

Научная статья
УДК 519.6:311
EDN AKSIFM
DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(3).330-338



Ю.М. Краковский

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

В.О. Беляков

*Иркутский государственный аграрный
университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район,
Российская Федерация*

Н.В. Бендик

*Иркутский государственный аграрный
университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район,
Российская Федерация*

Программно-математическое обеспечение для вычисления остаточного ресурса автоматизированного оборудования

Аннотация. Создано программно-математическое обеспечение для вычисления показателей надежности остаточного ресурса (ОстР) автоматизированного оборудования. С точки зрения надежности, сложное автоматизированное оборудование формализуется в виде совокупности компонент, имеющих последовательную структуру. Отказ компоненты приводит к отказу оборудования в целом. В качестве показателей выбраны: численная вероятность безотказной работы для ОстР; численный средний ОстР; численный гамма-процентный ОстР. Показатели надежности ОстР исследуются в зависимости от трех факторов, которые выбираются при запуске программы моделирования: а) число компонент (I), б) вариант технологии (А или В), в) вид неопределенности. Проведенная апробация созданного программно-математического обеспечения на основе имитационного моделирования позволила сформулировать научно-практические выводы.

Ключевые слова. Показатели надежности остаточного ресурса, автоматизированное оборудование, имитационное моделирование.

Информация о статье. Дата поступления: 18 апреля 2024 г.; дата принятия к публикации: 1 октября 2024 г.; дата онлайн-размещения: 17 октября 2024 г.

Original article

Yu.M. Krakovsky

*Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation*

V.O. Belyakov

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

N.V. Bendik

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

Mathematical and Software for Calculate the Residual Resource of Automated Equipment

Abstract. Mathematical and software has been created for calculating reliability indicators of the residual resource of automated equipment. From the point of view of reliability, complex automated equipment is formalized as a set of components with a consistent structure. Failure of a component leads to failure of the equipment as a whole. The following indicators were selected: numerical probability of failure-free operation for the residual resource; numerical average residual resource; numerical gamma percent residual resource. The reliability indicators of the residual resource are investigated depending on three factors that are selected when starting the simulation program: a) the number of components (I), b) the technology option (A or B), c) the type of uncertainty. The conducted testing of the created mathematical and software based on simulation modeling allowed us to formulate scientific and practical conclusions.

Keywords. Reliability indicators of the residual resource, automated equipment, simulation modeling.

Article info. Received 18 April, 2024; Accepted 1 October, 2024; Available online 17 October, 2024.

В последние годы в РФ большое внимание уделяется созданию конкурентноспособного производства по отношению к западным технологиям. Для этого создаются и внедряются технологии на основе автоматизированного оборудования. Автоматизированное производственное оборудование — это совокупность механических, гидравлических, электрических электронных и других устройств, предназначенных для производства определенной продукции. В состав систем автоматизации входят датчики для съема информации, устройства ввода и вывода информации, управляющие устройства и средства, исполнительные механизмы, средства обработки информации и др.

При проектировании подобного оборудования необходимо использовать современные методы надежности, а при его эксплуатации использовать средства технической диагностики [1–4]. Данный подход хорошо согласуется с программами импортозамещения, реализуемыми в нашей стране в условиях санкций [5; 6]. По

мнению экспертов, сильнее всего в плане импортозамещения отстают следующие высокотехнологические отрасли: авиастроение, радиоэлектроника, фармацевтика и энергетическое машиностроение.

С точки зрения надежности, сложное автоматизированное оборудование формализуется в виде совокупности компонент, имеющих последовательную структуру. Отказ компоненты приводит к отказу оборудования в целом. Данное исследование является продолжением работы [7], но исследуется численным методом остаточный ресурс (Остр). Важность вычисления Остр отмечено в различных публикациях [8; 9].

Отметим отечественный программный комплекс «Ресурс» по расчету Остр. Это продукт научно-технического предприятия «Трубопровод», поэтому он рассчитывает Остр трубопроводных систем при влиянии коррозионно-эрозионного воздействия. Программа позволяет производить три типа расчетов: 1) расчет гамма-процентного Остр; 2) расчет Остр трубопровода по статистике отказов его элементов; 3) расчет наработки на отказ трубопровода после гидравлических испытаний повышенным давлением.

В данной работе, используя программное обеспечение на основе имитационного моделирования, вычисляются численным методом три показателя надежности для Остр. Целью исследования является показать влияние числа компонент оборудования, технологии обслуживания и ремонта, а также присутствие или отсутствие неопределенности на эти показатели.

Как и в работе [7] рассматривается многокомпонентное оборудование, состоящее из I компонент с двумя технологиями его обслуживания и ремонта: вариант А, когда при отказе происходит восстановление только этой компоненты; вариант В, когда при отказе оборудование восстанавливается до исходного состояния. В обоих вариантах временем восстановления пренебрегают.

В качестве модели наработки компоненты (y_i), как случайной величины, предложено трехпараметрическое треугольное распределение на интервале (a_i, b_i) , $i = \overline{1, I}$, где i — номер компоненты. Дополнительно необходимо задать среднее значение y_i наработки, которое является либо числом (неопределенность отсутствует), либо оно является случайной величиной (неопределенность присутствует). В этом случае среднее значение имеет бета-распределение на интервале (m_{i1}, m_{i2}) с двумя вариантами значений параметров: $\alpha = \beta = 1$, $\alpha = \beta = 4$.

В результате моделирования формируется выборка наработок оборудования нужного объема n

$$X = (x_q, q = \overline{1, n}). \quad (1)$$

Подчеркнем, что выборочные значения (1) зависят от трех факторов, которые выбираются при запуске программы модели-

рования: 1) число компонент (I), 2) вариант технологии (А или В), 3) вид неопределенности.

Выборка (1) группируется: J — количество интервалов после группировки, число выборочных значений, попавших в интервал, называют частотами (n_j); z_j — узлы этой выборки, z_0 и z_j — наименьшее и наибольшее значения этих узлов. Зафиксируем j , тогда z_j — значение наработки оборудования, от которого рассчитывается Остр.

Обозначим через u значение Остр, а через u_s — значения узлов в сгруппированной выборке для Остр. В результате обработки полученной сгруппированной выборки имеется возможность определить три показателя надежности для Остр оборудования:

– численную вероятность безотказной работы для Остр

$$P_j^r(u) = \begin{cases} 1, u < 0 \\ p_j(s-1) + (u - u_{s-1}) \cdot (p_j(s) - p_j(s-1)) \cdot \frac{J}{z_j - z_0}, & (2) \\ 0, u \geq z_j - z_j \end{cases}$$

где $z_j = z_0 + j \cdot \frac{z_j - z_0}{J}$, $u_{s-1} \leq u < u_s$, $u_s = s \cdot \frac{z_j - z_0}{J}$, $s = \overline{1, J-j}$.

– численный средний Остр

$$\tilde{u}_j = \frac{z_j - z_0}{J} (0,5 + \sum_{s=1}^{J-j} p_j(s)), \quad (3)$$

– численный гамма-процентный Остр

$$u_j(\gamma) = u_{s-1} + \frac{\gamma - p_j(s-1)}{p_j(s) - p_j(s-1)} \cdot \frac{z_j - z_0}{J}, \quad (4)$$

где $p_j(s-1) \geq \gamma > p_j(s)$, $s = \overline{1, J-j}$, $p_j(0) = 1$, $z_0 = 0$.

В формулах (2)–(4)

$$p_j(s) = \frac{k_{j+s}}{k_j}, p_j(0) = 1 \quad (5)$$

В формулах (2)–(5): γ — вероятность для гамма-процентного ресурса; k_{j+s} , k_j — переменные, значения которых зависят от относительных частот

$$m_j = \sum_{i=1}^j n_i / n; k_j = 1 - m_j; j = 1, \dots, J, k_0 = 1.$$

Программное обеспечение, приведенное в работе [7], доработано для получения показателей надежности ОстР, приведенных выше.

Апробация созданного программно-математического обеспечения проведена при следующих исходных данных: число компонент I равно 4 либо 6; технология А либо В; неопределенность присутствует ($\alpha = \beta = 4$), либо отсутствует; объем выборочных значений $n = 10000$; вероятность $\gamma = 0,9$; j для ОстР равно 8; число интервалов для сгруппированной выборки $J = 40$.

Исходные данные по наработкам компонент в условных единицах для шестикомпонентного оборудования приведены в табл. 1 (данные получены с привлечением экспертов).

Таблица 1

Исходные данные по наработкам компонент

i	1	2	3	4	5	6
a_i	0,0	1,0	0,0	2,0	2,0	0,0
b_i	10,0	11,0	15,0	10,0	9,0	12,0
\bar{y}_i	5,0	6,0	7,0	5,5	5,5	5,0
m_{i1}	4,0	5,0	6,0	5,0	4,5	4,5
m_{i2}	6,0	7,0	8,0	6,0	6,5	5,5

Полученные результаты моделирования по выбранным исходным данным содержатся в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

\mathcal{N}°	I	no	z_j	\tilde{u}_j	$u_j(\gamma)$	\tilde{u}	u_n	u_g
1	4	4374	1,3848	1,1163	0,1473	1,1152	1,0973	1,1331
2	6	3449	1,0598	0,7746	0,0997	0,7736	0,7605	0,7866
3	4	4275	1,4149	1,1144	0,1518	1,1144	1,0968	1,1320
4	6	2598	1,2981	0,7267	0,0922	0,7241	0,7117	0,7365
5	4	9036	1,6673	2,0788	0,5740	2,0927	2,0698	2,1157
6	6	8674	1,4947	1,6858	0,4237	1,6876	1,6680	1,7071
7	4	8987	1,1724	2,0612	0,5531	2,0827	2,0593	2,1060
8	6	8424	1,6221	1,5698	0,3698	1,5741	1,5551	1,5929

В этой таблице: \tilde{u} — точечная оценка средней наработки ОстР оборудования; (u_n, u_g) — доверительный интервал; z_j — значение наработки оборудования, от которого рассчитывается ОстР; no — объем выборки для которой рассчитывается ОстР; \mathcal{N}° — номер варианта при моделировании; варианты (1, 2) соответствуют технологии А, неопределенность отсутствует; варианты (3, 4) для случая А, неопределенность присутствует; варианты (5, 6) соот-

ветствуют технологии В, неопределенность отсутствует; варианты (7, 8) для случая В, неопределенность присутствует. По результатам табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1. Численные значения средней наработки ОстР автоматизированного оборудования (\tilde{u}_j) попали в доверительные интервалы (u_n, u_θ) и близки к своим точечным оценкам (\tilde{u}). Это позволяет сделать вывод о достоверности моделирования.

2. Объемы выборок (n_0) для технологии А существенно меньше, чем для технологии В при одинаковом j и приблизительно одинаковом z_j .

3. Неопределенность среднего значения наработки компоненты (y_i) незначительно влияет на показатели надежности ОстР ($\tilde{u}_j, u_j(\gamma)$).

4. С увеличением числа компонент (I) значения показателей надежности ОстР ($\tilde{u}_j, u_j(\gamma)$) уменьшаются.

На рис. 1 и 2 приведены, соответственно, гистограммы частот ОстР оборудования и его наработки для варианта 5.

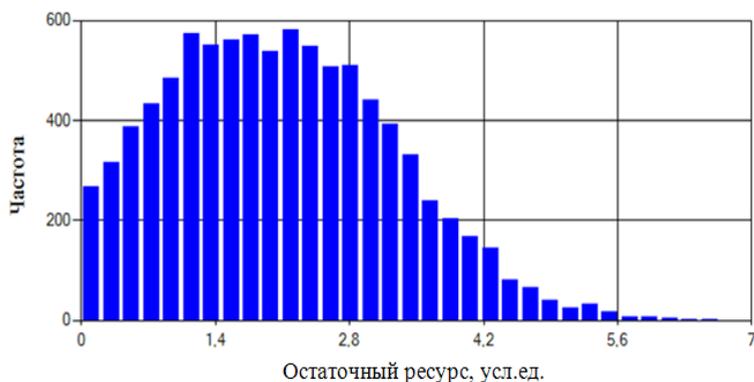


Рис. 1. Гистограмма частот ОстР оборудования, вариант 5

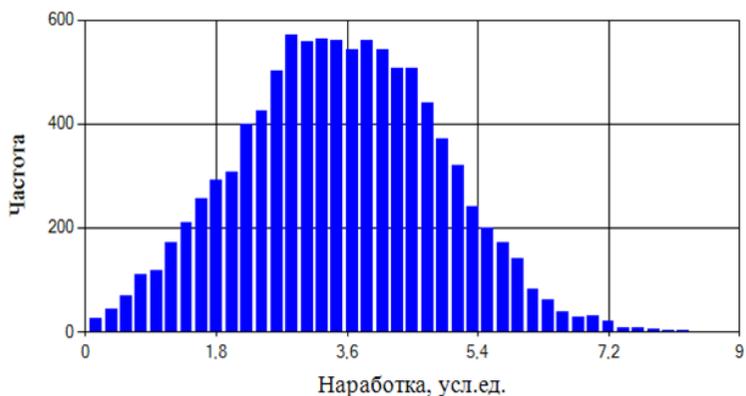


Рис. 2. Гистограмма частот наработки оборудования, вариант 5

Из рисунков видно, что гистограммы частот для ОстР и наработки отличаются: для ОстР она слева усекается и имеет «хвост» справа; для наработки она имеет левую асимметрию (оценка среднего значения равна 2.09, а диапазон изменения от 0 до 8).

В заключении отметим, что созданное и апробированное программно-математическое обеспечение дополняет описанное в работе [7] программно-математическое обеспечение и позволяет совместно с ним оценивать показатели надежности и для наработки, и для остаточного ресурса. Данное программно-математическое обеспечение найдет применение в учебном процессе при изучении дисциплин, связанных с теорией надежности.

Список использованной литературы

1. Зеленцов Б.П. Исследование моделей расчета надежности при разных способах задания периодичности проверок / Б.П. Зеленцов, А.С. Трофимов. — DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-4. — EDN GK GKSE // Надежность и качество сложных систем. — 2019. — № 1 (25). — С. 35–44.
2. Малафеев С.И. Надежность электроснабжения / С.И. Малафеев. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 368 с.
3. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования / В.В. Носов. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 376 с.
4. Хоанг Н.А. Оценка показателей «Отказ в обслуживании» при организации ремонтных работ многокомпонентного оборудования / Ю.М. Краковский, Н.А. Хоанг. — DOI 10.17308/sait.2020.1/2597. — EDN USBYW // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2020. — № 1. — С. 110–118.
5. Балашов М.М. Импортзамещение в отрасли энергетического машиностроения / М.М. Балашов. — DOI 10.17747/2618-947X-2020-2-182-195. — EDN IKNDLR // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2020. — Т. 11, № 2. — С. 182 — 195.
6. Ваганова О.В. Влияние экономических санкций на инновационное развитие России / О.В. Ваганова. — DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-1-21-30. — EDN XDMXWZ // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. — 2019. — Т. 46, № 1. — С. 21–30.
7. 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 and Mathematical Modeling. — 2023. — Т. 5, № 1. — С. 57–65.
8. Юрков Н.К. Оценка и прогнозирование остаточного ресурса по результатам биномиальных испытаний, не давших отказы / Н.К. Юрков, В.С. Михайлов, В.А. Трусов. — DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-7. — EDN ULDWVK // Надежность и качество сложных систем. — 2019. — № 3 (27). — С. 62–69.
9. Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов / И.И. Кочегаров, Н.К. Юрков, О.К. Абдирашев [и др.]. — DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-7. — EDN EFPPCB // Надежность и качество сложных систем. — 2020. — № 4 (32). — С. 58–72.

References

1. Zelentsov B.P., Trofimov A.S. Research Models of Reliability Calculation with Different Ways of Task the Periodic Inspection. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability & Quality of Complex Systems*, 2019, no. 1, pp. 35–44. (In Russian). EDN: GK GKSE. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-1-4.
2. Malafeev S.I. *Reliability of Power Supply*. Saint Petersburg, Lan Publ., 2018. 368 p.
3. Nosov V.V. *Diagnostics of Machines and Equipment*. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2017. 376 p.
4. Krakovsky Yu.M., Hoang N.A. Assessment of the Indicators of “Service Unavailability” when Organizing Repair Works of Complex Equipment. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, 2020, no. 1, pp. 110–118. (In Russian). EDN: USBY-YW. DOI: 10.17308/sait.2020.1/2597.
5. Balashov M.M. Import Substitution in the Power Engineering Industry. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment = Strategic Decisions and Risk Management*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 182–195. (In Russian). EDN: IKNDLR. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-2-182-195.
6. Vaganova O.V. The Impact of Economic Sanctions on the Innovative Development of Russia. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika = Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Computer Science*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 21–30. (In Russian). EDN: XDMXWZ. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-1-21-30.
7. 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.
8. Yurkov N.K., Mikhailov V.S., Trusov V.A. Estimation and Prediction of the Residual Resource Based on the Results of Binomial Tests that did not Give Up. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability & Quality of Complex Systems*, 2019, no. 3, pp. 62–69. (In Russian). EDN: ULDWVK. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-3-7.
9. Kocheharov I.I., Yurkov N.K., Abdirashev O.K., Ergaliev D.S., Tulegulov A.D. Methodology for Assessing the Residual Life of the Electronic Unit with the Use of Accelerating Factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability & Quality of Complex Systems*, 2020, no. 4, pp. 58–72. (In Russian). EDN: EFPPCB. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-4-7.

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, п. Молодежный, Иркутский район, 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, п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация, e-mail: starkovan@list.ru.

Information about the Authors

Yuri M. Krakovsky — Doctor of Technical Sciences, Professor, 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, Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation, e-mail: surelok1@yandex.ru.

Nadezhda V. Bendik — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head, Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Yezhevsky, Molodezhny, Irkutsk District, 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. Программно-математическое обеспечение для вычисления остаточного ресурса автоматизированного оборудования / Ю.М. Краковский, В.О. Беляков, Н.В. Бендик. — DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(3).330-338. — EDN AKSIFM // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2024. — Т. 6, № 3. — С. 330–338.

For Citation

Krakovsky Yu.M., Belyakov V.O., Bendik N.V. Mathematical and Software for Calculate the Residual Resource of Automated Equipment. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 3, pp. 330–338. (In Russian). EDN: AKSIFM. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).330-338.