



19. Gasanenko L.B. Impedans polya nizkochastotnogo pryamolineinogo toka nad gorizonta'no sloistoi zemlei [The impedance of the field of low-frequency straight current over a horizontally layered ground]. Elektromagnitnoe zondirovanie i magnetotelluricheskie metody razvedki [Electromagnetic sounding and magnetotelluric methods of reconnaissance]. Leningrad: LGU Publ., 1968, pp. 47 – 58.

20. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Raschet induktivnostei: Spravochnaya kniga [Calculation of inductances: Reference book]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986, 488 p.

21. Shelyuk S.N., Suvorov A.A. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya LEP s uchedom poperechnoi provodimosti [Determination of the parameters for the replacement of power lines with regard to the transverse conductivity]. Materialy shestoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost'» [Materials of the sixth All-Russian Scientific-Technical Conference "Energy: Ecology, Reliability, Safety"]. Tomsk: TPU Publ., 2000. Vol. 1, pp. 39 – 41.

22. Duggan E., Morisson R. New technique is developed to determine harmonic impedance. Transmiss and Distrieb. Int., 1992. 3, No.2, p. 32, 34.

23. Faibisovich V.A. Opredelenie parametrov elektricheskikh sistem: Novye metody eksperimental'nogo opredeleniya [Determination of parameters of electrical systems: New methods for experimental determination]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982, 120 p.

24. Mel'nikov N.A., Rokotyay S.S., Sherentsis A.N. Proektirovanie elektricheskoi chasti vozdushnoi linii elektroperedachi 330-500kV [Designing the electrical part of the overhead 330-500kV power transmission line]. In Rokotyay S.S. (gen. ed.). 2nd ed., updated and revised. Moscow: Energiya Publ., 1974, 474 p.

25. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Parametry trekhprovodnoi LEP. Metod vos'mipolyusnika [Parameters of three-wire power lines. The eight-terminal network method]. Bratsk: BrGU Publ., 2013, 265 p.

26. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Ispol'zovanie teorii vos'mipolyusnika dlya analiza elektroperedachi [Using the eight-terminal network theory for electric power transmission analysis]. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2014, 145 p.

27. Krotkov I.N. Tochnye izmereniya elektricheskoi emkosti i induktivnosti. Skhemy, metody, etalony [Accurate measurements of electrical capacitance and inductance. Schemes, methods, standards]. Moscow: Standartizdat Publ., 1966, 272 p.

28. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Sposob opredeleniya pervichnykh i obobshchennykh vtorichnykh parametrov odnorodnogo uchastka trekhprovodnoi linii elektroperedachi metodom vos'mipolyusnika [The method of determining the primary and generalized secondary parameters of a homogeneous section of a three-wire transmission line by the method of an eight-terminal network]. Patent RF 2522829 MPK G 01 R 27/02. Applicant and patent holder is Bratsk state university. No.2013101260/28; pending 10.01.2013; publ. 20.07.2014.

### Информация об авторах

### Authors

Большанин Георгий Анатольевич – к. т. н., доцент, Братский государственный университет, г. Братск, e-mail: bolshaning@mail.ru

Georgii Anatol'evich Bol'shanin – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Prof. of the Subdepartment of Electric Power Engineering and Electric Engineering, Bratsk State University, Bratsk, e-mail: bolshaning@mail.ru

### Для цитирования

### For citation

Большанин Г.А. Оптимизация передачи электрической энергии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. – Т. 61, № 1. – С. 19–28. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).19–28

Bol'shanin G.A. Optimizatsiya peredachi elektricheskoi energii [Optimization of transfer of electric energy]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 19–28, DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).19–28

УДК 519.6:311

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).28–34

Ю. М. Краковский<sup>1</sup>, Н. А. Хоанг<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 14 ноября 2018 г.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПО ДАННЫМ МАЛОГО ОБЪЕМА

**Аннотация.** При эксплуатации любого сложного технологического оборудования происходит воздействие на него различных случайных факторов. Это, в свою очередь, приводит к нарушению производственных процессов, участником которых является это оборудование. Учитывая случайный характер воздействий, влияющих на эксплуатируемое оборудование, наработка принимает случайные значения. При этом она описывается функцией распределения или плотностью распределения вероятностей, а также различными числовыми характеристиками, например: дисперсией, среднее квадратическим значением, матожиданием и др. При небольшом объеме экспериментальных данных по наработкам оборудования, что и наблюдается на практике, предлагается построить эмпирическую функцию распределения и, используя результаты имитационного моделирования, оценить показатели надежности по предложенным численным моделям. На практике такими показателями



надежности являются: средний и гамма процентный ресурс; вероятность безотказной работы для ресурса и остаточного ресурса; средний и гамма процентный остаточный ресурс. При этом знание закона распределения генеральной совокупности не требуется. В нашем случае знание закона распределения потребовалось лишь для тестирования численных моделей. Тестирование численных моделей оценки показателей надежности показало их высокую точность при сравнении с показателями надежности, когда наработка имеет закон Вейбулла

**Ключевые слова:** показатели надежности, численные модели, имитационное моделирование, вероятность безотказной работы, оборудование.

Y. M. Krakovsky<sup>1</sup>, N. A. Hoang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russian Federation

Received: November 14, 2018

## NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EQUIPMENT RELIABILITY INDICATORS ACCORDING TO SMALL VOLUME DATA

**Abstract.** During the operation of any complex technological equipment, various random factors affect it. This, in turn, leads to disruption of the production processes, with this equipment as a participant. Considering the random nature of factors influencing the equipment being operated, the operating time is a random variable and is described by a distribution function or probability distribution density, as well as numerical characteristics: variance, root mean square value, mathematical expectation, etc. With a small amount of statistical data on the operating time of the equipment, which is observed in practice, it is proposed to build an empirical distribution function and, using the results of simulation modeling, to evaluate the reliability indicators for the proposed numerical models. Investigated reliability indicators are: probability of failure-free operation; average resource; gamma percentage resource; the probability of failure-free operation of the residual resource; average residual resource; gamma percent residual life. In this case, it is not required to know the distribution law of the general population. In our case, it was required to know the distribution law only for testing numerical models. Testing of numerical models for evaluating reliability indicators showed their high accuracy when compared with reliability indicators, when the operating time has a Weibull distribution.

**Keywords** reliability indicators, numerical models, simulation modeling, probability of failure-free operation, equipment.

### Введение

При эксплуатации любого сложного технологического оборудования происходит воздействие на него различных случайных факторов. Это, в свою очередь, приводит к нарушению производственных процессов, участником которых является это оборудование.

В связи с этим ведутся постоянные исследования показателей надежности технологического оборудования различного назначения в зависимости от технологий его технического обслуживания и других влияющих факторов [1, 2].

При исследовании надежности оборудования существенное значение имеет использование методов, современных информационных технологий и программного обеспечения прикладного назначения.

Учитывая вероятностный характер влияющих на эксплуатируемое оборудование факторов, наработка принимает случайные значения и описывается плотностью распределения вероятностей или функцией распределения. Дополнительно используются числовые характеристики в виде дисперсии, математического ожидания, коэффициента вариации и др.

При исследовании показателей надежности сложного технологического оборудования,

проводимого методом имитационного моделирования, необходимо уметь моделировать значения наработок на основе экспериментальных данных небольшого объема. В этом направлении предложены подходы, основанные на эмпирической функции распределения, когда наработка описывается какой-то вероятностной моделью. Возможность применения имитационного моделирования при исследовании показателей надежности сложного оборудования отмечена в различных работах, например [2–4].

Важность исследования вопросов надежности различных объектов подтверждается работами [5–12].

### Математическое описание задачи

В данной задаче предполагается, что в результате специальных испытаний получено  $N$  значений наработок для определенного класса технологического оборудования, число значений не велико. В этом случае эмпирическая функция распределения для наработки оборудования выглядит так [13]

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



В модели (1)  $x_j''$  – узловые значения аргумента при описании функции (1),  $x$  – значение наработки как случайной величины.

Если известна функция распределения (1), то модель вычисления значений искомой величины определяется из уравнения [13, 14]

$$F(x) = r, \tag{2}$$

где  $r$  – значение равномерно распределенной на интервале (0,1) случайной величины.

Решая уравнение (2) с учетом (1), в дальнейшем получается модель для вычисления значений наработки

$$x_i = x_j'' + ((N - 1) \cdot r_i - j + 1)(x_{j+1}'' - x_j''), i = 1, \dots, n, \tag{3}$$

где  $n$  – объем выборки по наработке, которую можно использовать для оценки показателей надежности. Обозначим эту выборку

$$T = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n). \tag{4}$$

Выборка (4) обрабатывается далее специальными численными моделями. Опишем эти модели (минимальное выборочное значение принимаем нулевым, а максимальное  $b$ ).

Исследованию показателей надежности оборудования по данным имитационного моделирования посвящены также работы [15–17].

На первом этапе необходимо разделить весь интервал значений наработки узлами  $x_j$  на  $J$  интервалов с равной длиной

$$\Delta x = b/J; x_j = j \cdot \Delta x, j = \overline{1, J}, x_0 = 0; x_j = b.$$

Обозначим  $n_j$  – число выборочных значений, которые попали в интервал  $(x_{j-1}, x_j)$ ;  $m_j = \sum_{i=1}^j n_i / n$  – суммы относительных частот,  $m_j = 1$ ;

$$k_j = 1 - m_j; j = \overline{1, \dots, J}, k_0 = 1. \tag{5}$$

Далее можно вычислить статистическую вероятность (аналог вероятности безотказной работы), когда функция распределения аппроксимируется «ступеньками»

$$P^c(x) = k_j, x_{j-1} \leq x < x_j, j = \overline{1, J}; \tag{6}$$

$$P^c(0) = k_0 = 1; P^c(x) = 0, x_{j-1} \leq x < x_j.$$

Затем функцию (6) заменим «линейной», как совокупность отрезков, соединяющих точки  $(x_j, k_j)$ . Эта функция (численная вероятность безотказной работы) имеет вид

$$P_r(x) = \begin{cases} 0, & x \geq b \\ k_{j-1} + (x - x_{j-1})(k_j - k_{j-1})J/b, & 0 \leq x < b, \\ 1, & x < 0 \end{cases} \tag{7}$$

где  $x_{j-1} \leq x < x_j, j = \overline{1, J}$ .

Далее найдем численную среднюю наработку из стандартной формулы [2, 3] с последующими преобразованиями

$$\bar{x}_r = \int_0^b P_r(x) dx = \frac{b}{J} (0,5 + \sum_{j=1}^J k_j). \tag{8}$$

Затем найдем численный гамма процентный (ГП) ресурс, используя уравнение с последующими преобразованиями

$$P_r(x) = \gamma \rightarrow x_r(\gamma) = x_{j-1} + \frac{(\gamma - k_{j-1}) \cdot b}{k_j - k_{j-1}}, \tag{9}$$

где  $k_{j-1} \geq \gamma > k_j, j = \overline{1, J}$ , левая часть уравнения является численной вероятностью безотказной работы (7);  $\gamma$  – вероятность, для которой определяется ГП ресурс.

Остаточный ресурс (ОР) оборудования с учетом времени работы определяется по модели

$$Y_z = T - z, \tag{10}$$

где  $T$  – наработка оборудования;  $z$  – время, которое оборудование уже проработало.

Аналогично функции (6) получим вероятность (аналог вероятности безотказной работы для ОР)

$$P_z^c(y) = p_j(i) = k_{j+i} / k_j, p_j(0) = 1, \tag{11}$$

где  $z = j \cdot b / J, j = \overline{1, J_0}, J_0 \leq J - 2; y = i \cdot b / J, i = \overline{0, J - j}$ .

Учитывая (11), далее найдем численную вероятность безотказной работы с учетом ОР

$$P_z^r(y) = \begin{cases} 0, & y \geq b - z \\ p_j(i-1) + (y - x_{i-1})(p_j(i) - p_j(i-1)) \cdot J/b, & 0 \leq y < b - z \\ 1, & y < 0 \end{cases} \tag{12}$$

где  $z = j \cdot b / J$ ;

$$x_{i-1} \leq y < x_i, x_i = i \cdot b / J, i = \overline{1, J - j}.$$

В этом случае, с учетом (12), численный средний ОР будет выглядеть так

$$\tilde{y}_z = \int_0^{b-z} P_z^r(y) dy = \frac{b}{J} \left[ 0,5 + \sum_{i=1}^{J-j} p_j(i) \right]. \tag{13}$$

Численный ГП ОР можно определить из уравнения, аналогично (9), но левая часть этого уравнения равна (12),

$$P_z^r(x) = \gamma \rightarrow \tilde{y}_j(\gamma) = x_{i-1} + \frac{(\gamma - p_j(i-1)) \cdot b}{p_j(i) - p_j(i-1)} \cdot J, \tag{14}$$

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

**Апробация численных показателей надежности оборудования**

В табл. 1 приведены модельные исходные данные по наработке технологического оборудования, единица измерения месяц (мес.).



Т а б л и ц а 1

**Исходные данные по наработке, мес.**

3,494	4,470	6,665	6,667	7,356	8,598
8,844	8,900	9,157	9,342	9,374	9,533
9,815	9,888	10,044	10,340	10,534	10,756
10,859	11,185	11,263	11,653	11,925	12,201
12,646	13,266	14,216	14,827	16,551	20,309

Эти исходные данные рассматриваются как узловые точки для эмпирической функции распределения (1).

Используя расширенный (модифицированный) критерий Колмогорова [2, 13], была проверена гипотеза о том, что эти данные взяты из генеральной совокупности, имеющей закон Вейбулла с параметрами  $\alpha=3,5; \beta=10,6$ .

Функция распределения Вейбулла имеет вид [1, 18]

$$F(x) = 1 - \exp(-(x/\beta)^\alpha), \quad (15)$$

а вероятность безотказной работы

$$P(x) = \exp(-(x/\beta)^\alpha). \quad (16)$$

Согласно критерию Колмогорова определяются значения

$$D_N = \max(D_N^+, D_N^-), \quad (17)$$

где

$$D_N^+ = \max[j/N - F(x_j^u)] \text{ при } 1 \leq j \leq N,$$

$$D_N^- = \max[F(x_j^u) - \frac{j-1}{N}] \text{ при } 1 \leq j \leq N.$$

Здесь  $F(x_j^u)$  – значения функции распределения для закона Вейбулла (15).

Для распределения Вейбулла в литературе рекомендована поправка [13]:

$$D_N^* = D_N \cdot \sqrt{N}. \quad (18)$$

Если величина  $D_N^*$  (18) будет меньше табличного значения, то можно считать, что экспериментальные значения получены из совокупности, имеющей распределение Вейбулла для выбранного уровня значимости.

Для данных табл. 1 величины (16), (17) и (18) равны

$$D_N^+ = \max[j/N - F(x_j^u)] = 0,103;$$

$$D_N^- = \max[F(x_j^u) - \frac{j-1}{N}] = 0,098;$$

$$D_N = \max(D_N^+, D_N^-) = 0,103$$

$$D_N^* = D_N \cdot \sqrt{N} = 0,103 \cdot \sqrt{30} = 0,564.$$

Табличное значение при уровне значимости 0,05 равно 0,847 [13], поэтому гипотеза принимается.

Используя модель (3), была получена выборка (4) объемом 20000. В табл. 2 приведены оценки числовых характеристик и доверительный интервал для математического ожидания  $(x_1, x_2); \bar{x}_u$  – среднее значение наработок в табл. 1.

Т а б л и ц а 2

**Результаты оценок, мес.**

$\bar{x}_u$	$\tilde{x}$	$\tilde{k}_{y,v}$	$x_1$	$x_2$
10,490	10,459	0,280	10,419	10,500

Среднее значение наработок ( $\bar{x}_u$ ) попало в доверительный интервал  $(x_1, x_2)$ , что подтверждает качество моделирования выборки (4).

На рис. 1 представлена гистограмма частот для выборки (4) на 15 интервалах.

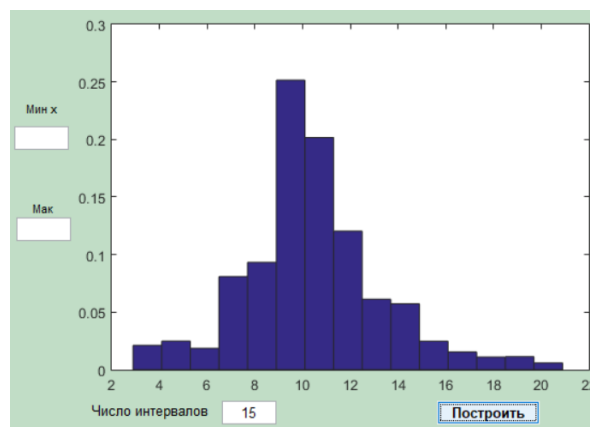


Рис. 1. Гистограмма частот

Была проверена гипотеза по критерию Пирсона (19) о том, что выборка получена из совокупности с функцией Вейбулла [2] при значениях параметров  $\alpha = 4,00; \beta = 11,54$ . Значения этих параметров получены методом моментов, когда в качестве значений математического ожидания и коэффициента вариации приняты их оценки, приведенные в табл. 2.

Критерий Пирсона

$$\chi^2_{\text{набл}} = \sum_{l=1}^L \frac{(n_l - n_{l\text{теор}})^2}{n_{l\text{теор}}}, \quad (19)$$

где  $n_l$  – частоты попадания величины в  $l$ -й интервал;  $L$  – количество интервалов;  $n_{l\text{теор}} = n \cdot p_l$ ;  $p_l$  – вероятность попадания в  $l$ -й интервал, полученная с использованием распределения Вейбулла;  $n$  – объем выборки.

Гипотеза проверялась при уровне значимости 0,05 и подтвердилась, т. к. наблюдаемое значение (19)  $\chi^2_{\text{набл}} = 14,47$  оказалось



меньше табличного  $\chi^2_{кр} = 21,03$  при числе степеней свободы 12.

На рис. 2 приведены численная вероятность безотказной работы (7) (линия 1) и теоретическая вероятность безотказной работы (16) (линия 2). Наблюдается хорошее совпадение.

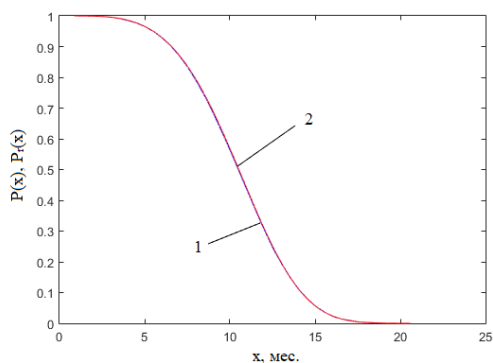


Рис. 2. Численная (1) и теоретическая (2) вероятности безотказной работы

На рис. 3 приведены численная вероятность безотказной работы для ОР (12) (линия 1) и теоретическая вероятность безотказной работы для ОР (линия 2). Наблюдается хорошее совпадение. Модели для вероятности безотказной работы для ОР можно посмотреть в работах [3, 7].

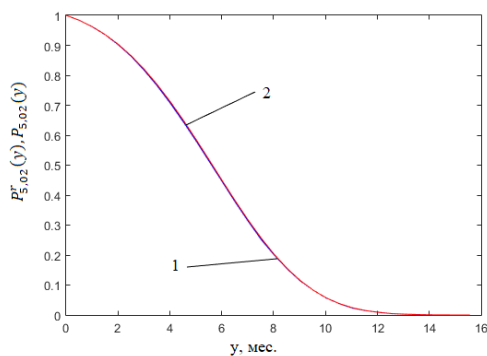


Рис. 3. Численная (1) и теоретическая (2) вероятности безотказной работы для остаточного ресурса

В табл. 3 приведены результаты показателей надежности (Р), полученные по численным моделям (Ч.М.) (8), (9), (13), (14) и их теоретическим аналогам (Т.М.), полученным для распределения Вейбулла: Ср.Н. – средняя наработка; Г.П.Р. – гамма процентный ресурс при вероятности  $\gamma = 0,9$ ; Ср.О.Р. – средний остаточный ресурс; Г.П.О.Р. – гамма процентный остаточный ресурс при вероятности  $\gamma = 0,9$ .

При определении остаточного ресурса величина  $z = 5,02$ , для этого значения в моделях (13) и (14)  $j = 9, J = 40$ .

Таблица 3

Значения показателей надежности, мес.

№	Р	Ч.М.	Т.М.
1	Ср.Н.	10,466	10,441
2	Г.П.Р.	6,701	6,571
3	Ср.О.Р.	5,666	5,665
4	Г.П.О.Р.	2,35	2,043

Наблюдается хорошее совпадение значений показателей надежности по теоретическим и численным моделям.

Обратим внимание, что средние наработки и по численной и по теоретической моделям попали в доверительный интервал (табл. 2). Все это подтверждает хорошую точность численных моделей.

### Заключение

При небольшом объеме экспериментальных данных по наработкам оборудования, что и наблюдается на практике, предлагается построить эмпирическую функцию распределения и, используя результаты имитационного моделирования, оценить показатели надежности по описанным численным моделям. При этом знание закона распределения генеральной совокупности не требуется. В нашем случае знание закона распределения потребовалось лишь для тестирования этих моделей. Проведенное тестирование подтвердило хорошую точность численных моделей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход : пер. с нем. М. : Радио и связь, 1988. 392 с.
2. Краковский Ю.М., Каргапольцев С.К., Начигин В.А. Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски. СПб. : ЛИТЕО, 2018. 240 с.
3. Нго З.Д., Краковский Ю.М., Захарова О.А. Численные модели оценки показателей надежности многокомпонентного оборудования по результатам компьютерного моделирования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 66–70.
4. Даваадорж Б., Краковский Ю.М. Нечеткий численный вероятностный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений // Мир Транспорта. 2017. Т.15. № 3 (70). С. 30–39.
5. Артамонов И.В. Программный комплекс анализа надежности бизнес-транзакции // Информационные системы и технологии. 2014. № 5 (85). С. 5–13.



6. Буртаев Ю.Ф. Острейковский В.А. Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации. М. : Энергоатомиздат, 1995. 240 с.
7. Василенко Н.В. Модели оценки надежности программного обеспечения / Н.В. Василенко, В.А. Макаров // Вестн. Новгород. гос. ун-та. 2004. № 28. С. 126–132.
8. Обеспечение надежности сложных систем. / А. Н. Дорохов и др. СПб. : Лань, 2011. 352 с.
9. Игнатущенко В.В. Милков М.Л., Сидоров А.В. Многоверсионное резервирование взаимозависимых параллельных задач для управляющих параллельных вычислительных систем: формализованное описание, оценка отказоустойчивости // Надежность. 2009. № (4) 32. С. 45 – 62.
10. Краковский Ю.М. Начингин В.А., Начингин А.В. Оценка технического состояния рельсов по данным мониторинга пути // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 5 С. 40–43.
11. Чуканов В.О. Надежность программного обеспечения и аппаратных средств систем передачи данных атомных электростанций. М. : Диалог-МИФИ, 2008. 168 с.
12. Уткин Л.В., Уткин В.С. Структурная надежность систем при неполной статистической информации о параметрах модели // Надежность. 2009. № (3) 31. С. 28–36.
13. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб. : Питер, 2004. 847 с.
14. Краковский Ю.М., Калиновский С.Г., Селиванов А.С. Математическое обеспечение моделирования случайной величины при вероятностном анализе безубыточности // Информац. технологии и проблемы математ. моделирования сложных систем. 2009. № 7. С. 137–143.
15. Нго З.Д., Краковский Ю.М. Вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов многокомпонентного оборудования // Вестн. ИрГТУ. 2015. № 10. С. 16–20.
16. Нго З.Д., Краковский Ю.М. Имитационная модель многокомпонентного оборудования для определения закона распределения его наработки // Вестн. ИрГТУ. 2015. № 7. С. 25–32.
17. Нго З.Д. Краковский Ю.М. Численные модели оценки коэффициента оперативной готовности и параметра потока восстановления многокомпонентного оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 55–59.
18. Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Новосибирск : Наука, 2006. 228 с.

## REFERENCES

1. Baikhel't F., Franken P. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskii podkhod. [Reliability and maintenance. Mathematical approach]. Transl. from English. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1988, 392 p. (In Russ.)
2. Krakovskii Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovanie perevozochного protsessа zheleznodorozhnyim transportom: analiz, prognozirovanie, riski [Modeling of the transportation process by rail: analysis, forecasting, risks]. In prof. Krakovskii Yu.M. (ed.). St. Petersburg: «LITEO» Publ., 2018, 240 p.
3. Ngo Z. D., Krakovskii Yu. M., Zakharova O. A. Chislennye modeli otsenki pokazatelei nadezhnosti mnogokomponentnogo oborudovaniya po rezul'tatam komp'yuternogo modelirovaniya [Numerical models for assessing the reliability of multicomponent equipment based on the results of computer simulation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2015. No. 4 (48), pp. 66 – 70.
4. Davaadorzh B., Krakovskii Yu.M. Nechetkii chislennyi veroyatnostnyi analiz dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti rel'sovykh skreplenii [Fuzzy numerical probabilistic analysis for the evaluation of reliability indicators rail fasteners]. *Mir Transporta* [World of Transport], 2017. Vol. 15, No.3 (70), pp. 30-39.
5. Artamonov I. V. Programmyi kompleksa analiza nadezhnosti biznes-tranzaksii [Software package for analyzing the reliability of a business transaction]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies], 2014. No. 5 (85), pp. 5 – 13.
6. Burtayev Yu. F., Ostreykovskii V. A. Statisticheskii analiz nadezhnosti ob'ektov po ogranichennoi informatsii [Statistical analysis of the reliability of objects with limited information]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1995, 240 p.
7. Vasilenko N. V., Makarov V. A. Modeli otsenki nadezhnosti programmnoo obespecheniya [Software reliability assessment models]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Novgorod State University], 2004. No. 28, pp. 126 – 132.
8. Dorokhov A. N., Mironov A. N., Kernozhitskii V. A., Shestopalova O. L. Obespechenie nadezhnosti slozhnykh sistem. [Ensuring the reliability of complex systems]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2011, 352 p.
9. Ignatushchenko V. V., Milkov M.L., Sidorov A.V. Mnogoversionnoe rezervirovanie vzaimozavisimykh parallel'nykh zadach dlya upravlyayushchikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistem: formalizovannoe opisanie, otsenka otkazoustoichivosti [Multi-versioned backup of interdependent parallel tasks for managing parallel computing systems: formalized description, fault tolerance evaluation]. *Nadezhnost'* [Dependability], 2009. No. (4) 32, pp. 45 – 62.
10. Krakovskii Yu. M., Nachigin V. A., Nachigin A. V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya rel'sov po dannym monitoringa puti [Assessment of the technical condition of rails according to the monitoring of the track]. *Vestnik VNIIZhT* [Vniizht Bulletin], 2012. No. 5, pp. 40 – 43.
11. Chukanov V. O. Nadezhnost' programmnoo obespecheniya i apparatnykh sredstv sistem peredachi dannykh atomnykh elektrostantsii [Reliability of software and hardware of data transmission systems of nuclear power plants]. Moscow: Dialog – MIFI Publ., 2008, 168 p.
12. Utkin L. V., Utkin V. S. Strukturnaya nadezhnost' sistem pri nepolnoi statisticheskoi informatsii o parametrah modeli [Structural reliability of systems with incomplete statistical information on model parameters]. *Nadezhnost'* [Dependability], 2009, No. (3) 31, pp. 28 – 36.
13. Kel'ton V., Lou A. Imitatsionnoe modelirovanie [Imitating modeling]. St. Petersburg: Piter Publ., 2004, 847 p.
14. Krakovskii Yu.M., Kalinovskii S.G., Selivanov A.S. Matematicheskoe obespechenie modelirovaniya sluchainoi velichiny pri veroyatnostnom analize bezubytchnosti [Mathematical software for modeling random variables in probabilistic break-even analysis].



*Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh system [Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems]*, 2009. No. 7, pp. 137-143.

15. Ngo Z. D., Krakovskii Yu. M. Vychislitel'nyi algoritm chislennoi otsenki parametra potoka otkazov mnogokomponentnogo oborudovaniya [Computational algorithm for the numerical estimation of the failure flow parameter of multicomponent equipment]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015. No. 10, pp. 16 – 20.

16. Ngo Z. D., Krakovskii Yu. M. Imitatsionnaya model' mnogokomponentnogo oborudovaniya dlya opredeleniya zakona raspredeleniya ego narabotki [Simulation model of multicomponent equipment for determining the law of distribution of its operating time]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015. No. 7, pp. 25 – 32.

17. Ngo Z. D., Krakovskii Yu. M. Chislennyye modeli otsenki koeffitsienta operativnoi gotovnosti i parametra potoka vosstanovleniya mnogokomponentnogo oborudovaniya [Numerical models for estimating the coefficient of operational readiness and the parameter of the restoration flow of multicomponent equipment]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2016. No. 1 (49), pp. 55 – 59.

18. Krakovskii Yu. M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software tools for assessing the technical condition of equipment]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2006, 228 p.

### Информация об авторах

### Authors

Краковский Юрий Мечеславович – д. т. н., профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: 71949267772@yandex.ru

Хоанг Нгок Ань – аспирант, кафедра «Информатика и математическое моделирование», Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, e-mail: hoangngocanhmta@gmail.com

Yuriy Mecheslavovich Krakovskiy – Doctor of Engineering Science, Prof. at the Subdepartment of System of Informatics and Information Protection, Irkutsk State Transport University, e-mail: 71949267772@yandex.ru

Nhok An Hoang – Ph.D. student of the Subdepartment of Informatics and Mathematical Modeling of Ezhevsky Irkutsk State Agricultural University, Irkutsk, e-mail: hoangngocanhmta@gmail.com

### Для цитирования

### For citation

Краковский Ю. М. Численное исследование показателей надежности оборудования по данным малого объема / Ю. М. Краковский, Н. А. Хоанг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 28–34. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).28–34

Kravovskiy Yu. M., Hoang N. A Chislennoye issledovaniye pokazateley nadezhnosti oborudovaniya po dannym malogo ob'yema [Numerical study of equipment reliability indicators according to small volume data] *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 28–34. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).28–34