УДК 62-192:519.248

doi: 10.32620/aktt.2019.8.19

О. В. ТОМАШЕВСЬКИЙ, Г. В. СНІЖНОЙ

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ НАДІЙНОСТІ НЕВІДНОВЛЮВАНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ НЕПОВНИХ ДАНИХ

Вивчення надійності технічних систем особливо важливо для систем, відмова в роботі яких пов'язана з небезпекою для життя людей (наприклад, літальних апаратів). Питання визначення показників надійності технічних систем на основі повної інформації про їх роботу вивчено досить добре, але на практиці часто маємо справу з неповними даними. Це пов'язано з тим, що час від початку експлуатації (випробувань) до появи відмови не завжди відомо і дані про відмову можуть бути неповними (цензуrowаними). Використання цензуrowання даних при визначенні показників надійності дозволить отримати більш точні оцінки. Технічні системи в залежності від особливостей відмови можна вважати відновлюваними або невідновлюваними в залежності від особливостей виникнення відмови. Основними показниками надійності невідновлювальних систем є ймовірність безвідмовної роботи (функція надійності), щільність ймовірності появи відмови, середнє напрацювання до відмови, інтенсивність відмов. Визначення функції надійності при неповних даних можна зробити за допомогою модуля Survival Analysis програми STATISTICA. Цей модуль знайшов широке застосування в медичних дослідженнях для оцінки функції виживання, і його можна застосувати при оцінці функції надійності технічних систем. Модуль Survival Analysis містить процедури для визначення аналітичного виду функції надійності (виживання) на основі оцінки відповідності емпіричного розподілу, отриманого за експериментальними даними, з заданим теоретичним розподілом. При проведенні дослідження послідовно перевіряється відповідність наступним розподілам: експоненціальний, Вейбулла, Гомпертца. Параметри розподілу, найбільш близького до емпіричного, визначаються за допомогою методу найменших квадратів. Оцінка відповідності проводиться за допомогою критерію Пірсона. Як приклад, визначення функції надійності при неповних даних розглянуті результати випробувань основного елемента блоків авіоніки - інтегральної мікросхеми. Отримано, що найбільш близьким до емпіричного розподілу часу роботи до відмови буде розподіл Гомпертца.

Ключові слова: надійність технічної системи; функція надійності; неповні дані; програма STATISTICA.

Вступ

Оцінка й забезпечення надійності технічних систем особливо важливо для таких систем відмова в роботі яких пов'язана з небезпекою для життя людей (наприклад, блоків авіоніки, двигунів літальних апаратів). Питання надійності технічних систем розглядалось рядом авторів, наприклад, досить детально висвітлено у [1]. Але, не розглянуто визначення показників надійності для технічних систем при неповних вихідних даних.

На практиці при визначенні показників надійності часто маємо справу з неповними даними. Це пов'язане з тим, що важко спостерігати систему увесь час від початку експлуатації до відмови, тому дані про час відмови можуть бути невідомі. Такі дані називаються неповними або цензуrowаними (censored). Якщо час від моменту початку експлуатації (випробувань) до відмови відомо, то дані називаються повними (complete). В загальному випадку інформацію, щодо відмов складають, як повні, так і

неповні дані.

При визначенні показників надійності, перш за все, необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи (функцію надійності) технічної системи.

Для визначення функції надійності при неповних даних пропонується використати модуль Survival Analysis програми STATISTICA [2], який містить широкий набір методів аналізу цензуrowаних даних.

Мета даної роботи – розробка методики визначення функції надійності невідновлюваних технічних систем при неповних даних.

1. Основні характеристики надійності невідновлюваних технічних систем

До складу будь-якої технічної системи входить велика кількість різних елементів, відмова одного або декількох з них може викликати вихід з ладу всієї системи. Взагалі, технічні системи можуть бути: невідновлювані, для яких працездатність у випа-

дку виникнення відмови, не підлягає відновленню; або відновлювані, працездатність яких може бути відновлена, у тому числі й шляхом заміни.

До невідновлюваних можна віднести, наприклад, напівпровідникові вироби - транзистори, інтегральні мікросхеми. Системи, що складаються з багатьох елементів, наприклад, електронна апаратура, є відновлюваними, оскільки їхні відмови пов'язані з ушкодженнями одного або деяких елементів, які можуть бути замінені.

Але у ряді випадків той самий об'єкт залежно від особливостей відмови можна вважати відновлюваним або невідновлюваним. Наприклад, блоки авіоніки при відмові на аеродромі можуть бути відремонтовані, тобто будуть є невідновлюваними, а їх відмова в умовах польоту може привести до катастрофічного наслідку, тобто відновлення неможливе.

Для невідновлюваних систем показниками безвідмовності (основної складової надійності) є ймовірність безвідмовної роботи, густина ймовірності появи відмови, середня наробка до відмови, інтенсивність відмов [1].

Ймовірність безвідмовної роботи виробу $P(t)$ - це ймовірність того, що при заданих режимах і умовах роботи в заданому інтервалі часу відмова не виникає. Ймовірність $P(t)$ називають функцією надійності. На підставі $P(t)$ можна отримати основні показники безвідмовності, такі як - густину ймовірності (частоту відмов) $f(t)$; інтенсивність відмов $\lambda(t)$; середнє напрацювання до відмови $\bar{t}$

Для визначення показників $\bar{t}$, $\lambda(t)$ необхідно знати функцію $f(t)$, тобто густину функції надійності.

Підбор закону розподілу функції надійності здійснюється на основі співставлення теоретичного розподілу, що пропонується, емпіричному розподілу даних часу напруження до відмови. Якщо визначення закону розподілу при повних вихідних даних - це тривіальна задача, то така задача при неповних даних потребує вирішення.

2. Методика визначення функції надійності при неповних даних

Для визначення аналітичного виду функції надійності при неповних даних пропонується використати модуль Survival Analysis програми STATISTICA [2]. Модуль Survival Analysis містить широкий набір методів аналізу цензуризованих даних і знайшов широке застосування у медичних дослідженнях, також може використовуватися при оцінці функції надійності технічних систем.

Основне завдання, що вирішується в модулі Survival Analysis, полягає в оцінці функції виживаності (або, що теж, функції надійності) по даним, які складають, як повні, так і неповні дані.

Модуль містить процедури для опису часу напруження до відмови (життя досліджуваного об'єкта - технічної системи, людини) і в ньому визначається функція надійності (виживання) та ряд інших статистичних характеристик. Як правило, часи напруження до відмов представляються у вигляді згрупованих даних. Це пояснюється тим, що в багатьох реальних дослідженнях складно оцінити час відмов, однак можна визначити, скільки відмов відбулося або було цензуровано.

Для відкриття модуля Survival Analysis необхідно з меню програми STATISTICA вибрати Statistics → Nonlinear Models → Survival Analysis:

Розглянемо визначення функції надійності при неповних даних на прикладі результатів випробувань основного елемента блоків авіоніки - інтегральної мікросхеми (ІМС). Для дослідження використані результати випробувань ІМС під дією підвищеного теплового і електричного навантаження для прискорення часу відмови. Результати випробувань були введені в таблицю вихідних даних програми STATISTICA. У модулі Survival Analysis відкривається вікно Survival and Failure Time Analysis, де вибирається вкладка Life tables & Distributions.

Результати аналізу відображаються у вікні Life tables & Distributions Results, використовуючи кнопку якого Results for model можна вибрати найбільш підходящий до даних теоретичний розподіл. Найбільше часто використовуються наступні розподіли: експоненціальний, Вейбулла й Гомпертца, функції розподілу яких, відповідно:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \text{ де } \lambda > 0, x \in [0, +\infty);$$

$$W(x) = 1 - e^{-\lambda x^\gamma}, \text{ де } \lambda > 0, \gamma > 0, x \in [0, +\infty);$$

$$G(t) = \exp(-e^{-\beta t}), t = (x - \lambda)/\gamma, \beta = -\ln \ln 2,$$

$$\text{де } \lambda \in (-\infty, +\infty), \gamma > 0, x \in [0, +\infty).$$

Параметри теоретичного розподілу, найбільш близького до емпіричного, визначаються за допомогою звичайного методу найменших квадратів з вагами, рівними $w_i = 1$ (незважені найменші квадрати), і двох методів зважених квадратів $w_i = 1/v_i$, $w_i = n_i \cdot h_i$, де v_i - емпірична дисперсія, n_i , h_i - ширина i -го інтервалу й число відмов на початку i -го інтервалу. Надалі, будемо позначати ці ваги як Weight1, Weight2 і Weight3, відповідно. Таблицю результатів з оцінками параметрів розподілів одержують з допомогою кнопки Parameter Estimates у вікні Life tables & Distributions.

Для дослідження результатів випробувань ІМС послідовно вибирались розподіли - експоненціальний, Вейбулла і Гомпертца. З допомогою кнопки Parameter estimates визначалися параметри і статистичні оцінки відповідності теоретичного і емпіричного розподілів. Оцінка відповідності проводиться за допомогою χ^2 -критерію [3].

Отримані результати (таблиця 1) показали, що найбільш близьким до емпіричного розподілу є розподіл Гомпертца з параметрами, які визначені методом зважених найменших квадратів Weight 2 Одержаний рівень значимості $p=0,892$.

Таблиця 1
Оцінки параметрів для різних розподілів

w_i	λ	γ	p – рівень
Експоненціальний розподіл			
Weight1	0,000233	-	0,000164
Weight2	0,000044	-	0,007848
Weight3	0,000125	-	0,007575
Розподіл Вейбулла			
Weight1	-	2,264238	0,267190
Weight2	-	2,587475	0,302039
Weight3	-	1,931151	0,146036
Розподіл Гомпертца			
Weight1	-11,3418	0,001093	0,844909
Weight2	-11,5398	0,001228	0,892146
Weight3	-11,2443	0,000999	0,744756

Таким чином, для розглянутого прикладу експериментальних даних (33,3 % повних та 66,7 % цензурованих) визначена функція надійності, яка добре описується розподілом Гомпертца.

Висновок

Розглянуто особливості невідновлюваних технічних систем та їх показники надійності.

Запропонована методика визначення функції надійності при неповних даних на основі модуля Survival Analysis програми STATISTICA.

Визначена функція надійності при неповних даних на прикладі результатів випробувань інтегральних мікросхем, як основного елемента блоків авіоники.

Литература

1. Нечипоренко, О. М. Основы надёжности летательных аппаратов [Текст] : навч. посіб. / О. М. Нечипоренко. – К. : НТУУ КПІ, 2010. – 240 с.
2. Боровиков, В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. [Текст] / В. Боровиков. – СПб : Питер, 2001. – 656 с.
3. Томашевський, О. В. Комп'ютерні технології статистичної обробки даних: Навч. посібник [Текст] / О. В. Томашевський, В. П. Русіков. – Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2015. – 174 с.

References

1. Nechiporenko, O. M. *Osnovy nadiynosti lital'nykh aparativ* [Fundamentals of reliability of aircraft]. Kyiv, NTUU KPI Publ., 2010. 240 p.
2. Borovikov, V. *STATISTICA: Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere. Dlya professionalov* [STATISTICA: skill analysis of data on a computer. For professionals]. SPb, Piter Publ., 2001. 656 p.
3. Tomashevskiy, O. V., Rysikov, V. P. *Komp'yuterni tekhnolohiyi statystychnoyi obrobky danykh*. [Computer Technologies of Statistical Data Processing]. Zaporizhzhya, Zaporizhzhya nat. techn. univ. Publ., 2015. 174 p.

Поступила в редакцию 7.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ НЕПОЛНЫХ ДАННЫХ

А. В. Томашевский, Г. В. Снежной

Изучение надежности технических систем особенно важно для систем, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей (например, летательных аппаратов). Вопрос определения показателей надежности технических систем на основе полной информации об их работе изучен достаточно хорошо, но на практике часто имеем дело с неполными данными. Это связано с тем, что время от начала эксплуатации (испытаний) до появления отказа не всегда известно и данные об отказе могут быть неполными (цензурированными). Использование цензурированных данных при определении показателей надежности позволит получить более точные оценки. Технические системы в зависимости от особенностей отказа могут быть восстанавливаемыми или невосстанавливаемыми в зависимости от особенностей возникновения отказа. Основные показатели надежности невосстанавливаемых систем - это вероятность безотказной работы (функция наде-

жности), плотность вероятности появления отказа, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов. Определение функции надежности при неполных данных можно сделать с помощью модуля Survival Analysis программы STATISTICA. Этот модуль нашел широкое применение в медицинских исследованиях для оценки функции выживания, и его можно применить при оценке функции надежности технических систем. Модуль Survival Analysis содержит процедуры для определения аналитического вида функции надежности (выживания) на основе оценки соответствия эмпирического распределения, полученного по экспериментальным данным, с заданным теоретическим распределением. При проведении исследования последовательно проверяется соответствие следующим распределениям: экспоненциальное, Вейбулла, Гомперца. Параметры распределения, наиболее близкого к эмпирическому, определяются с помощью метода наименьших квадратов. Оценка соответствия проводится с помощью критерия Пирсона. В качестве примера определения функции надежности при неполных данных рассмотрены результаты испытаний основного элемента блоков авионики - интегральной микросхемы. Получено, что наиболее близким к эмпирическому распределению времени работы до отказа будет распределение Гомперца.

Ключевые слова: надежность технической системы; функция надежности; неполные данные; программа STATISTICA.

DETERMINATION OF THE FUNCTION OF RELIABILITY OF NON-RECOVERABLE TECHNICAL SYSTEMS FOR INCOMPLETE DATA

A. V. Tomashevskiy, G. V. Snizhnoi

The study of the reliability of technical systems is especially important for systems whose failure to operate is associated with a danger to people's lives (for example, aircraft). The question of determining the reliability of technical systems based on complete information about their work is well studied, but in practice, we often deal with incomplete data. It is related to the fact that the time from the beginning of operation (testing) to the occurrence of failure is not always known and the data on the refusal may be incomplete (censored). Application of censored data determining reliability indicators will allow for more accurate estimates. Technical systems, depending on the characteristics of failure, can be restored or non-recoverable depending on the features of the failure. The main indicators of the reliability of non-restorable systems are the probability of failure-free operation (reliability function), the probability density of failure, the average run-up to failure, the failure rate. You can determine the reliability function for incomplete data applying STATISTICA Survival Analysis module. This module has been widely used in medical research to assess the survival function and can be applied to assess the reliability of technical systems. The Survival Analysis module contains procedures to determine the analytic form of the reliability function (survival) based on the assessment of the correspondence of the empirical distribution obtained from the experimental data with the given theoretical distribution. In conducting the study, consistency checks the following distributions: exponential, Weibull, Gompertz. The distribution parameters most closely related to the empirical one are determined using the least-squares method. The conformity assessment is carried out using Pearson's criterion. As an example, the definition of a reliability function for incomplete data examines the results of tests of the main element of the avionics units - the integral microcircuit. It is found that the distribution of Gompertz is the closest to the empirical distribution of the working time until the failure.

Keywords: reliability of the technical system; reliability function; incomplete data; STATISTICA.

Томашевський Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Сніжної Геннадій Валентинович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Tomashevskiy Oleksandr Volodymyrovych – Candidate of Technical Science, docent of Dept. of Microelectronics and Nanoelectronics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: tmsh@email.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-3306-5965.

Snizhnoi Gennadii Valentinovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent of Dept. of Microelectronics and Nanoelectronics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: snow@zntu.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-1452-0544, Scopus Author ID: 54406427800, ResearcherID: Q-4033-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=54406427800>.