

УДК 347.823.21

DOI 10.51955/2312-1327_2023_2_6

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОЯВЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ И НЕСЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ

*Николай Сергеевич Херсонский,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
кандидат технических наук,
генеральный директор ООО «СОЮЗСЕРТ»,
ул. Викторенко, д. 7, корпус 30
Москва, 125167, Россия
hersn@yandex.ru*

*Людмила Геннадьевна Большедворская,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
доктор технических наук, профессор кафедры БПиЖД
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, д. 20
Москва, 125993, Россия
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Аннотация. Основным мотивом для проведения этого исследования явилась необходимость предметно рассмотреть изменение работоспособности оборудования в зависимости от проявления факторов случайного и неслучайного характера. Полученные результаты позволят обеспечить решение частных задач, обусловленных необходимостью оценки живучести оборудования, вероятности срока его службы или радикальной замены.

Ключевые слова: моделирование, живучесть, работоспособность оборудования, замена оборудования.

ASSESSMENT OF EQUIPMENT PERFORMABILITY DEPENDING ON THE MANIFESTATION OF RANDOM AND NON-RANDOM FACTORS

*Nikolai S. Khersonsky,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
Candidate of Technical Sciences,
General Director of SOYUZCERT LLC,
7, building 30, Viktorenko St.
Moscow, 125167, Russia
hersn@yandex.ru*

*Ludmila G. Bolshedvorskaya,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
Doctor of Technical Sciences
Professor of the Department of Flight Safety and Vital Activity
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronstadtsky boulevard, 20
Moscow, 125993, Russia
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Abstract. The main motive for conducting the study was the need to consider in detail the change in equipment performability depending on the manifestation of random and non-random factors. The results obtained will make it possible to solve particular problems conditioned by the need to assess the survivability of equipment, the likelihood of its service life or radical replacement.

Key words: simulation, survivability, equipment performability, equipment replacement

Введение

Работоспособность оборудования – это состояние оборудования, при котором оно способно выполнять свои функции, сохраняя параметры точности, стабильности, производительности в пределах, установленных нормативно-технической документацией, что определяет качество выпускаемой продукции. Однако, под влиянием процессов естественного износа по истечении времени или возникновении чрезвычайных ситуаций в оборудовании происходят процессы, приводящие к негативному изменению данных параметров, т.е. к потере его работоспособности и живучести [Давенпорт и др., 1960; Компьютерное моделирование..., 2017]. Естественно, это влечет за собой снижение качества и безопасности продукции или услуг.

Нарушения работоспособности оборудования, вызванные разными причинами, нередко приводят к отказам, которые подразделяются на два основных вида – внезапные и постепенные [Гнеденко 1954; Крамер 1987; Кушнаренок и др. 2007; Маленко, 2011]. Внезапные отказы возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов, превышающих возможности эксплуатируемого оборудования, и носят случайный характер. Возникновение внезапного отказа не связано с естественным износом оборудования. В результате естественного износа и усталости оборудования происходят постепенные накопления его необратимых изменений [Довженок и др., 2008; Лепихин и др., 2012]. Поэтому оценка работоспособности оборудования в зависимости от возникновения случайных и неслучайных факторов является одной из актуальных задач.

На этом основании вектор исследования направлен на разработку вероятностной модели живучести оборудования, позволяющей определять продолжительность срока его службы и возможности его продления, а также оценку вероятности радикальной замены оборудования.

Методы и результаты

В предшествующих данной работе исследованиях основное внимание было уделено оценке состояния оборудования [Херсонский и др., 2022] посредством применимости методов описательной статистики, позволяющих осуществлять планирование экспериментов, проводить выборочный контроль и анализ точности измерений, определять статистическое установление допуска с целью контроля процессов создания продукции и др. Для оценки работоспособности оборудования под влиянием различных факторов статистических показателей недостаточно, так как процесс изменения работоспособности оборудования носит случайный характер и не исключает применимость вероятностных моделей [Рейзмунт и др., 2021; Зырянов и др.,

2021]. В связи с этим методическую базу данного исследования составили вероятностные методы, аддитивные и минимаксные показатели.

Результаты

Для оценки последствий случайного износа и потенциальной продолжительности службы оборудования в работе разработана модель (функция живучести), основу которой составляют показатели, обобщенные по двум признакам [Бахвалов и др., 2020; Бухтояров и др., 2021]. По первому признаку показатели были разделены на две группы: показатели, используемые для оценки работоспособности по состоянию системы, и показатели по результатам выполнения заданных функций. Показатели первой группы оценивают свойство системы сохранять работоспособность после неблагоприятных воздействий. Показатели второй группы оценивают способность не только противостоять неблагоприятным воздействиям, но и в дальнейшем, несмотря на эти воздействия, успешно выполнить установленное задание. Кроме этого, по второму признаку показатели подразделяются на аддитивные и минимаксные. Они отличаются друг от друга по способу сведения векторного показателя к скалярному. К числу аддитивных отнесены вероятностные показатели, основанные на формуле полной вероятности.

Предположим, что замена действующего оборудования производится по мере возникновения поломки, ограничивающей его дальнейшую эксплуатацию. Необходимо определить вероятность наступления события и возможную продолжительность срока службы (живучести) оборудования.

Обозначим функцией живучести оборудования функцию $v(t)$, определяемую как вероятность продолжительности срока его службы, превышающего время t :

$$P\{T \geq t\} = v(t) \quad (1)$$

Тогда вероятность продолжительности службы оборудования, не превышающего время t , можно представить:

$$F(t) = P\{T < t\} = 1 - v(t) \quad (2)$$

Обозначив через $f(t)$ плотность распределения вероятностей случайной величины, можно записать:

$$P\{t \leq T < t + dt\} = f(t)dt \quad (3)$$

Функции $F(t)$, $f(t)$, и $v(t)$ связаны между собой соотношением:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - v(t) \quad (4)$$

Назовем $\lambda(t)dt$ условной вероятностью того, что оборудование, безотказно проработавшее до возраста t лет, отказало в интервале $t + dt$.

Можно записать, что:

$$\begin{aligned} P\{t < T < t + dt\} &= P\{T \geq t\}\lambda(t)dt, \\ P\{t < T < t + dt\} &= f(t)dt = -v'(t)dt, \\ P\{t \geq T\} &= v(t)dt \end{aligned} \quad (5)$$

Откуда:

$$\lambda(t) = \frac{v'(t)}{v(t)} \quad (6)$$

Функция $\lambda(t)$ может быть монотонно возрастающей. Она характеризует плотность вероятностей отказов оборудования, но имеет ряд ограничений для оценки наступления события. В связи с этим в работе рассмотрено несколько вариантов.

По первому варианту предположим, что плотность отказов постоянна $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const.}$ Тогда:

$$\frac{v'(t)}{v(t)} = -\lambda_0 \quad \text{и} \quad \frac{dv}{dt} + \lambda_0 v = 0 \quad \text{при} \quad v_0 = 1 \quad (7)$$

Решением этого дифференциального уравнения будет функция $v(t) = e^{-\lambda_0 t}$.

Таким образом, при постоянной плотности отказов кривая живучести является экспонентой.

По второму варианту предположим, что плотность отказов пропорциональна времени $\lambda(t) = \lambda_0 t$.

Тогда решением дифференциального уравнения $\frac{dv}{dt} + \lambda_0 t v = 0$ при $v_0 = 1$ будет $v = e^{-\frac{1}{2}\lambda_0 t^2}$.

Следовательно, при пропорционально возрастающей во времени плотности отказов кривая живучести имеет форму колокола.

Для определения среднего значения и стандартного отклонения случайной величины T (срока службы оборудования) используем следующую модель:

$$\bar{t} = \int_0^\infty t f(t) dt = - \int_0^\infty t dv = -tv \Big|_0^\infty + \int_0^\infty v dt = \int_0^\infty v dt \quad (8)$$

Для реальных случаев $\lim_{t \rightarrow \infty} t v(t) = 0$ получим среднее время службы оборудования:

$$\bar{t} = \int_0^\infty v(t) dt \quad (9)$$

После соответствующих преобразований получим дисперсию срока службы оборудования:

$$D(T) = 2 \int_0^\infty t v(t) dt - \bar{t}^2, \quad (10)$$

и стандартное отклонение (среднее квадратическое отклонение):

$$\sigma(T) = \sqrt{2 \int_0^\infty t v(t) dt - \bar{t}^2} \quad (11)$$

Формулы (9) и (11) определяют средний срок службы оборудования и стандартное отклонение через функцию живучести. Для оценки живучести оборудования в зависимости от продолжительности срока его службы, превышающего время t , рассмотрим два возможных варианта.

Предположим, что $\nu(t)$ – экспонента, т.е. $\nu(t) = e^{-\lambda_0 t}$ (λ_0 – параметр экспоненты).

Тогда средний срок службы оборудования после соответствующих преобразований будет вычисляться по формуле:

$$\bar{t} = \int_0^{\theta} e^{-\lambda_0 t} dt = \frac{1 - e^{-\lambda_0 \theta}}{\lambda_0} = \frac{1 - q}{\lambda_0} \quad (12)$$

где $q = e^{-\lambda_0 \theta}$.

Дисперсия и стандартное отклонение будет вычисляться по следующим формулам:

$$\sigma^2(t) = -\frac{2\theta}{\lambda_0} q - \frac{2}{\lambda_0^2} q + \frac{2}{\lambda_0^2} - \left(\frac{1-q}{\lambda_0} \right)^2 \quad (13)$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{\lambda_0} \sqrt{1 - 2q\theta\lambda_0 - q^2} \quad (14)$$

Таким образом, разработанная вероятностная математическая модель позволяет определить средний срок службы оборудования и стандартное отклонение через функцию живучести в зависимости от продолжительности срока его службы, превышающего время t .

Снижение живучести оборудования может создать предпосылки для его замены¹ [Бартлетт, 1990]. На этом фоне возникает задача определения вероятностей отсутствия замен или замен оборудования в зависимости от интервала времени.

Вероятность отсутствия замен $p_0(t)$ будет равна $\nu(t)$:

$$p_0(t) = \nu(t) \quad (15)$$

Допустим, что в интервале времени $(0, t)$ произведена только одна замена в момент времени u . Обозначим вероятность того, что произошел один отказ (или достигнут предел функционирования) в интервале от u до $u+du$ через $f(u)du$ или $d\nu(u)$, а вероятность того, что оборудование, замененное в момент u , работает безотказно в интервале (u, t) через $\nu(t-u)$. Тогда вероятность реализации обоих событий будет равна произведению:

$$f(u)du \cdot \nu(t-u) = \nu(t-u) f(u)du = -\nu(t-u) d\nu(u) \quad (16)$$

Чтобы получить $p_1(t)$, остается рассмотреть все возможные случаи отказа первоначально смонтированного оборудования в различные моменты времени u , заключенные между 0 и t , и затем просуммировать соответствующие вероятности:

¹ Болдырев Д. В. Случайные процессы в системах управления: учебное пособие. Изд-во НТИ (филиала) ФГАОУ. ВПО «СКФУ», 2014. 145 с.: ил.

$$p_1(t) = \int_0^t v(t-u)f(u)du = -\int_0^t v(t-u)dv(u) \quad (17)$$

В общем случае существует рекуррентная формула, дающая $p_m(t)$ в зависимости от $p_{m-1}(t)$.

Таким образом:

$$p_m(t) = \int_0^t p_{m-1}(t-u)f(u)du = -\int_0^t p_{m-1}(t-u)dv(u) \quad (18)$$

при $p_0(t) = v(t)$.

Опустим подробный вывод соотношений.

Среднее значение и стандартное отклонение расхода оборудования в интервале $(0, t)$ пропорциональны t .

Вычислим функцию распределения вероятностей $P\{\xi \leq m\}$, если в интервале $(0, t)$ произойдет не больше m замен оборудования.

$$P\{\xi \leq m\} = \sum_{i=0}^m p_i(t) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P\{\xi \leq m\} &= \sum_{i=0}^m p_i(\zeta) = V[1 + (1-V) + (1-V)^2 + \dots + (1-V)^m] = \\ &= V \frac{1 + (1-V)^{m+1} - 1}{1 - (1-V)} = 1 - (1-V)^{m+1} \end{aligned} \quad (20)$$

отсюда:

$$P\{\xi > m\} = 1 - (1-V)^{m+1} \quad (21)$$

В случае, когда $v(t)$ изменяется по экспоненте, получим:

$$P\{\xi > m\} = \left(1 - \frac{\zeta}{\zeta + \lambda_0}\right)^{m+1} \frac{\zeta^{m+1}}{(\zeta + \lambda_0)^{m+1}} \quad (22)$$

Обратное преобразование Лапласа дает:

$$P\{\xi > m\} = \frac{1}{m!} \int_0^{\lambda_0 t} e^{-u} u^m du \quad (23)$$

Где: параметр λ_0 называется плотностью расхода оборудования.

Интеграл в правой части выражения (23) представляет собой Г-функцию, для которой существуют специальные таблицы.

Значение вероятности, определенное по формуле (23), определяет вероятность того, что во временном интервале $(0, t)$ произойдет не больше m замен оборудования.

Заключение

Предметное рассмотрение изменения работоспособности оборудования в зависимости от проявления факторов случайного и неслучайного характера позволили получить результаты для решения частных задач, обусловленных необходимостью оценки живучести оборудования, вероятности срока его службы или радикальной замены.

1. Разработана вероятностная математическая модель функции живучести оборудования, определяемая как вероятность продолжительности срока его службы, превышающего определенное время, установленное нормативной документацией.

Представленная вероятностная математическая модель позволяет определить средний срок службы оборудования и стандартное отклонение через функцию живучести.

2. Разработана вероятностная математическая модель, позволяющая определить вероятность события $p_m(t)$ того, что в интервале от 0 до t произойдет не больше m замен оборудования.

Для расхода m единиц оборудования в интервале $(0, t)$ необходимо и достаточно, чтобы была произведена одна замена в произвольный момент u между 0 и t , а затем между u и t было израсходовано $m-1$ единиц оборудования.

Библиографический список

- Бартлетт М. С. Введение в теорию случайных процессов. М.: Высшая школа, 1990. 376 с.
- Бахвалов Н. С. Численные методы. Т.1 / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. М.: Лаборатория знаний, 2020. 636 с.
- Бухтояров В. В. Формирование показателя живучести оборудования в технологических системах нефтегазового комплекса / В. В. Бухтояров, Д. К. Зырянов, А. Е. Сеницкая // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 10. С. 18-21. EDN BVZPQO
- Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М.: Гостехиздат, 1954. 447 с.
- Давенпорт В. Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов / В. Б. Давенпорт, В. Л. Рут. Изд-во иностранной литературы. М., 1960. 470 с.
- Довженко А. С. Оценка эффективности системы обеспечения работоспособности горного оборудования для принятия управленческих решений / А. С. Довженко, О. А. Лапаева, В. А. Хажиев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 5. С. 300-304. EDN KWRVOP.
- Зырянов Д. К. Прогнозирование комплексного показателя оценки надежности технологического оборудования / Д. К. Зырянов, В. В. Бухтояров, А. Е. Сеницкая // Перспективы науки. 2021. № 11(146). С. 12-15. EDN HXCXNV
- Краммер Г. Математические методы статистики. М.: Изд-во МГУ, 1987. 264 с.
- Кушнаренко В. М. Оценка и прогнозирование работоспособности металлов и сплавов оборудования, работающего в условиях воздействия коррозионных сред / В. М. Кушнаренко, А. П. Фот // Вестник Оренбургского государственного университета. 2007. № 1(64). С. 134-140. EDN JVGRBP.
- Лепихин А. М. Методические аспекты расчетов прочности, ресурса и живучести конструкций машин и оборудования критически / А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, Н. А. Чернякова // В сборнике: Безопасность и живучесть технических систем. Труды IV Всероссийской конференции. 2012. Том 1. С. 159-164. EDN VVDYOB
- Компьютерное моделирование станочного оборудования для оценки его работоспособности / А. В. Липов, Г. С. Большаков, П. Г. Павловский, Р. И. Мамин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 4(24). С. 143-154. EDN YNONZS.
- Маленко П. И. Оценка способов управления работоспособностью трущихся поверхностей деталей технологического оборудования // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2011. № 14. С. 59-62. EDN TEXDUP
- Рейзмунт Е. М. Информационно-аналитические средства оценки конструкционной живучести и безопасности технического оборудования / Е. М. Рейзмунт, С. В. Доронин, Е. В. Москвичев // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. № 4. С. 50-61. DOI 10.17804/2410-9908.2021.4.050-061. EDN KWXYRM.

Херсонский Н. С. Управление процессом оценки несоответствующей продукции на основе применения статистических методов / Н. С. Херсонский, Л. Г. Большедворская // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2022. № 3. С. 33-47. DOI 10.51955/2312-1327_2022_3_33. – EDN MOJSCO.

References

- Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. M. (2020). Numerical methods. V.1. Moscow: *Laboratoriya znaniy*. 2020. 636 p. (in Russian)
- Bartlett M. S. (1990). Introduction into the theory of random processes. Moscow: *Vyssshaya shkola*. 1990. 376 p. (in Russian)
- Bukhtoyarov V. V., Zyryanov D. K., Sinitskaya A. Ye. (2021). Formation of the equipment survivability index in the oil and gas technological systems. *Scientific and technical bulletin of the Volga region*. 10: 18-21. EDN BVZPQO (in Russian)
- Davenport V. B., Rut V. L. (1960). Introduction into the theory of random signals and noises. Moscow: *Izdatelstvovo inostrannoy literatury*. 1960. 470 p. (in Russian)
- Dovzhenok A. S., Lapayeva O. A., Khazhiyev V. A. (2008). Assessment of efficiency of the system for ensuring the operability of mining equipment for management decision-making. *Mining informational and analytical bulletin*. 5: 300-304. EDN KWRVOP. (in Russian)
- Gnedenko B. V. (1954). Course of probability theory. Moscow: *Gostekhizdat*. 1954. 447 p. (in Russian)
- Khersonsky N. S., Bolshedvorskaya L. G. (2022). Management of the evaluation process of nonconforming products based on the use of statistical methods. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 3: 33-47. DOI 10.51955/2312-1327_2022_3_33. – EDN MOJSCO. (in Russian)
- Kramer G. (1987). Mathematical methods of statistics. Moscow: *Izdatelstvovo MSU*. 1987. 264 p.
- Kushnarenko V. M., Fot A. P. (2007). Assessment and prediction of the operability of metals and alloys in equipment operating under the action of corrosive environments. *Orenburg State University Bulletin*. 1(64): 134-140. EDN JVGRBP. (in Russian)
- Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Chernyakov N. A. (2012). Methodical aspects of calculations of strength, resource and survivability of structures of machines and equipment critically. *In the collection: Safety and survivability of technical systems. Proceedings of the IV All-Russian Conference*. 1: 159-164. EDN VVDYOB (in Russian).
- Lipov A. V., Bolshakov G. S., Pavlovsky P. G., Mamin R. I. (2017). Computer modeling of machine tools to assess its performance. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 4(24): 143-154. EDN YNONZS.
- Malenko P. I. (2011). Evaluation of ways to control the operability of the friction surfaces of technological equipment parts. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinosroyenii*. 14: 59–62. EDN TEXDUP (in Russian)
- Reyzmunt Ye. M., Doronin S. V., Moskvichev Ye. V. (2021). Information and analytical tools for assessing the structural survivability and safety of technological equipment. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 4: 50–61. DOI 10.17804/2410-9908.2021.4.050-061. EDN KWXYRM. (in Russian)
- Zyryanov D. K., Bukhtoyarov V. V., Sinitskaya A. Ye. (2021). Forecasting of a complex indicator for assessing the reliability of technological equipment. *Perspektivy nauki*. 11(146): 12-15. EDN HXCXNV (in Russian)