

Методический подход к оценке надежности циклически применяемых сложных технических систем

Methodological Approach to Assessment of Reliability of Cyclically Applied Complex Technical Systems

УДК 62-1

Анисимов В.Г.

Д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Санкт-Петербургского Политехнического университета им. Петра Великого
e-mail: an-33@yandex.ru

Anisimov V.G.

Doctor of Engineering, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, professor at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
e-mail: an-33@yandex.ru

Анисимов Е.Г.,

д-р техн. наук, д-р военных наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Российского университета дружбы народов,
e-mail: anis.an-33@rambler.ru

Anisimov E.G.

Doctor of Engineering, professor, Doctor of Military Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Peoples' Friendship University of Russia,
e-mail: anis.an-33@rambler.ru

Ковальчук А.М.

доцент, ФГКУ «ГНИИМЦ ПВ»
e-mail: kovalchuk.A1973@yandex.ru

Kovalchuk A.M.

Associate Professor, FGKU "GNIIMTS PV"
e-mail: kovalchuk.A1973@yandex.ru

Романюта А.Е.

начальник «ФГКУ ГНИИМЦ ПВ»

Romanyuta A.E.

head "FGKU GNIIMTS PV"

Аннотация

Сложность современных технических систем и существенные потери при нарушении их функционирования вследствие отказов обуславливают высокие требования к надежности элементов и систем в целом. Обеспечение необходимой надежности опирается на ее оценку. Вместе с тем оценка надежности существенно затруднена вследствие невозможности реализации больших объемов натурных испытаний таких систем. Это

обуславливает необходимость разработки подходов, обеспечивающих оценку надежности в условиях их ограниченных объемов. В разработке одного из таких подходов состоит цель настоящей статьи. В основу подхода положено представление результатов натурального эксперимента в виде малой выборки из генеральной совокупности значений случайной величины количества циклов безотказной работы оцениваемой технической системы. Функция распределения этой величины является моделью эксперимента и обеспечивает оценку надежности технической системы. Построение функции распределения опирается на принцип максимума неопределенности.

Ключевые слова: сложная техническая система, надежность, натуральный эксперимент, оценка, методический подход.

Abstract

The complexity of modern technical systems and significant losses in case of disruption of their functioning due to failures determine high requirements for the reliability of elements and systems as a whole. Ensuring the required reliability is based on its assessment. At the same time, the reliability assessment is significantly complicated due to the impossibility of realizing large volumes of full-scale tests of such systems. This necessitates the development of approaches that provide an assessment of reliability in conditions of their limited volumes. The purpose of this article is to develop one such approach. The approach is based on the presentation of the results of a full-scale experiment in the form of a small sample from the general set of values of a random variable of the number of cycles of failure-free operation of the evaluated technical system. The distribution function of this quantity is an experimental model and provides an assessment of the reliability of a technical system. The construction of the distribution function is based on the principle of maximum uncertainty.

Keywords: complex technical system, reliability, field experiment, assessment, methodological approach.

Введение

Характерной особенностью современного этапа развития технических систем является возрастание сложности и обусловленное им возрастание экономических и других потерь в случае нарушения функционирования систем вследствие отказов их элементов [1–7]. Это обостряет проблему обеспечения надежности таких систем. Ее решение опирается на оценку надежности.

Объективным источником информации, обеспечивающим оценку надежности технических систем, является натуральный эксперимент. При этом моделью исхода эксперимента является случайная величина X , характеризующая работоспособность технической системы [8–13]. Для циклически применяемых технических систем в качестве значений величины X может приниматься количество циклов безотказной работы [14, 15]. Следовательно, рассматриваемая случайная величина X является дискретной и может принимать значения $\{0, 1, 2, \dots\}$. Поэтому распределение величины X задается указанием вероятности того, что она примет значение x из множества $\{0, 1, 2, \dots\}$, т.е.

$$P(x) = P(X = x), \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (1).$$

Функция (1) в указанном контексте является моделью натурального эксперимента по оценке надежности циклически применяемых технических систем. Она содержит всю информацию о случайной величине X и, следовательно, является моделью оценки надежности циклически применяемых сложных технических систем.

Особенность оценивания надежности для большинства сложных технических систем рассматриваемого вида состоит в ограниченности их количества и, следовательно, в ограниченности объема выборки случайной величины X [16–20]. Поэтому возникает задача построения функции (1) по малой выборке. Формирование методического подхода к ее построению составляет цель настоящей статьи.

Формализованное представление подхода

В основу решения задачи построения функции (1) по малой выборке может быть положен принцип максимума неопределенности [21–25]. Его суть состоит в том, что из всех возможных вариантов представления функции (1) выбирается вариант, обладающий максимальной неопределенностью при учете всей имеющейся объективной информации о результатах натуральных экспериментов. Тем самым выбранный вариант минимизирует «домыслы» при оценке надежности циклически применяемых технических систем.

Если в качестве меры неопределенности распределения вероятностей дискретной случайной величины X принять энтропию Шеннона, а имеющаяся объективная информация исчерпывается знанием среднего количества \bar{x} циклов безотказной работы, то построение функции (1) обеспечивается решением следующей экстремальной задачи [26–28]:

$$H = -\sum_{x=0}^{\infty} P(x) \ln P(x) \xrightarrow{P(x)} \max \quad (2);$$

$$\sum_{x=0}^{\infty} P(x) = 1 \quad (3);$$

$$\bar{x} = \sum_x xP(x) \quad (4).$$

Ее решение может быть получено методом Лагранжа [29, 30]. Для его применения введем неопределенные множители A_1 , A_2 и исследуем на экстремум по $P(x)$ функцию Лагранжа

$$L = -\sum_{x=0}^{\infty} P(x) \ln P(x) + A_1 [1 - \sum_{x=0}^{\infty} P(x)] + A_2 [\bar{x} - \sum_{x=0}^{\infty} xP(x)] \quad (5).$$

Необходимым условием экстремума функции является равенство нулю ее первой производной. Следовательно, с учетом (5) получим:

$$\frac{dL}{dP(x)} = -\ln P(x) - 1 - A_1 - A_2 x = 0 \quad (6).$$

Из (6) непосредственно следует, что

$$P(x) = e^{-1-A_1-A_2x} \quad (7).$$

Введя обозначение

$$P_0 = e^{-1-A_1} \quad (8),$$

соотношение (7) представим в виде

$$P(x) = P_0 e^{-A_2x} \quad (9).$$

Полученное соотношение (9) содержит неизвестные параметры P_0 и A_2 . Для их определения воспользуемся ограничениями (3), (4), накладываемыми на функцию распределения случайной величины X . С учетом (7) соотношения (3), (4) принимают вид

$$\sum_{x=0}^{\infty} P_0 e^{-A_2x} = 1 \quad (10);$$

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^{\infty} xP_0 e^{-A_2x} \quad (11).$$

Левая часть соотношения (10) представляет собой сумму убывающей геометрической прогрессии. С учетом этого соотношение (10) можно представить в виде

$$P_0 \frac{1}{1 - e^{-A_2}} = 1 \quad (12).$$

Правая часть соотношения (11) представляет собой сумму арифметико-геометрической прогрессии. Следовательно, соотношение (11) можно представить в виде

$$\bar{x} = \frac{P_0 e^{-A_2}}{(1 - e^{-A_2})^2} \quad (13).$$

Из соотношений (12) и (13) следует, что

$$P_0 = \frac{1}{\bar{x} + 1} \quad (14);$$

$$A_2 = \ln\left(\frac{\bar{x} + 1}{\bar{x}}\right) \quad (15).$$

Подставив (14), (15) в (9), получим

$$P(x) = \frac{1}{\bar{x} + 1} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x} + 1}\right)^x \quad (16).$$

Следовательно, случайная величина X количества циклов безотказной работы технической системы подчиняется геометрическому распределению [31, 32]:

$$P(x) = p(1 - p)^x \quad (17)$$

с параметром

$$p = \frac{1}{1 + \bar{x}} \quad (18).$$

Вероятность же того, что количество циклов безотказной работы превысит величину x_i ($x_i=0, 2, \dots$), определяется соотношением

$$Q(x_i) = 1 - \sum_{x=0}^{x_i} P(x) \quad (19).$$

Распределения (17), (19) являются сформированной на основе малой выборки моделями натурального эксперимента по оценке надежности циклически применяемых технических систем.

Заключение

Модели (17), (19) в максимальной степени учитывает полученную в результате эксперимента объективную информацию о надежности технической системы. Точность этих моделей определяется степенью соответствия измеряемого в ходе натурального эксперимента среднего количества \bar{x} циклов безотказной работы математическому ожиданию случайной величины X . Она возрастает по мере увеличения объема выборки из генеральной совокупности значений случайной величины X возможных исходов натурального эксперимента по оценке надежности технической системы.

Литература

1. Сауренко Т.Н. Модели оценки эколого-экономических последствий техногенных аварий на промышленных объектах // Экономические стратегии ЕАЭС: проблемы и инновации: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. Москва, 2021. – С. 126-140.
2. Сауренко Т.Н. Математические модели прогнозирования экологической угрозы техногенных аварий и катастроф в составе интегрированных систем безопасности региона / Т.Н. Сауренко [и др.] // Технологии гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16. – № 3 (61). – С. 62-67.
3. Анисимов В.Г. Эффективность обеспечения живучести подсистемы управления сложной организационно-технической системы // Телекоммуникации. – 2020. – № 11. – С. 41–47.
4. Маслаков М.Д., Черных А.К. К вопросу о формировании решений в интересах снижения ущерба от чрезвычайных ситуаций на транспортной сети // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2014. – № 2 (30). – С. 57-60.

5. *Астанков А.А.* О прогнозировании эффективности применения инновационных технических решений и технологий в интересах обеспечения безопасности на транспорте // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2015. – № 3. – С. 25-31.
6. *Вилков В.Б.* К вопросу о надёжности транспортной сети в условиях чрезвычайной ситуации // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 11-12 (113-114). – С. 88-93.
7. *Белов А.С., Трахинин Е.Л.* Моделирование возможных последствий внешних информационных воздействий на распределенную сеть связи // Телекоммуникации. – 2020. – № 12. – С. 32-38.
8. *Anisimov V.G.* A risk-oriented approach to the control arrangement of security protection subsystems of information systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2016. – 50(8). – С. 717-721.
9. *Зегжда П.Д.* Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2018. – № 1. – С. 43-47.
10. *Кокунин Ю.В.* Моделирование системы управления направляющими аппаратами компрессора для двигателя вертолета // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – № 3-4 (93-94). – С. 35-39.
11. *Анисимов Е.Г.* Показатели эффективности межведомственного информационного взаимодействия при управлении обороной государства // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – № 7-8 (97-98). – С. 12-16.
12. *Гасюк Д.П., Белов А.С., Трахинин Е.Л.* Научно-методический подход по оцениванию живучести компьютерных систем в условиях внешних специальных программно-технических воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2018. – № 4. – С. 86-90.
13. *Трифонов И.В., Черных А.К.* К вопросу об оценке рисков разрушения объектов транспортной сети в результате чрезвычайной ситуации // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 4 (28). – С. 26-29.
14. *Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А.* Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – № 648. С. 6-12
15. *Губенко А.В., Сазыкин А.М.* Теоретические основы создания систем поддержки принятия решений в интересах комплексной транспортной безопасности // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2015. – № 3 (88). – С. 10-15.
16. *Тебекин А.В.* Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ // Журнал исследований по управлению. – 2018. – Т. 4. – № 11. – С. 30-38.
17. *Гарькушев А.Ю.* Методика оценки показателей качества информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 3. – С. 56-61.
18. *Тебекин А.В.* Модель сравнительной оценки инновационных проектов по совокупности качественных показателей // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 77-83.
19. *Тебекин А.В.* Методика сравнительной оценки инновационных проектов по совокупности количественных показателей // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 5. С. 84 - 90.

20. Зегжда П.Д. Подход к оцениванию эффективности защиты информации в управляющих системах // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2020. – № 1 (41). – С. 9-16.
21. Jaynes, E. T. Information Theory and Statistical Mechanics // *Phys. Rev.*, 1957. V. 106, p. 620.
22. Jaynes, E. T. Information Theory and Statistical Mechanics II // *Phys. Rev.*, 1957. V. 108, p.171.
23. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Герцев В.Н. Оценивание эффективности системы ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. – 2001. – № 4. – С. 39-46..
24. Тебекин А.В. Модель прогноза стоимости и сроков модернизации промышленных предприятий // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 3. – С. 31-37.
25. Anisimov, V.G., Anisimov, E.G., Saurenko, T.N., Sonkin, M.A. The model and the planning method of volume and variety assessment of innovative products in an industrial enterprise // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 803(1), 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012006.
26. Анисимов В.Г. Методы и модели стандартизации и унификации в управлении развитием военно-технических систем. – Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации; 2004. – 279 с.
27. Zaychenko I. Models for predicting damage due to accidents at energy objects and in energy systems of enterprises / I. Zaychenko [et al.] // *E3S Web of Conferences 2018: International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, (SPbWOSCE 2018)*. 2019. P. 02041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911002041>.
28. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Математические модели и методы в управлении развитием сложных технических систем. – Санкт-Петербург, 2004. – 280 с.
29. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2008. – Т. 2. – С. 317-318.
30. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2007. – Т. 1. – С. 15-18.
31. Анисимов В.Г. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности. – Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; 2006. – 288 с.
32. Черных А.К. Концептуальные вопросы создания информационно-го обеспечения моделей построения и использования транспортных сетей // В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2017. Материалы Международной научно-практической конференции. ФГБУН.- Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук. – 2017. – С. 185-190.