

Научная статья

УДК 519.6:311

EDN SWZSKJ

DOI 10.17150/2713-1734.2025.7(1).29-39



**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*

## **Инструментальное средство для вычисления показателей надежности технологического оборудования**

**Аннотация.** Создано инструментальное средство в виде программно-математического обеспечения для вычисления показателей надежности технологического оборудования при наличии слабого по надежности узла (СНУ). При наличии СНУ делается допущение, что по результатам исследования показателей надежности этого узла, можно делать выводы о надежности всего технологического оборудования. Предложенное математическое обеспечение, основанное на методе Монте-Карло, позволяет формировать выборки наработок оборудования необходимого объема. В результате апробации получены практические рекомендации. Созданное инструментальное средство дополняет существующее программно-математическое обеспечение для режима многокомпонентного оборудования и тем самым позволяет совместно с этим режимом осуществлять комплексную оценку показателей надежности технологического оборудования различного назначения.

**Ключевые слова.** Показатели надежности, технологическое оборудование, метод Монте-Карло.

**Информация о статье.** Дата поступления: 14 января, 2025; дата принятия к публикации: 11 марта 2025 г.; дата онлайн-размещения: 15 апреля 2025 г.

Original article

**Yu.M. Krakovsky**

*Irkutsk State Transport University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**V.O. Belyakov**

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

**N.V. Bendik**

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

## **A Tool for Calculating Reliability Indicators of Technological Equipment**

**Abstract.** A tool has been created in the form of software and mathematical support for calculating reliability indicators of technological equipment in the presence

of a node that is weak in reliability (NWR). In the presence of a node that is weak in reliability, it is assumed that based on the results of a study of the reliability indicators of this node, conclusions can be drawn about the reliability of all technological equipment. The proposed mathematical software, based on the Monte Carlo method, allows you to generate samples of equipment developments of the required volume. As a result of the testing, practical recommendations were obtained. The created tool complements the existing software and mathematical support for the multicomponent equipment mode and thus allows, together with this mode, to carry out a comprehensive assessment of the reliability of technological equipment for various purposes.

**Keywords.** Reliability indicators, technological equipment, Monte Carlo method.

**Article info.** Received 14 January, 2025; Accepted 11 March, 2025; Available online 15 April, 2025.

В связи с реализацией в нашей стране цифровой экономики, а также с необходимостью создания и внедрения конкурентных технологий на основе современного технологического оборудования, повышается роль методов и средств его проектирования, технической диагностики и расчета показателей надежности [1–4].

Данное исследование является развитием работ авторов [5; 6], когда сложное технологическое оборудование рассматривается как совокупность компонент, имеющих последовательную структуру. Отказ компоненты приводит к отказу оборудования в целом.

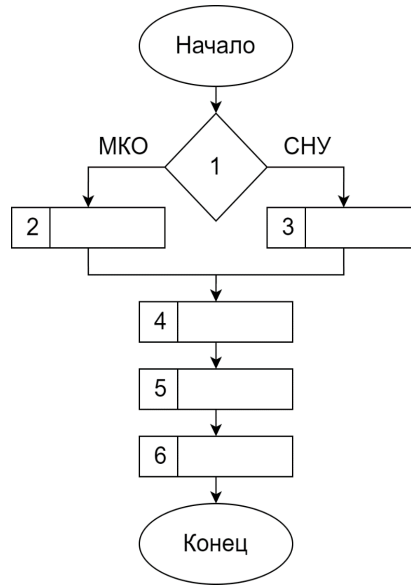
Отличие этой работы заключается в следующем: одна из компонент оборудования является наименее надежной, характеризующей его надежность. Назовем такую компоненту — слабым по надежности узлом (СНУ). Таким образом, при наличии СНУ делается допущение, что по результатам исследования показателей надежности этого узла, можно делать выводы о надежности всего технологического оборудования.

Преимуществом подобного подхода является меньшая трудоемкость при создании статистических данных по наработке. Достаточно проводить испытания по СНУ, чтобы получить необходимые данные.

В качестве примера рассмотрим зерноуборочные комбайны RSM 161 и T500 производства Ростсельмаш. Эти комбайны в общем виде состоят из жатки, молотильного устройства, вентилятора, кабины, бункера, двигателя, соломотряса, скатной доски, разбрасывателя и электрооборудования. Электрооборудование включает в себя устройства освещения и сигнализации, приборы микроклимата, а также различные датчики. По мнению специалистов именно датчики часто являются СНУ [7; 8].

Целью работы является создание инструментального средства в виде программно-математического обеспечения для вычисления показателей надежности технологического оборудования в режиме СНУ.

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма инструментального средства для вычисления показателей надежности технологического оборудования. Дадим ее описание.



**Рис. 1. Блок-схема алгоритма инструментального средства**

1. Осуществляется выбор режима работы инструментального средства: а) режим многокомпонентного оборудования (МКО) (блок 2); б) режим СНУ (блок 3).

2. Оборудование рассматривается как совокупность компонент. Именно этот режим рассмотрен в работах авторов [5; 6]. В качестве вероятностной модели наработки компоненты выбрано трехпараметрическое треугольное распределение. Учитывая число компонент, технологию обслуживания и ремонта оборудования, а также наличие или отсутствие неопределенности при его эксплуатации формируется выборка наработок оборудования (блок 4).

3. В режиме СНУ вводятся экспериментальные данные по наработке этого узла, которые затем обрабатываются специальным образом с последующим формированием выборки (блок 4).

Создание выборки наработок оборудования объема  $n$

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

5. Обработка выборочных значений (1) с использованием численных моделей показателей надежности. Эти модели приведены в работах [5; 6] и включают следующие показатели: а) численную вероятность безотказной работы —  $P_r(x)$ ; б) численную

среднюю наработку оборудования —  $\bar{x}_r$ ; в) численное значение гамма-процентного ресурса —  $x_r(\gamma)$ ; г) численную вероятность безотказной работы для остаточного ресурса (ОстР) —  $P_j^r(u)$ ; д) численное среднее значение ОстР —  $\bar{y}_j$ ; е) численное значение гамма-процентного ОстР —  $u_j(\gamma)$ .

6. Вывод результатов вычислений, включая графический материал в виде графиков и гистограмм частот.

Приведем математическое обеспечение для режима СНУ.

Пусть в результате натурального эксперимента получено  $N$  значений наработок СНУ для выбранного технологического оборудования. Тогда эмпирическую функцию распределения наработки оборудования можно представить следующим образом [9]

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < x_1'' \\ \frac{j-1}{N-1} + \frac{x-x_j''}{(N-1)(x_{j+1}''-x_j'')}, & \\ 1, & \text{при } x_N'' \leq x \end{cases}$$

при  $x_j'' \leq x < x_{j+1}'', j = 1, \dots, N-1$ . (2)

Здесь  $x_j''$  — экспериментальные значения, которые являются узловыми значениями аргумента при описании функции (2),  $x$  — значение наработки как случайной величины. Математическое ожидание наработки для функции распределения (2) равно

$$\bar{x} = \int_0^\infty (1-F(x))dx = x_1'' + \frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N (N-j+0,5)(x_j''-x_{j-1}''). \quad (3)$$

Если задана функция распределения  $F(x)$ , то модель для вычисления значений случайной величины получается из уравнения  $F(x) = r, r \rightarrow R(0, 1)$  [9]. Запись  $r \rightarrow R(0, 1)$  означает, что  $r$  — это независимое значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале  $(0,1)$ . Программы или функции, моделирующие эти значения, имеются во всех системах программирования.

Решая это уравнение с учетом (2), получим модель для вычисления значений наработки

$$x_i = x_j'' + ((N-1) \cdot r_i - j + 1)(x_{j+1}'' - x_j''), i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где  $n$  — требуемый объем выборки для оценки показателей надежности.

В результате моделирования по формуле (4) создается выборка наработок (1), которая обрабатывается в блоке 5 (рис. 1).

Подчеркнем, что в режиме СНУ нет необходимости выбирать вероятностную модель для наработки, что является его преимуществом по отношению к режиму МКО.

Дополнительно отметим, что в режиме МКО в зависимости от технологии обслуживания и ремонта оборудования используется либо метод Монте-Карло, либо дискретно-имитационное моделирование. В режиме СНУ используется метод Монте-Карло.

Приведем численные модели по четырем показателям надежности [5; 6]:

– численная средняя наработка оборудования

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

– численное значение гамма-процентного ресурса

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

– численное среднее значение ОстР

$$\tilde{u}_j = \frac{z_J - z_0}{J} (0,5 + \sum_{s=1}^{J-j} p_j(s)); \quad (7)$$

– численный гамма-процентный ОстР

$$u_j(\gamma) = u_{s-1} + \frac{\gamma - p_j(s-1)}{p_j(s) - p_j(s-1)} \cdot \frac{z_J - z_0}{J}, \quad (8)$$

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

В формулах (7), (8)

$$p_j(s) = \frac{k_{j+s}}{k_j}, p_j(0) = 1. \quad (9)$$

В формулах (5)–(9):  $J$  — число интервалов при группировке выборки (1);  $z_j$  — значения узлов сгруппированной выборки,  $z_0$  и  $z_J$  — минимальное и максимальное значение;  $\gamma$  — вероятность для гамма-процентного ресурса;  $k_{j+s}$ ,  $k_j$  — переменные, значения которых зависят от относительных частот

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

При определении показателей (7), (8) фиксируется  $j$ , тогда  $z_j$  — значение наработки оборудования, от которого рассчитывается ОстрР

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

$u$  — значение ОстрР, а  $u_s$  — значения узлов в сгруппированной выборке для ОстрР.

Доработка программного обеспечения проводилось на языке программирования С# в среде Microsoft Visual Studio 2022. Язык программирования С# выбран по следующим причинам: совместимость с .NET, объектно-ориентированный подход, поддержка асинхронного программирования, кроссплатформенность, интеграция с Microsoft Visual Studio, простота кода [10].

Апробацию режима СНУ проведем для исходных данных по наработке этого узла, приведенных в таблице 1 ( $N = 20$ ). Исходные данные приведены в условных единицах. Подчеркнем, что данные по наработкам являются конфиденциальной информацией, поэтому мы не указываем тип технологического оборудования и СНУ.

Таблица 1

**Исходные данные по наработке, усл. ед.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18,48	19,73	22,72	25,57	27,15	27,69	28,63	30,69	31,04	32,75
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
33,66	34,48	36,04	37,17	37,71	39,70	42,33	45,42	48,16	53,12

В табл. 2 приведены результаты обработки выборки (1) при  $n = 10000$ , этот объем позволяет получать результаты с необходимой точностью:  $\tilde{x}$  — оценка математического ожидания для наработки СНУ;  $s$  — оценка среднеквадратического отклонения для наработки;  $x_n$  — нижняя граница доверительного интервала для математического ожидания;  $x_e$  — верхняя граница доверительного интервала для математического ожидания;  $\bar{x}$  — значение математического ожидания для наработки СНУ, полученное по формуле (3). Это значение попало в доверительный интервал, что подтверждает достоверность созданного программно-математического обеспечения для режима СНУ.

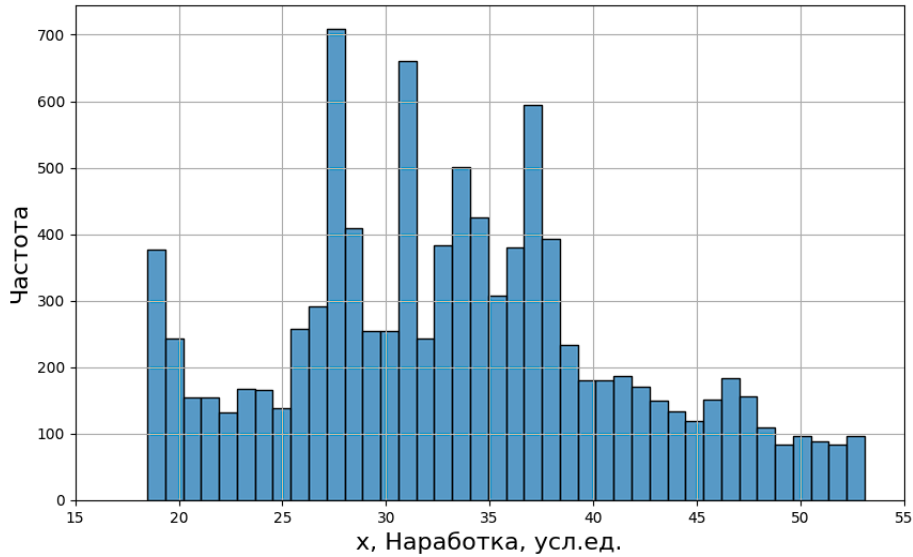
Таблица 2

**Результаты обработки выборки (1), усл. ед.**

$\tilde{x}$	$s$	$x_n$	$x_e$	$\bar{x}$
33,46	8,17	33,29	33,62	33,50

На рис. 2 приведена гистограмма частот для наработки СНУ, полученная по выборке (1) для числа интервалов  $J = 40$ .

Гистограмма на рис. 1 подтверждает, что в режиме СНУ вероятностная модель для наработки может быть не похожей на типовое распределение.



**Рис. 2. Гистограмма частот для наработки СНУ**

В табл. 3 приведены результаты по показателям надежности СНУ, полученные по созданному программно-математическому обеспечению для режима СНУ: вероятность  $\gamma = 0,9$ ;  $j$  для ОстрР равно 8;  $no$  — объем выборки для которой рассчитывается ОстрР;  $\tilde{y}$  — точечная оценка средней наработки ОстрР оборудования;  $(u_n, u_\theta)$  — доверительный интервал.

Таблица 3

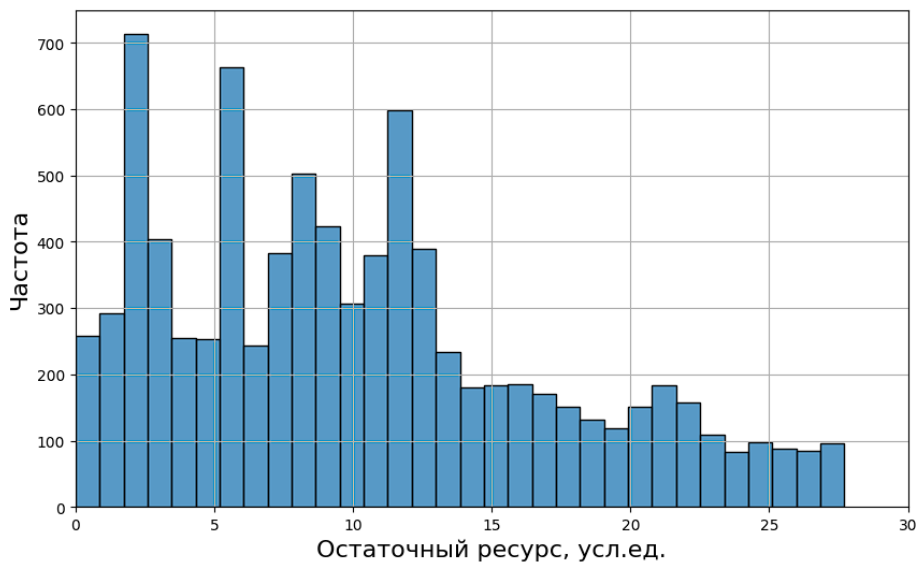
**Результаты по показателям надежности СНУ, усл.ед.**

$\bar{x}_r$	$x_r(\gamma)$	$z_j$	$\tilde{y}_j$	$u_j(\gamma)$	$no$	$\tilde{y}$	$u_n$	$u_\theta$
33,47	22,42	25,41	10,25	2,10	8468	10,24	10,09	10,39

Как видно из табл. 3 значение наработки оборудования ( $z_j$ ), относительно которой считается ОстрР, равняется 25,41. Численная средняя наработка оборудования (5), равная 33,47, попадает в доверительный интервал  $(x_n, x_\theta)$  (табл. 2) и близка по значению к математическому ожиданию для наработки СНУ (3), равное 33,50, что говорит о достоверности расчетов. То же самое верно и для

ОстР. Как видно из вышеприведенной таблицы численное среднее значение ОстР (7), равное 10.25, попадает в доверительный интервал ( $u_n, u_g$ ), что говорит о достоверности моделирования.

На рис. 3 приведена гистограмма частот для ОстР СНУ. Из рисунка видно, что в диапазоне от 0 до 12 усл. ед. график имеет нескольких «выбросов» и это надо учитывать при эксплуатации оборудования.



**Рис. 3. Гистограмма частот для ОстР СНУ**

В заключении отметим, что созданное и апробированное инструментальное средство в виде программно-математическое обеспечение для режима СНУ на основе метода Монте-Карло дополняет описанное в работах [5; 6] программно-математическое обеспечение для режима МКО (рис. 1) и тем самым позволяет совместно с этим режимом осуществлять комплексную оценку показателей надежности технологического оборудования различного назначения.

### 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. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования / В.В. Носов. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 376 с.



3. 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 USBYYW // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2020. — № 1. — С. 110–118.
4. 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.
5. 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.
6. 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 and Mathematical Modeling. — 2024. — Т. 6, № 3. — С. 330–338.
7. Королев А.Е. Отказы систем комбайнов / А.Е. Королев. — DOI 10.24411/2409-3203-2018-11818. — EDN JPNQCW // Эпоха науки. — 2019. — № 18. — С. 78–81.
8. Комаров В.А. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период / В.А. Комаров, М.И. Курашкин. — DOI 10.15507/2658-4123.031.202102.188-206. — EDN MZGHJX // Инженерные технологии и системы. — 2021. — Т. 31, № 2. — С. 188–206.
9. Кельтон В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. — Санкт-Петербург : Питер, 2004. — 847 с.
10. Шарп Дж. Microsoft Visual C#: подробное руководство. — 8-е изд. / Дж. Шарп. — Санкт-Петербург : Питер, 2017. — 848 с.

## 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. Nosov V.V. *Diagnostics of machines and equipment*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2017. 376 p.
3. Krakovsky Yu.M., Hoang N.A. Assessment of the Indicators of “Service Unavailability” When Organizing Repair Works of Complex Equipment. *Vestnik VGU. 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: USBYYW. DOI: 10.17308/sait.2020.1/2597.
4. 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.
5. Krakovsky Yu.M., Belyakov V.O., Bendik N.V. Evaluation of Reliability Indicators of Multicomponent Equipment By Simulation Modeling. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 57–65. (In Russian). EDN: GAYMEF. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(1).57-65.

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

7. Korolev A.E. Refusals the Systems of Combine Harvesters. *Epokha nauki = The Era of Science*, 2019, no. 18, pp. 78–81. (In Russian). EDN: JPNQCW. DOI: 10.24411/2409-3203-2018-11818.

8. Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 188–206. (In Russian). EDN: MZGHJX. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.188-206.

9. Averill M.Law, Kelton W.D. *Simulation Modelling Analysis*. Boston, McGraw-Hill, 2000. 790 p. (Russ. ed.: Kelton W., Averill M.Law *Simulation modeling*. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004. 847 p.).

10. Sharp J. *Microsoft Visual C# Step by Step*. 8<sup>th</sup> ed. Microsoft Press, 2015. 800 p. (Russ. ed.: Sharp J. *Microsoft Visual C#: detailed instructions*. 8<sup>th</sup> ed. Saint Petersburg, Piter Publ., 2017. 848 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, п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация, e-mail: surelok1@yandex.ru.

**Бендик Надежда Владимировна** — кандидат технических наук, доцент кафедры 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** — D.Sc. in 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, 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. Инструментальное средство для вычисления показателей надежности технологического оборудования / Ю.М. Краковский, В.О. Беяков, Н.В. Бендик . — DOI 10.17150/2713-1734.2025.7(1).29-39. — EDN SWZSKJ // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2025. — Т. 7, № 1. — С. 29–39.

**For Citation**

Krakovsky Yu.M., Belyakov V.O., Bendik N.V. A Tool for Calculating Reliability Indicators of Technological Equipment. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2025, vol. 7, no. 1, pp. 29–39. (In Russian). EDN: SWZSKJ. DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(1).29-39.