

УДК 621.38

В.П. Киселевич, В.Н. Клячкин, В.В. Сухов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

Киселевич Валерий Павлович, кандидат химических наук, окончил факультет приборостроения Ленинградского института авиационного приборостроения (ЛИАП). Заместитель генерального директора по производству – технический директор ОАО «Концерн «Моринсис-Агат», г. Москва. Имеет статьи и патенты в области обеспечения качества и контроля электронных устройств. [e-mail: kiselevich_vp@concern-agat.ru].

Клячкин Владимир Николаевич, доктор технических наук, окончил механический факультет Ульяновского политехнического института. В настоящее время профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет научные труды в области надежности и статистических методов. [e-mail: v_kl@mail.ru].

Сухов Владимир Васильевич, кандидат технических наук, окончил машиностроительный факультет МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Радиомеханические приборные устройства». Начальник конструкторского отдела ОАО «Концерн «Моринсис-Агат», г. Москва. Имеет статьи и патенты в области надежности, испытаний и расчетов динамики и прочности РЭА, систем виброизоляции, вибро-акустических и шумовых характеристик, тепловых режимов. [e-mail: vsuhov051@yandex.ru].

Аннотация

Рассмотрены вопросы прогнозирования ресурса системы по результатам ускоренных испытаний при различных воздействиях. Методы оценки ресурса делят на четыре группы: статистические, детерминированные, физико-статистические, экспертные. Наибольшее использование находят первые три метода. Аналитические методы учета влияния этих воздействий на ресурс разработаны лишь для отдельных факторов, при этом не всегда учитываются особенности случайных воздействий. Известны методы расчета долговечности, связанные с усталостной прочностью. Для разработки эффективного метода оценки ресурса проведен анализ внешних воздействий, которые оказывают наибольшее влияние на долговечность. По результатам анализа аналогичных систем и ускоренных испытаний предложен метод оценки среднего и гамма-процентного ресурса на основе распределения наработки до отказа, параметры которого определяются расчетным путем. Испытания проведены на группе модулей по каждому выбранному воздействию. Приведен пример расчета системы как последовательного соединения подсистем, каждая из которых находится под действием одного из воздействий: вибраций, температуры, включения и выключения электропитания.

Ключевые слова: ресурс, прогнозирование, вычислительная система, ускоренные испытания, статистические методы, распределение Вейбулла.

COMPUTER SYSTEM RESOURCE POSTTEST PREDICTION

Valerii Pavlovich Kiselevich, Candidate of Chemistry; graduated from the Faculty of Instrument Engineering at Leningrad Institute of Aircraft Instrumentation; Deputy General Director on Production – Technical Director at Concern 'Morinformsystem-Agat' JSC, in Moscow; an author of articles and patents in the field of quality assurance and inspection of electric devices. e-mail: kiselevich_vp@concern-agat.ru.

Vladimir Nikolaevich Klyachkin, Doctor of Engineering; graduated from the Mechanical Faculty of the Ulyanovsk Polytechnic Institute; Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics of the Ulyanovsk State Technical University; an author of scientific papers in the field of reliability, service life and mathematics. e-mail: v_kl@mail.ru.

Vladimir Vasilyevich Sukhov, Candidate of Engineering; graduated from the Mechanical Engineering Faculty of Bauman Moscow Technical University with the specialty in Radiomechanical Devices; Chief of Engineering Department at the Joint Stock Company Concern 'Morinformsystem-Agat' (Moscow); a patent holder and an author of articles in the field of reliability, testing, and calculations of dynamics and strength of radio equipment, vibroinsulation system, vibroacoustic and sound characteristics, thermal conditions. e-mail: vsuhov051@yandex.ru.

Abstract

The article deals with problems of the computer system resource posttest prediction derived from accelerated tests under different influences. Resources estimation methods are divided into four groups: statistical, deterministic, physic-statistics, and expert methods. The first three are the most commonly used methods. The analytical methods for accounting of effect of these influences on resource were made only for individual factors, while not always taken into account particulars of random influences. The methods of calculating the service life related with the fatigue strength are known. There were analyzed external influences that have the greatest impact on the design of the device so that to develop an effective method for estimating the resource. On the basis of analysis and accelerated testing, the method of estimating the mean and gamma-percentile resource based on the distribution of time to failure, the parameters of which are determined by calculation, has been proposed. The tests were carried out on a large group of modules for each selected action. There was given an example of calculation of the system as the serial communication subsystems, where each of subsystems is under the influence of the vibration, temperature, power supply ON and OFF.

Key words: resource, prediction, computer system, accelerated testing, statistical methods, the Weibull distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшее свойство, характеризующее надежность вычислительной системы, – это ее долговечность. В соответствии со стандартом [1], под долговечностью понимают свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельным называют состояние объекта, когда его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Основными показателями долговечности являются срок службы и ресурс. Под ресурсом понимают суммарную наработку объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Обычно используют понятие гамма-процентный ресурс, то есть значение ресурса, обеспеченное с заданной вероятностью γ . Часто оценивается и средний ресурс, или математическое ожидание ресурса.

Методы оценки и прогнозирования ресурса можно разделить на четыре группы [2]:

- статистические методы основаны на обработке достаточно большого объема данных стендовых или эксплуатационных испытаний;

- детерминированные методы оценки ресурса базируются на аналитических зависимостях, при этом не учитывается случайный характер воздействий;

- физико-статистические методы учитывают как влияние физико-химических факторов, так и случайные изменения действующих нагрузок; ограниченное применение этих методов связано с недостаточностью физических исследований процессов деградации (коррозии, усталости, износа и других);

- экспертные методы, как правило, адекватно отражают ситуацию, при этом одновременно со статистическим, может быть использован аппарат нечеткой логики; проблемы метода связаны с ограничениями в выборе экспертов и их субъективностью.

1 ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ

Воздействия на вычислительные системы можно разделить на внешние и внутренние [3, 4]. Внешние воздействия определяются условиями эксплуатации системы: – механические, климатические и другие воздействия. Внутренние воздействия определяются режимами работы системы и характеризуются электрическими, механическими и другими нагрузками, связанными с функционированием системы.

Среди механических воздействий выделяют вибрационные, ударные нагрузки, а также акустические шумы. Вибрации приводят к поломкам конструкции, обрывам проводов и нарушению электрических контактов, к нарушению герметичности, к деформациям элементов системы и их усталостным изменениям. Они характеризуются ускорением (обычно до 2g) и частотой (50–60 Гц). Ударные нагрузки приводят к разрушению конструктивных элементов и характеризуются амплитудой и длительностью удара (200–500g при длительности до 2 мс). Акустический шум связан в первую очередь с баллистическими волнами, образующимися от снарядов, уровень шумов составляет 75–140 дБ, частота – от 50 до 1000 Гц.

Высокая влажность приводит к коррозии, способствующей развитию усталостных трещин (особенно в сочетании с вибрационными нагрузками). Относительная влажность измеряется в процентах, для корабельных электронных средств это 98–100%.

На работу электронной техники значительное влияние оказывает температурный режим эксплуатации: как высокая, так и низкая температура приводит к изменению электрических свойств. Перепады температуры для систем, работающих на подводных лодках, составляют от 10 до 55°C, на надводных кораблях – от –10 до 55°C.

Еще одним воздействием, которое существенно влияет на ресурс вычислительной системы, является включение/отключение электропитания: при включении имеет место бросок тока (всплеск), в 2–3 раза превышающий ток при стационарном потреблении; при плавании этот процесс имеет место несколько раз в сутки, в условиях боевой работы – несколько раз в час.

Аналитические методы учета влияния этих воздействий на ресурс разработаны лишь для отдельных факторов, при этом, как уже отмечалось, не всегда учитываются особенности случайных воздействий. Известны методы расчета долговечности, связанные с усталостной прочностью (модели накопления повреждений и роста усталостных микротрещин [5]).

Каждой из рассмотренных групп методов оценки и прогнозирования ресурса присущи неопределенности, связанные с малым объемом информации. Наиболее ценной информацией являются статистические данные по реальной эксплуатации системы, а также результаты испытаний. При этом высокая надежность системы не позволяет за время испытаний довести до отказа все объекты. С целью сокращения продолжительности испытаний используют два подхода [6]. Первый связан с увеличением действующих нагрузок, что приводит к преждевременному переходу изделия в предельное состояние за счет интенсификации процессов (например, за счет испытаний при более высокой температуре, при бо́льших механических нагрузках и т. п.), второй подход предполагает прекращение испытаний некоторых объектов до наступления отказа (цензурирование); использование обоих подходов дает возможность резко сократить продолжительность испытаний.

2 ОЦЕНКА РЕСУРСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Предположим, что проведены ускоренные испытания системы при заданном воздействии по плану с однократным цензурированием $[NUr]$: испытано N образцов изделий; r – признак окончания испытаний: испытания прекращаются, если произошел отказ $r < N$ изделий; U означает отсутствие восстановления после отказа.

Значения наработки до отказа в условиях нормального режима проведения испытаний пересчитываются с учетом коэффициента ускорения (например, для испытаний в условиях температурной нагрузки этот коэффициент оценивается с использованием модели Аррениуса [7–9]). Полученные результаты представляются в виде выборочных значений наработки до отказа t_1, t_2, \dots, t_r , при этом выборочные значения наработки до цензурирования одинаковы:

$$\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_{N-r} = t_r.$$

Наиболее распространенным законом распределения ресурса является закон Вейбулла [10–12]:

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(t/a\right)^b\right\}, \quad (1)$$

где параметры распределения a и b оцениваются по результатам испытаний [13]:

$$a = \left[\frac{\sum_{i=1}^r t_i^b + \sum_{j=1}^{N-r} \tau_j^b}{r} \right]^{1/b}, \quad (2)$$

оценка параметра b находится из уравнения:

$$\left(\frac{r}{b} + \sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \left(\sum_{i=1}^r t_i^b + \sum_{j=1}^{N-r} \tau_j^b \right) - r \left(\sum_{i=1}^r t_i^b \ln t_i + \sum_{j=1}^{N-r} \tau_j^b \ln \tau_j \right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) решается итерационно: процесс прекращается при достижении требуемой точности. Возможно также использование псевдоградиента [14].

При найденных параметрах распределения точечная оценка среднего ресурса:

$$\hat{T} = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right), \quad (4)$$

(здесь $\Gamma(x)$ – гамма-функция), а точечная оценка гамма-процентного ресурса при заданном γ :

$$\hat{T}_\gamma = a \left(\ln \frac{1}{\gamma} \right)^{1/b}. \quad (5)$$

При необходимости могут быть найдены и соответствующие интервальные оценки.

3 РЕСУРС СИСТЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Если изделие может рассматриваться как последовательное соединение m элементов, отказы которых независимы, то функция надежности системы, или ее вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t), \quad (6)$$

где $P_i(t)$ – функция надежности i -го элемента системы.

Средний ресурс независимо от распределения ресурсов отдельных элементов связан с функциями надежности соотношением:

$$T = \int_0^\infty \prod_{i=1}^m P_i(t) dt, \quad (7)$$

гамма-процентный ресурс есть корень уравнения

$$\prod_{i=1}^m P_i(T_\gamma) = \gamma. \quad (8)$$

Простых связей между показателями ресурса системы T и T_γ и соответствующими показателями для элементов T_i и $T_{i\gamma}$ не существует [15]. Исключением является экспоненциальный закон распределения, при котором точечная оценка среднего ресурса:

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i,$$

точечная оценка гамма-процентного ресурса:

$$T_\gamma = T \ln \frac{1}{\gamma}.$$

Предположим, что каждый элемент системы испытывается по плану одного и того же типа $[N_i U r_i]$, при этом ресурс каждого элемента имеет распределение Вейбулла

с различными параметрами a_i и b_i :

$$F_i(t) = 1 - \exp\left\{-\left(t/a_i\right)^{b_i}\right\}. \quad (9)$$

Тогда вероятность безотказной работы элемента можно представить в виде:

$$P_i(t) = \exp\left\{-\exp\left(-b_i \ln(a_i/t)\right)\right\}. \quad (10)$$

Вероятность безотказной работы всей системы имеет вид:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m \exp\left\{-\exp\left(-b_i \ln(a_i/t)\right)\right\}. \quad (11)$$

Зависимость для $P(t)$ позволяет на основе уравнений (7)–(8) определить точечные оценки для показателей долговечности системы. Средний ресурс может быть найден по формуле (7) с учетом (11):

$$T = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^m \exp\left\{-\exp\left(-b_i \ln\left(\frac{a_i}{t}\right)\right)\right\} dt. \quad (12)$$

Оценка гамма-процентного ресурса определяется из уравнения (8), которое с учетом формулы (10) примет вид:

$$\prod_{i=1}^m \exp\left\{-\exp\left[-b_i \ln\left(\frac{a_i}{T_\gamma}\right)\right]\right\} = \gamma \quad (13)$$

(здесь a_i и b_i оцениваются по результатам испытаний с использованием зависимостей (2)–(3)).

4 ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА

Основные этапы предлагаемой методики:

1. Анализ надежности аналогичных ранее разработанных систем:

- поиск реально функционирующих систем, наиболее близких по конструктивным параметрам и условиям работы к исследуемой системе;
- исследование причин их отказов в различных условиях эксплуатации;
- классификация отказов по причинам их возникновения.

2. Изучение возможных внешних и внутренних воздействий (нагрузок) на систему:

- выявление возможных нагрузок в различных условиях эксплуатации;
- оценка диапазона возможных значений числовых характеристик нагрузок;
- анализ взаимосвязей возможных нагрузок на систему (при наличии опытных данных по количеству отказов, связанных с влиянием разного типа нагрузок, определяется коэффициент корреляции и проверяется значимость корреляции по критерию Стьюдента);

- исследование возможностей проведения совместных испытаний при наличии коррелированных воздействий (оценка возможности группировки по видам нагрузок).

3. Разработка плана ускоренных испытаний на долговечность:

- отбор типов нагрузок, для которых предполагается проведение испытаний;
- группировка нагрузок при наличии корреляций;
- выбор типа плана $[NUr]$, $[NUt]$ и т. п., его параметров N_i , r_i и т. п. для каждого вида нагрузки;

- изучение диапазонов нагрузок, не изменяющих принципиально картину возможных отказов (это необходимо для выбора коэффициентов ускорения испытаний);

- оценка коэффициентов ускорения для пересчета наработки в нормальном режиме функционирования системы.

4. Проведение испытаний при различных нагрузках с определением наработки до отказа. Полученные опытным путем значения наработки при ускоренных испытаниях пересчитываются на нормальные условия с использованием коэффициентов ускорения [7–9].

5. Исследование распределения наработки:

- выбор типа распределения (Вейбулла, экспоненциальное, нормальное, логнормальное и т. п.) и проверка соответствующей гипотезы по одному из критериев значимости (при наличии больших выборок – хи-квадрат, Колмогорова-Смирнова, при малых выборках – Шапиро-Уилка, Эппса-Палли); часто вид распределения выбирают, исходя из данных для ранее изготовленных объектов такого же типа;

- оценка параметров соответствующего распределения (в частности, для наиболее распространенного при оценке ресурса распределения Вейбулла используются формулы (2)–(3)); при этом количество используемых итераций определяется требуемой точностью вычислений.

6. Прогнозирование ресурса системы по формулам (12)–(13), как последовательного соединения элементов, каждый из которых работает в условиях одной из сформированных групп нагрузок: такой подход основан на том, что под последовательной понимается система, отказ которой происходит при отказе хотя бы одного из ее элементов.

5 ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для прогнозирования ресурса вычислительной системы проводились ее ускоренные испытания при трех типах воздействий:

- 1) вибрации в условиях высокой влажности,
- 2) изменении температуры,
- 3) включении /выключении электропитания.

Система под воздействием нескольких типов нагрузок, как указывалось, может рассматриваться как последовательное соединение элементов. При этом предполагается независимость элементов, а поскольку не все элементы независимы (например, интенсивность отказов за счет вибраций коррелирована с отказами за счет высокой

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Обработка результатов ускоренных испытаний при вибрационной нагрузке															
2	№ t_i -наработка, приведенная к нормальным условиям, тыс час															
3	оценка параметров распределения вейбулла															
4	t_1	$\ln t_1$	t_1^a	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$	$\ln(t_1^a/b)$
5	1	59,8	4,09	2E+19	8E+19	1,38	5,64	4E+14	2E+15	2E+05	9E+05	1E+07	6E+07	3E+06	1E+07	4846121
6	2	59,9	4,09	2E+19	8E+19	1,38	5,64	4E+14	2E+15	2E+05	9E+05	2E+07	6E+07	3E+06	1E+07	4876685
7	3	60,1	4,1	2E+19	9E+19	1,38	5,65	4E+14	2E+15	2E+05	9E+05	2E+07	6E+07	3E+06	1E+07	4938237
8	4	60,3	4,1	2E+19	9E+19	1,38	5,65	4E+14	2E+15	2E+05	9E+05	2E+07	6E+07	3E+06	1E+07	5000358
9	5	65,1	4,18	5E+19	2E+20	1,39	5,79	8E+14	3E+15	3E+05	1E+06	2E+07	9E+07	4E+06	1E+07	6670618
10	6	74,4	4,31	2E+20	9E+20	1,4	6,04	2E+15	1E+16	4E+05	2E+06	4E+07	2E+08	6E+06	2E+07	11025008
11	7	86,8	4,46	1E+21	5E+21	1,42	6,33	8E+15	4E+16	7E+05	3E+06	7E+07	3E+08	1E+07	5E+07	19691879
12	8	98,9	4,59	5E+21	2E+22	1,43	6,58	2E+16	1E+17	1E+06	5E+06	1E+08	5E+08	2E+07	7E+07	32177366
13	сумм	33,9	6E+21	3E+22	11,2	47,3	4E+16	2E+17	3E+06	1E+07	3E+08	1E+09	5E+07	2E+08	89226272	
14																

Рис. 1. Рабочий лист Excel: исходные данные и итерационный процесс оценки параметров распределения Вейбулла при вибрационной нагрузке

влажности), предлагается при проведении испытаний сочетать коррелированные нагрузки. В нашем примере испытания на вибрации проводятся в условиях высокой влажности.

Все три типа испытаний на долговечность проводились по плану $[N_{Ur}]$, при этом везде под наблюдением находилось $N = 12$ объектов, наблюдения проводились до появления $r = 8$ отказов.

Ускорение испытаний обеспечивалось более высокими (чем в нормальных условиях) значениями ускорения и частоты вибраций, расширением диапазона температуры испытаний и повышением частоты включения / выключения электропитания.

Результаты наблюдений при воздействии вибрации в условиях высокой влажности представлены на рисунке 1 на рабочем листе Excel. Обработка данных проводилась в следующем порядке. Для каждого вида воздействий в предположении справедливости распределения Вейбулла по зависимостям (2)–(3) итерационно оценивались параметры этого распределения a и b и проводился расчет ресурса при найденных значениях параметров. В данных условиях средний ресурс оказался равным 85,6 тыс. ч, а гамма-процентный ресурс (при $\gamma = 0,9$) – 52,0 тыс. ч. Подобным образом обрабатывались результаты двух других испытаний.

Ресурс вычислительной системы при действии всех трех нагрузок рассчитывался с использованием системы Mathcad: средний ресурс определялся численным интегрированием по формуле (12), а гамма-процентный ресурс – как результат решения нелинейного уравнения (13). При этом в качестве начального приближения при-

нято минимальное значение гамма-процентного ресурса по результатам всех трех испытаний, равное 52 тыс. ч. Прогнозируемый средний ресурс исследуемой вычислительной системы оказался равным 76 тыс. ч, а гамма-процентный ресурс – 44 тыс. ч, что близко к значениям ресурса действующих вычислительных систем аналогичного класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для прогнозирования ресурса вычислительной системы предложен метод, основанный на представлении объекта в виде последовательности подсистем, каждая из которых работает в условиях одной из заданных нагрузок (или сочетания заданных нагрузок). Такой подход основан на том, что под последовательной понимается система, отказ которой происходит при отказе хотя бы одного из ее элементов. Прогнозирование ресурса подсистемы при действии конкретного вида нагрузки проводится на основе распределения наработки при этом виде нагружения. Вид и параметры распределения оцениваются путем проведения ускоренных испытаний, по результатам которых определяются выборочные значения наработки до отказа. Выбор характера нагружения и диапазона нагрузок при проведении испытаний осуществляется на базе анализа отказов аналогичных систем, находящихся в эксплуатации, с учетом ускорения испытаний.

Разработана методика прогнозирования ресурса и приведен пример, при этом расчеты выполнены в среде широко распространенных компьютерных пакетов – электронных таблицах Excel и системе Mathcad (используются итерационные вычисления, численное интегрирование, решение нелинейных уравнений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

7. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990.

8. Острейковский В.А. Теория надежности. – М. : Высшая школа, 2003. – 463 с

9. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. Техническая библиотека института испытаний и сертификации вооружения и военной техники. – М. : Олита, 2003. – 472 с.

10. Xie M., Y.-S. Dai, K.-L. Poh, *Computing System Reliability: Models and Analysis*. – N.Y. : Springer, 2004. – 293 p.

11. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М. : Машиностроение, 1990. – 448 с.

12. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 184 с.

13. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения. – М. : Изд-во стандартов, 2000.

14. Волков А.Н. Роль ускоренных испытаний в определении надежности интегральных схем // Молодой ученый. – 2012. – № 10. – С. 41–52. – URL: <http://moluch.ru/archive/>.

15. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. – М. : Высшая школа, 1991. – 336 с.

16. Клячкин В.Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. – М. : Физматлит, 2011. – 196 с.

17. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А. Диагностика состояния объекта по наличию неслучайных структур на контрольной карте // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 5. – С. 44–50.

18. Fakhre-Zakery I., Silady F. Mixture models for reliability of software with imperfect debugging: identifiability of parameters // IEEE Transactions on Reliability. – 1995. – Vol. 44. – pp. 104–113.

19. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / под ред. Р.С. Судакова, О.И. Тескина. – М. : Машиностроение, 1989. – 376 с.

20. Васильев К.К., Крашенинников В.Р. Статистический анализ многомерных изображений. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 172 с.

21. Сонкина Т.П., Тескин О.И. Интервальное оценивание надежности последовательной системы // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – № 3. – С. 71–83.

REFERENCES

1. GOST 27.002-89. Nadezhnost v tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1990.

2. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [The Reliability Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 463 p.

3. Zivotkevich I.N., Smirnov A.P. *Nadezhnost*

tekhnicheskikh izdeliy. Tekhnicheskaya biblioteka instituta ispytaniy i sertifikatsii vooruzheniya i voyennoy tekhniki [Techware Reliability. Technological Library of Institute for Test and Certification of Weapons and Military Equipment]. Moscow, Olita Publ., 2003. 472 p.

4. Xie M., Y.-S. Dai, K.-L. Poh, *Computing System Reliability: Models and Analysis*. N.Y. Springer, 2004. 293 p.

5. Bolotin V.V. *Resurs mashin i konstruktsiy* [Machine and Construction Resources]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 448 p.

6. Aronov I.Z., Burdasov Ye.I. *Otsenka nadezhnosti po rezultatom sokrashchennykh ispytaniy* [Reliability Evaluation on Accelerated Test Results]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1987. 184 p.

7. ГОСТ Р 51372-99. Metody uskorenykh ispytaniy na dolgovechnost i sokhranyayemost pri vozdeystvii agressivnykh i drugikh spetsialnykh sred dlya tekhnicheskikh izdeliy, materialov i sistem materialov. Obshchiye polozheniya [Accelerated life and storable life test methods in special aggressive and other special media for technical products, materials and systems of materials. General]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2000.

8. Volkov A.N. Rol uskorenykh ispytaniy v opredelenii nadezhnosti integralnykh skhem [The Role of Accelerated Testing in the Integrated Circuits Reliability Determination]. *Moloday uchenyy* [The Young Scientist], 2012, no. 10, pp. 41–52. URL: <http://moluch.ru/archive/>.

9. Gludkin O.P. *Metody i ustroystva ispytaniy RES i EVS* [Test Methods and Equipment for Radioelectronic and Computer Systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 336 p.

10. Klyachkin V.N. *Modeli i metody statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa* [Models and Methods for Statistical Checking of Multivariate and Technological Process]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2011. 196 p.

11. Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A. Diagnostika sostoyaniya obyekta po nalichiyu nesluchaynykh struktur na kontrolnoy karte [Object State Diagnostics on Nonrandom Structures Availability in Check Card]. *Pribyory i sistemy. Upravleniye, kontrol, diagnostika* [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2013, no. 5, pp. 44–50.

12. Fakhre-Zakery I., Silady F. Mixture models for reliability of software with imperfect debugging: identifiability of parameters. *IEEE Transactions on Reliability*, 1995, Vol. 44, pp. 104–113.

13. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike. Spravochnik v 10 tomakh. T. 6. Eksperimentalnaya otrabotka i ispytaniya pod red. R.S. Sudakova, O.I. Teskina* [Equipment Reliability and Efficiency. Manual of 10 Volumes. Vol. 6. Experimental Processing and Testing. Under the editorship of R.S. Sudakov and O.I. Teskin]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 376 p.

14. Vasilyev K.K., Krashennnikov V.R. *Statisticheskyy analiz mnogomernykh izobrazheniy* [Statistical Analysis of Multidimensional Pictures]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2007. 172 p.

15. Sonkina T.P., Teskin O.I. Intervalnoye otsenivaniye nadezhnosti posledovatelnoy sistemy [Interval Reliability Estimation of Sequential System]. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the Academy of Sciences of the U.S.S.R. Engineering Cybernetics], 1984, no. 3, pp. 71–83.