

Научная статья
УДК 519.6:311
EDN GAYMEF
DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(1).57-65



Ю.М. Краковский

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская Федерация*

В.О. Беляков

*Иркутский государственный аграрный университет
имени А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация*

Н.В. Бендик

*Иркутский государственный аграрный университет
имени А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация*

Оценка показателей надежности многокомпонентного оборудования методом имитационного моделирования

Аннотация. Создано математическое и программное обеспечение для вычисления показателей надежности многокомпонентного оборудования на основе событийного подхода методом имитационного моделирования. Для каждой компоненты экспертами задаются диапазон изменения наработки и ее среднее значение. В качестве вероятностной модели наработки компонент оборудования выбрано трехпараметрическое треугольное распределение. В качестве вероятностной модели для среднего значения наработки в условиях неопределенности предложено бета-распределение. Показателями надежности выбраны: численная вероятность безотказной работы; численная средняя наработка; численный гамма-процентный ресурс. Программное обеспечение создано в среде Visual Studio 2019 с использованием языка программирования C#. Созданное программно-математическое обеспечение позволяет количественно определять показатели надежности многокомпонентного оборудования в зависимости от модели неопределенности, числа компонент, а также технологии обслуживания и ремонта.

Ключевые слова. Показатели надежности, событийный подход, метод имитационного моделирования, неопределенность исходных данных.

Информация о статье. Дата поступления: 7 декабря 2022 г.; дата принятия к публикации: 30 января 2023 г.; дата онлайн-размещения: 3 февраля, 2023 г.

Original article

Y.M. Krakovsky

*Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation*

V.O. Belyakov

*Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Irkutsk, Russian Federation*

Evaluation of Reliability Indicators of Multicomponent Equipment by Simulation Modeling

Abstract. Mathematical and software for calculating reliability indicators of multicomponent equipment based on an event-based approach by simulation modeling has been created. For each component, experts set the range of changes in operating time and its average value. A three-parameter triangular distribution was chosen as a probabilistic model of operating time of equipment components. A beta distribution is proposed as a probabilistic model for the average operating time under uncertainty. Reliability indicators are selected: numerical probability of trouble-free operation; numerical average operating time; numerical gamma-percent resource. The software was created in the Visual Studio 2019 environment using the C# programming language. The created software and mathematical software makes it possible to quantify the reliability indicators of multicomponent equipment depending on the uncertainty model, the number of components, as well as the technology of maintenance and repair.

Keywords. Reliability indicators, event-based approach, simulation method, uncertainty of initial data.

Article info. Received 7 December, 2022; Accepted 30 January, 2023; Available online 3 February, 2023.

Любое оборудование подвержено в процессе его эксплуатации различным случайным и неслучайным воздействиям. Для борьбы с отказами созданы различные средства, основанные на методах технической диагностики [1–3] и надежности [4; 5], что подчеркивает актуальность проводимого в работе исследования.

В данном исследовании рассматривается многокомпонентное оборудование, содержащее I компонент. Примерами такого оборудования являются роботизированные комплексы, современное транспортное оборудование и др. Предлагаемое исследование развивает работу [6], но в отличие от цитируемой работы в данном исследовании рассмотрен другой случай технологии обслуживания и ремонта многокомпонентного оборудования с тем, чтобы проверить влияние этих технологий на показатели надежности.

Так как рассматривается многокомпонентное оборудование, то наработку компонент обозначим y_i , среднее значение \bar{y}_i , интервал изменения наработки (a_i, b_i) , $i = 1, I$. Это позволяет экспертам для наработки любой компоненты, как случайной величины, рекомендовать распределение вида [6; 7]

$$F(y_i) = \begin{cases} 0, & y_i \leq a_i \\ \frac{(y_i - a_i)^2}{(b_i - a_i)(c_i - a_i)}, & a_i < y_i \leq c_i \\ 1 - \frac{(b_i - y_i)^2}{(b_i - a_i)(b_i - c_i)}, & c_i < y_i \leq b_i \\ 1, & y_i > b_i \end{cases}. \quad (1)$$

Параметр c_i для каждой компоненты находится по формуле

$$c_i = 3 \cdot \bar{y}_i - (a_i + b_i). \quad (2)$$

Так как наработки компонент оборудования имеют треугольное распределение (1), то моделирование их значений проводится по формуле [7]

$$y_i = \begin{cases} a_i + \sqrt{r(b_i - a_i)(c_i - a_i)}, & 0 < r \leq \frac{c_i - a_i}{b_i - a_i}; a_i < y_i \leq c_i \\ b_i - \sqrt{(1 - r)(b_i - a_i)(b_i - c_i)}, & \frac{c_i - a_i}{b_i - a_i} < r < 1; c_i < y_i < b_i \end{cases}. \quad (3)$$

В данном исследовании рассмотрено два направления:

- эксперты описывают наработку компонентов оборудования с точностью до чисел;
- среднее значение наработки считается случайной величиной, имеющей бета-распределение на интервале (m_{i1}, m_{i2}) .

Второе направление исследования учитывает неопределенность условий при эксплуатации оборудования. Следуя работе [6], рассмотрим два варианта значений параметров для бета-распределения: 1) $\alpha = \beta = 1$; 2) $\alpha = \beta = 4$.

Подчеркнем, что в отличие от работы [6], в данном исследовании рассматривается другой случай обслуживания оборудования: при отказе любой компоненты происходит восстановление только этой компоненты (случай А); в цитируемой работе все компоненты восстанавливались в исходное состояние (случай В). Как и в случае В, в нашем случае временем восстановления можно пренебречь. Так как при выбранных допущениях наработка исследуемого оборудования является результатом наложения потоков отказов компонент, то при имитационном моделировании этого процесса предложено использовать событийный подход на основе календаря событий [8].

В результате имитационного моделирования полученные значения наработок многокомпонентного оборудования образуют выборку объема n

$$X_0 = (x_s, s = 1, \dots, n). \quad (4)$$

На основе полученных выборочных значений (4), в данной работе исследуются такие показатели надежности [9]:

– численная вероятность безотказной работы — $P_r(x)$;

– численная средняя наработка

$$\overline{x_r} = \int_0^{z_J} P_r(x) dz = z_0 + \frac{z_J - z_0}{J} (0,5 + \sum_{j=1}^{J-1} k_j); \quad (5)$$

– численное значение гамма-процентного ресурса

$$x_r(\gamma) = z_{j-1} + \frac{\gamma - k_{j-1}}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{z_J - z_0}{J}, \quad k_j < \gamma \leq k_{j+1}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (6)$$

В моделях (5, 6): J — число интервалов при группировке выборки (4); z_j — значения узлов сгруппированной выборки, z_0 и z_J — минимальное и максимальное значение; γ — значение вероятности, при которой находится гамма-процентный ресурс; k_j — величина, зависящая от относительных частот, $j = \overline{1, J}$, $k_0 = 1$, $k_J = 0$.

Для исследования этих показателей методом имитационного моделирования создано программно-математическое обеспечение в среде Visual Studio 2019 с использованием языка программирования C# [10]. В проводимом исследовании объем выборочных значений (4) выбран 10 000, что обеспечивает необходимую точность вычислений показателей надежности (5) и (6).

Для исследования эксперты выбрали исходные данные в условных единицах для шести компонент, приведенные в табл. 1.

Так как средняя наработка для второго направления является случайной величиной, то эксперты еще выбирают для нее математическое ожидание (\tilde{y}_i).

Таблица 1

Исходные данные, случаи А и В

i	1	2	3	4	5	6
a_i	0,0	2,0	0,0	1,0	1,0	0,0
b_i	10,0	14,0	12,0	15,0	12,0	14,0
m_{i1}	4,0	7,0	5,0	6,5	5,5	5,5
m_{i2}	6,0	9,5	7,5	9,5	7,5	8,5
\tilde{y}_i	5,0	8,25	6,25	8,0	6,5	7,0

Результаты моделирования в условных единицах приведены в табл. 2, где \tilde{x} — точечная оценка средней наработки оборудования; (x_n, x_v) — доверительный интервал.

Таблица 2

Результаты моделирования, случаи А и В

№	I	$\alpha = \beta$	\bar{x}_r	$x_r(\gamma)$	\tilde{x}	x_n	x_e
1	4	1	3,766	1,611	3,765	3,733	3,798
2	6	1	3,231	1,423	3,231	3,202	3,258
3	4	4	3,839	1,692	3,839	3,806	3,871
4	6	4	3,323	1,452	3,323	3,294	3,351
5	4	–	4,464	2,011	4,464	4,428	4,501
6	6	–	3,926	1,708	3,926	3,893	3,961
7	4	1	1,658	0,235	1,655	1,629	1,681
8	6	1	1,105	0,139	1,103	1,084	1,122
9	4	4	1,652	0,230	1,651	1,625	1,676
10	6	4	1,111	0,135	1,110	1,091	1,129
11	4	–	1,851	0,245	1,848	1,821	1,877
12	6	–	1,257	0,167	1,255	1,235	1,276

Первые 4 варианта (1–4) соответствуют технологии ремонта для случая В в условиях неопределенности; следующие 2 варианта (5, 6) для случая В, но средние значения наработок компонент являются детерминированными величинами; следующие 4 варианта (7–10) соответствуют технологии ремонта для случая А в условиях неопределенности; остальные 2 варианта (11, 12) для случая А, но средние значения наработок компонент являются детерминированными величинами.

По результатам табл. 2 можно сделать следующие выводы:

- все численные значения средней наработки многокомпонентного оборудования (\bar{x}_r) попали в доверительные интервалы, что подтверждает достоверность результатов моделирования;

- неопределенность исходных данных уменьшает значения показателей надежности оборудования не зависимо от технологии его обслуживания и ремонта;

- значения параметров вероятностной модели неопределенности влияют на значения показателей надежности для случая В. При $\alpha = \beta = 4$ эти значения больше, чем при $\alpha = \beta = 1$. Для случая А такого влияния нет;

- наибольшее влияние на показатели надежности оказывает технология обслуживания и ремонта. Для случая А значения показателей надежности существенно меньше.

На рис. 1 и 2 представлены гистограммы частот наработок многокомпонентного оборудования для вариантов 2 и 8, соответственно. Эти варианты отличаются только технологией обслуживания и ремонта оборудования.

Из рисунков видно, что технология ремонта влияет на структуру гистограммы, а она существенно влияет на значения показателей надежности. Для случая В гистограмма имеет положительную асимметрию, а для случая А она напоминает показательный закон.

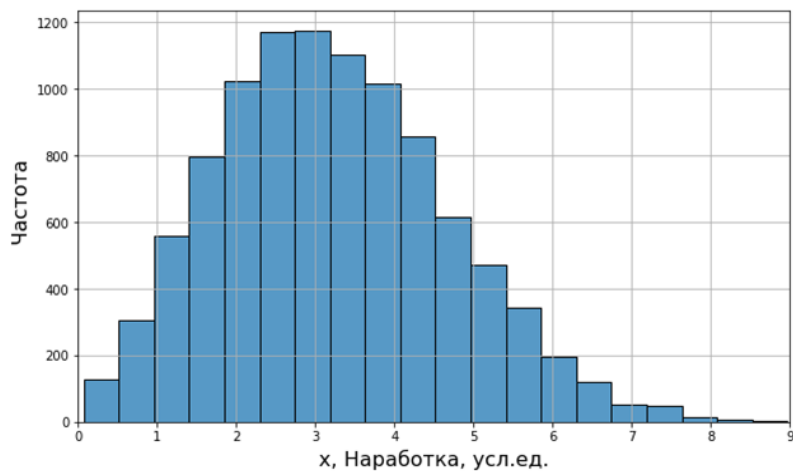


Рис. 1. Гистограмма частот наработки оборудования, вариант 2

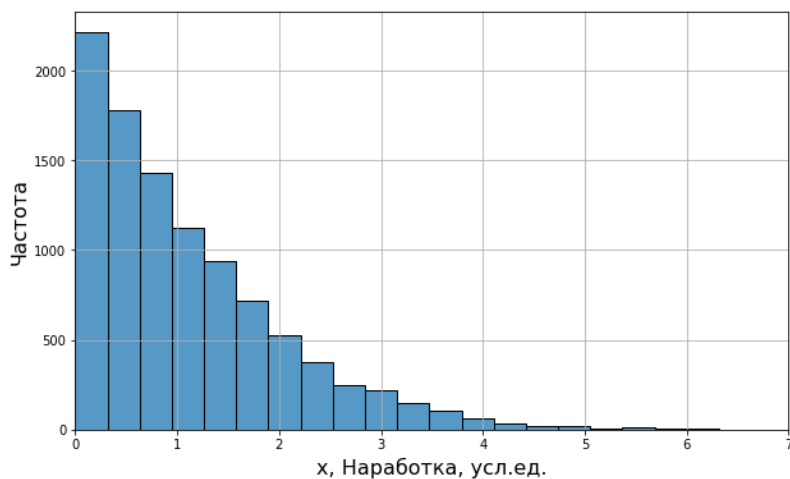


Рис. 2. Гистограмма частот наработки оборудования, вариант 8

Подчеркнем, что созданное программно-математическое обеспечение позволяет количественно определять показатели надежности многокомпонентного оборудования в зависимости от значений исходных данных наработок компонент, модели неопределенности, числа компонент, а также технологии обслуживания и ремонта, что очень важно при эксплуатации этого оборудования.

Список использованной литературы

1. Крестин Е.А. Диагностика машин и оборудования / Е.А. Крестин, И.Е. Крестин. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 376 с.

2. Ковалевский В.М. Диагностика и надежность транспортных технических систем / В.М. Ковалевский, Б.В. Туробов, И.Б. Артемьев. — DOI 10.14489/td.2015.07.33-36. — EDN UBXJSD // Контроль. Диагностика. — 2015. — № 7. — С. 33–36.
3. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования / В.В. Носов. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 376 с.
4. Лыфарь В.А. Разработка метода оптимизации проведения ремонтно-восстановительных работ с учетом показателей риска / В.А. Лыфарь, С.А. Сафонова, В.Г. Иванов. — DOI 10.15587/2312-8372.2015.40768. — EDN TQAUJP // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 2 (22). — С. 11–17.
5. Капцова Н.И. Оптимизация взаимосвязей показателей надежности с объемами ремонтно-восстановительных работ изделий газового оборудования и трубопроводных систем / Н.И. Капцова. — EDN TQKQRB // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2015. — № 3. — С. 77–79.
6. Беляков В.О. Вычисление показателей надежности оборудования методом Монте-Карло при неопределенности исходных данных / Ю.М. Краковский, В.О. Беляков. — EDN OHYKVP // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК : материалы X нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Молодежный, 2022. — С. 292–297.
7. Краковский Ю.М. Оценка надежности рельсовых креплений на основе экспертной информации с использованием метода Монте-Карло / Ю.М. Краковский, В.О. Беляков, В.А. Начигин. — DOI 10.26731/1813-9108.2022.1(73).163-169. — EDN JGHUGG // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2022. — № 1 (73). — С. 163–169.
8. Кельтон В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. — Санкт-Петербург : Питер, 2004. — 847 с.
9. Краковский Ю.М. Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски / Ю.М. Краковский, С.К. Каргапольцев, В.А. Начигин. — Санкт-Петербург : ЛИТЕО, 2018. — 240 с.
10. Троелсен Э. Язык программирования C# 5.0 и платформа NET 4.5 / Э. Троелсен. — Москва : Вильямс, 2013. — 1312 с.

References

1. Krestin E.A., Krestin I.E. *Diagnostics of machines and equipment*. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2016. 376 p.
2. Kovalevskiy V.M., Turobov B.V., Artemyev I.B. Diagnostics and Reliability of Transportation Technical Systems. *Kontrol. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2015, no. 7, pp. 33–36. (In Russian). EDN: UBXJSD. DOI: 10.14489/td.2015.07.33-36.
3. Nosov V.V. *Diagnostics of machines and equipment*. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2017. 376 p.
4. Lyfar V.A., Safonova S.A., Ivanov V.G. Development of Optimization Method of the Repair Work Taking into Account the Risk Indicators. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva = Technology Audit and Production Reserves*, 2015, no. 2, pp. 11–17. (In Russian). EDN: TQAUJP. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.40768.
5. Kaptsova N.I. Optimization of the relationship between reliability indicators and the volume of repair and restoration work for gas equipment and pipeline systems. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov*, 2015, no. 3, pp. 77–79. (In Russian). EDN: TQKQRB.

6. Krakovsky Y.M., Belyakov V.O. Calculation of Equipment Reliability Indicators by the Monte Carlo Method with Uncertainty of the Initial Data. *Topical issues of engineering and technological support of the agro-industrial complex. Materials of the X National Scientific and Practical Conference with the International Participation*. Molodezhnyi, 2022, pp. 292–297. (In Russian). EDN: OHYKVP.

7. Krakovskii Y.U., Belyakov V.O., Nachigin V.A. Assessment of the Reliability of Rail Fasteners Based on Expert Information Using the Monte Carlo Method. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2022, no. 1, pp. 163–169. (In Russian). EDN: JGHUGG. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).163-169.

8. Law A.M., Kelton W.D. *Simulation Modelling and Analysis*. New York, McGraw-Hill, 1991. 759 p. (Russ. ed.: Law A.M., Kelton W.D. *Simulation Modeling*. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2004. 847 p).

9. Krakovskii Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. *Modeling of the transportation process by rail: analysis, forecasting, risks*. Saint-Petersburg, LITEO Publ., 2018. 240 p.

10. Troelsen A. Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework. New York, Apress, 2012. 1487 p. (Russ. ed.: Troelsen A. Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework. Moscow, Williams Publ., 2013. 1312 p.).

Информация об авторах

Краковский Юрий Мечеславович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: 79149267772@yandex.ru.

Беляков Вячеслав Олегович — аспирант, кафедра информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: surelok1@yandex.ru.

Бендик Надежда Владимировна — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: starkovan@list.ru.

Information about the Authors

Yuri M. Krakovsky — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: 79149267772@yandex.ru.

Vyacheslav O. Belyakov — PhD Student, Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Yezhevsky, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: surelok1@yandex.ru.

Nadezhda V. Bendik — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Yezhevsky, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: starkovan@list.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Краковский Ю.М. Оценка показателей надежности многокомпонентного оборудования методом имитационного моделирования / Ю.М. Краковский, В.О. Беляков, Н.В. Бендик. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(1).57-65. — EDN GAYMEF // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2023. — Т. 5, № 1. — С. 57–65.

For Citation

Krakovsky Yu.M., Belyakov V.O., Bendik N.V. Evaluation of Reliability Indicators of Multicomponent Equipment by Simulation Modeling. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 57–65. (In Russian). EDN: GAYMEF. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(1).57-65.