующему регламентированный режим работы. Еще 15% данных, сгенерированных по закону распределения, сдвинутому влево, характеризуют наработку при повышенных нагрузках. Оставшиеся 15% данных, сдвинутых вправо, характеризуют наработку при заниженных нагрузках. Кроме этого, добавлено небольшое количество грубых выбросов. Задача состоит в оценке средней наработки, соответствующей основному режиму работы. Задача решается перечисленными выше пятью методами и результаты сравниваются с точным значением.

Выборка включает в себя 70 000 точек, распределенных по основному закону со средним значением T_0 . К ним примешивается 14 900 точек, распределенных по этому же закону со средним $3T_0$ (пониженная нагрузка) и 14 900 точек, распределенных по этому же закону со средним $T_0/3$ (повышенная нагрузка). Кроме того, к выборке примешано 200 случайных выбросов, распределенных равномерно на интервале от 0 до $1000T_0$. Рассмотрено пять основных законов распределений: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логнормальное распределение, гамма-распределение и равномерное распределение. Коэффициент вариации всех распределений, за исключением экспоненциального, положен равным 0,5.

Статистическое моделирование производилось в пакете статистических вычислений R. Вычислялась оценка параметра положения T пятью методами, перечисленными выше, и вычислялась относительная ошибка $\frac{|T - T_0|}{T_0} \cdot 100[\%]$. Результаты сведены в табл. 1.

Простое среднее арифметическое дает неприемлемую оценку, более чем в два раза превышающую точное значение. Оценка среднего медианой дает в целом хорошие результаты, за исключением оценки выборки, распреде-

ленной по экспоненциальному закону, который характеризуется максимальной асимметрией. Три оставшихся робастных метода дают оценку, ошибка которой не превышает 24% для всех распределений. Наиболее точные оценки (ошибка менее 15%) дает двухэтапная процедура, основанная на отбраковке с помощью боксплота Тьюки.

3.1. Пример оценки показателей надежности мостиковой схемы.

Рассматривается пример системы с независимым восстановлением элементов, состоящей из пяти одинаковых элементов ($n = 5$). Структурная схема работоспособности задается мостиковой схемой (рис. 1).

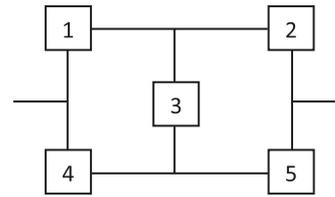


Рис. 1. Мостиковая структурная схема работоспособности системы

Структурная логическая функция мостиковой схемы имеет вид [12]:

$$X = 2x_1x_2x_3x_4x_5 - x_2x_3x_4x_5 - x_1x_3x_4x_5 - x_1x_2x_4x_5 - x_1x_2x_3x_4 + x_1x_3x_5 + x_2x_3x_4 + x_1x_4 + x_2x_5.$$

Средняя наработка до отказа одного элемента положения равной $T_0 = 10\ 000$ ч, среднее время восстановления элемента после отказа равно $S_0 = 250$ ч. Расчеты по формулам (1)–(4) дают следующие значения показателей надежности. Коэффициент готовности каждого элемента $K_0 = \frac{T_0}{T_0 + S_0} = 0,97561$. Коэффициент готовности системы равен $K = 2K_0^5 - 5K_0^4 + 2K_0^3 + 2K_0^2 = 0,99878$. Приведенная интенсивность отказов системы: $\lambda_c = \frac{1}{T_0 + S_0} (10K_0^4 - 20K_0^3 + 6K_0^2 + 4K_0) = 9,8384 \times 10^{-6}$. Средняя наработка системы между отказами $T_c = 101\ 519$ ч. Среднее время восстановления системы $T_R = 123,7$ ч.

Формируются выборки наработок и времени восстановления элементов как данные, полученные из истории эксплуатации этих элементов и их аналогов. Обе выборки формируются аналогично описанному выше численному эксперименту. Рассматривается

Табл. 1. Сравнение эффективности различных методов оценки параметра положения

Распределение	Относительная ошибка метода, %				
	Среднее арифметическое	Медиана	Правило 3-х сигм	Боксплот Тьюки	Метод Хубера
Экспоненциальное	119,9	32,6	21,0	14,9	23,8
Нормальное	119,5	2,7	20,6	5,1	23,5
Логнормальное	119,3	10,9	20,4	4,7	23,3
Равномерное	119,1	3,9	20,3	4,2	23,5
Вейбулла	119,7	6,4	20,8	3,9	23,7
Гамма	119,2	8,9	20,4	3,8	23,3

Табл. 2. Сравнение эффективности методов оценки показателей надежности на примере мостиковой схемы

Метод	Оценка параметра/Относительная погрешность[%]					
	T_0	S_0	K_0	K	T_C	T_R
Среднее арифметическое	<u>21972</u>	<u>547</u>	<u>0,97571</u>	<u>0,99879</u>	<u>223967</u>	<u>271</u>
	120	119	0,01	0,001	121	119
Медиана	<u>8964</u>	<u>167</u>	<u>0,98166</u>	<u>0,99932</u>	<u>121268</u>	<u>83</u>
	10,4	33,6	0,62	0,05	19,4	32,9
Правило 3 сигм	<u>12029</u>	<u>299</u>	<u>0,97571</u>	<u>0,99879</u>	<u>122632</u>	<u>148</u>
	20,3	19,8	0,01	0,001	20,8	19,8
Боксплот Тьюки	<u>9549</u>	<u>211</u>	<u>0,97833</u>	<u>0,99904</u>	<u>109199</u>	<u>104</u>
	4,5	15,4	0,28	0,03	7,6	15,3
Метод Хубера	<u>12342</u>	<u>307</u>	<u>0,97571</u>	<u>0,99879</u>	<u>125805</u>	<u>152</u>
	23,4	22,9	0,01	0,001	23,9	22,9
Точное значение	10000	250	0,97561	0,99878	101519	123,7

случай, при котором отказы при регламентированных нагрузках распределены по логнормальному закону со средним T_0 и коэффициентом вариации 0,5. По этому закону генерируется 70 000 отсчетов. К ним примешивается 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $3T_0$ (пониженная нагрузка) и 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $\frac{1}{3}T_0$ (повышенная нагрузка). Кроме того, в выборку добавлено 200 случайных выбросов, распределенных равномерно на интервале от 0 до $1000T_0$.

Для интервалов восстановления при штатной ситуации принят экспоненциальный закон распределения со средним S_0 , по которому сгенерировано 70 000 точек. К ним примешивается 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $3S_0$ и 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $\frac{1}{3}S_0$. Кроме того, в выборку добавлено 200 случайных выбросов, распределенных равномерно на интервале от 0 до $1000S_0$.

Результаты расчетов сведены в табл. 2. Наиболее точные оценки дает двухэтапная процедура, основанная на отбраковке с помощью боксплота Тьюки. Заметим, что коэффициенты готовности элемента и системы весьма устойчивы к наличию аномальных данных в выборке.

Заключение

Осуществление компьютерного мониторинга эксплуатации технических систем позволяет собрать данные о надежности этих систем и их компонентов. Эти данные могут быть использованы для оценки показателей надежности системы. Следует учитывать, что статистический анализ данных по надежности технических систем осложнен неоднородностью и зашумленностью этих данных, а также наличием ошибок и выбросов различной природы. В первую очередь это обусловлено различиями в нагрузках и условиях эксплуатации для каждого объекта. Здесь эта проблема рассмотрена применительно к задаче оценки показателей надежности структурно-сложной монотонной системы с независимым восстановлением элементов.

Показано, что основная проблема оценки показателей надежности по полученным выборкам времени отказов и восстановлений каждого элемента системы состоит в адекватной оценке среднего значения (параметра положения) каждой выборки.

Рассмотрены методы отбраковки аномальных данных и робастного оценивания параметра положения выборки и проведен сравнительный анализ эффективности этих методов для различных законов распределения. Показано, что робастные методы оценивания дают существенный выигрыш в точности по сравнению со стандартным выборочным средним. Наиболее эффективной показала себя двухэтапная процедура, основанная на отсеке выбросов с использованием боксплота Тьюки. Результаты работы позволяют повысить точность оценки показателей надежности, основанной на использовании данных эксплуатации сложных технических систем.

Библиографический список

1. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. Mining of massive data sets. Cambridge: Cambridge university press, 2020. 498 p. DOI: 10.1017/9781108684163
2. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Семенова М.А. К вопросу статистического анализа больших данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 44. с. 40-49. DOI: 10.17223/19988605/44/5
3. Проурзин В.А., Проурзин О.В. Методы анализа больших данных надежности восстанавливаемых систем // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 1(29). С. 34-38. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-34-38
4. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
5. Barnett V., Lewis T. Outliers in Statistical Data. New York: Wiley, 1994. 424 p.
6. Tukey D. A survey of sample from contaminated distribution / In: Contribution to Probability and Statistics, ed. I Olkin. Stanford: Stanford Univ. Press, 1960. Pp. 446-486.
7. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.

8. Shevlyakov G.L., Vilchevski N.O. Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods. Berlin, Boston: De Gruyter, 2001. 320 p. DOI: 10.1515/9783110936001

9. Байхельт Ф., Франкен П.М. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.

10. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.

11. Prourzin V.A. Techno-Economic Risk in Designing Complex Systems: Algorithms for Analysis and Optimization // Automation and Remote Control. 2003. Vol. 64. No. 7. Pp. 1054-1062. DOI: 10.1023/A:1024773916089

12. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.

References

1. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. Mining of massive data sets. Cambridge: Cambridge university press; 2020. DOI: 10.1017/9781108684163.

2. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Semionova M.A. [On the statistical analysis of big data]. [*Herald of the Tomsk State University. Control, computer technology and information science*] 2018;44:40-49. DOI: 10.17223/19988605/44/5. (in Russ.)

3. Prourzin V.A., Prourzin O.V. Methods for Big Data analysis of reliability of recoverable systems. *Intellectual Technologies on Transport* 2022;1(29):34-38. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-34-38. (in Russ.)

4. Cramer H. Mathematical methods of statistics. Moscow: Mir; 1975.

5. Barnett V., Lewis T. Outliers in Statistical Data. New York: Wiley; 1994.

6. Tukey D. A survey of sample from contaminated distribution. In: Olkin I., editor. Contribution to Probability and Statistics. Stanford: Stanford Univ. Press; 1960. P. 446-486.

7. Huber P. Robust statistics. Moscow: Mir; 1984.

8. Shevlyakov G.L., Vilchevski N.O. Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods. Berlin, Boston: De Gruyter; 2001. DOI: 10.1515/9783110936001.

9. Beichelt F., Franken P. Reliability and Maintenance – Mathematical Methods. Moscow: Radio i sviaz; 1988.

10. Riabinin I.A., Cherkesov G.N. [Logical and probabilistic methods of dependability study of structurally complex systems]. Moscow: Radio i sviaz; 1981. (in Russ.)

11. Prourzin V.A. Techno-economic risk in designing complex systems: algorithms for analysis and optimization. *Automation and Remote Control* 2003;64(7):1054-1062. DOI: 10.1023/A:1024773916089.

12. Dhillon B., Singh C. Engineering reliability. Moscow: Mir; 1984.

Сведения об авторах

Бурсиан Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр.,

д. 9, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190031, e-mail: bursianeu@mail.ru

Проурзин Владимир Афанасьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Методов анализа надежности», Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук, Большой пр. В.О., д.61, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199178, e-mail: proursin@gmail.com

Проурзин Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., д. 9, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190031, e-mail: pvo777@yandex.ru

About the authors

Elena Yu. Bursian, Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Advanced Mathematics, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: bursianeu@mail.ru.

Vladimir A. Prourzin, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Laboratory of Methods of Reliability Analysis, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, 61 Boljshoy prospekt V.O., Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: proursin@gmail.com.

Oleg V. Prourzin, Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Information and Computer Systems, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: pvo777@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Бурсиан Е.Ю. выполнила анализ литературы по теме исследования, предложила расчетный пример и участвовала в составлении резюме, введения, заключения и списка источников.

Проурзин В.А. поставил и исследовал задачу оценки показателей надежности сложной системы по данным эксплуатации, исследовал методы статистического анализа больших данных и методы робастной оценки параметра положения зашумленной выборки и принял основное участие в составлении разделов 1 и 2 статьи и участие в составлении введения и заключения.

Проурзин О.В. разработал алгоритмы и программы статического эксперимента, выполнил расчет примеров статистического моделирования, провел сравнительный анализ методов оценки показателей надежности на примере системы с мостиковой схемой и принял основное участие в составлении раздела 3 статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.