

УДК 621.3.019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ*

Б.И. ФИЛИППОВ¹, Ю.В. ЗАМЯТИНА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: filippov-boris@rambler.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет. E-mail: zamiatina.abs323@gmail.com

Рассматривается апостериорный анализ надежности радиоэлектронных систем (РЭС), который выполняется после изготовления опытной партии аппаратуры с целью определения ее характеристик надежности. Такие испытания необходимы потому, что на стадии проектирования устройства конструктор не располагает полными априорными сведениями, которые позволили бы заранее определить показатели надежности с достаточно высокой достоверностью. Важным источником сбора информации о надежности является система сбора данных о работе изделий в процессе их эксплуатации. Существуют два основных вида испытаний на надежность. Один из них – определительные испытания, задачей которых является оценка показателей надежности. Он характерен для крупносерийных изделий. Другой вид испытаний – контрольные испытания, задачей которых является проверка соответствия техническим условиям показателя надежности системы. Второму виду испытаний и посвящена данная работа. Необходимо ответить на вопрос, соответствуют ли характеристики надежности изделия (изготовленной РЭС) заданным требованиям, предусмотренным техническими условиями на изготовление изделия. Для решения этой задачи используется математический аппарат статистической теории гипотез. Рассматриваются две гипотезы: гипотеза H_0 – среднее время наработки на отказ $t^* = T_0$ – задается требованиями ТУ (изделие хорошее); гипотеза H_1 – среднее время наработки на отказ $t^* = T_1 < T_0$ – альтернатива (изделие плохое). Решение о справедливости той или иной гипотезы принимается по правилу Неймана–Пирсона. В работе рассмотрена процедура испытаний опытной партии РЭС по процедуре [л, В, r] и определены следующие показатели надежности: среднее время безотказной работы; коэффициент соответствия выборки заданным производителем параметрам; оценка риска производителя для данного опытного образца. Из проведенных испытаний можно сделан вывод, что рассматриваемый образец соответствует требованиям.

* Статья получена 11 июля 2016 г.

Ключевые слова: радиоэлектронная система, процедуры испытаний, интенсивность отказов, риск заказчика, риск производителя, среднее время безотказной работы, длительность испытаний, правило Неймана–Пирсона, критерий χ^2

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-3-83-97

ВВЕДЕНИЕ

На текущем этапе развития общества, когда термин «информатизация» прочно закрепился в умах многих, каждый человек стал зависим от сохранности его личной информации. Недостоверность или несвоевременная передача ценной информации может привести к серьезным последствиям как для человека, так и для фирмы или государства. В связи с этим повышаются требования к надежности и работоспособности радиоэлектронных систем передачи и обработки информации.

Определение характеристик надежности радиоэлектронных систем (РЭС) проходит в два этапа: априорный анализ, который заключается в приближенном расчете надежности системы по известным количественным (вероятностным) характеристикам надежности ее элементов, и апостериорный анализ после изготовления опытной партии аппаратуры [1–14]. Апостериорный анализ дает более точные результаты для конкретной изготовленной партии [15], поэтому данный этап анализа надежности является актуальной для производства задачей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ

Апостериорный анализ надежности выполняется после изготовления опытной партии аппаратуры с целью определения ее характеристик надежности. Для этого проводятся статистические испытания (РЭС) по одной из нижеперечисленных процедур [16]:

а) процедура $[n, B, r]$ предполагает, что в испытаниях участвует n РЭС до r отказов без замены отказавших систем;

б) процедура $[n, B, r]$ предполагает, что в испытаниях участвует n РЭС до r отказов с заменой отказавших систем (восстановление);

в) процедура $[n, B, T]$ предполагает, что в испытаниях участвует n РЭС в течение заданного времени T (длительность испытаний) без замены отказавших систем;

г) процедура $[n, B, T]$ предполагает, что в испытаниях участвует n РЭС в течение заданного времени T с заменой отказавших систем (восстановление);

д) смешанные процедуры: $[n, Б, r/T]$ или $[n, В, r/T]$ предполагают, что заданы длительность испытаний и число отказов; испытания прекращаются, когда либо r , либо T достигают заданного значения, при этом если длительность испытаний до последнего отказа $t_r \leq T$, то обработка результатов выполняется по процедурам а) или б), если $t_r > T$, то обработка результатов выполняется по процедурам в) или г);

е) процедура $[n, Б, n]$ – испытания проводятся до отказа всех n РЭС, участвующих в испытаниях. Эта процедура используется редко, в основном в тех случаях, когда необходимо определить статистические характеристики последовательности отказов отдельных элементов РЭС.

По завершении анализа рассчитанные характеристики, если это необходимо, проверяются на соответствие техническим условиям и требованиям нормативно-технической документации, установленным государственными органами. В статье будет рассмотрен данный этап проверки.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ТРЕБОВАНИЯМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ РЭС ПО ПРОЦЕДУРЕ $[n, В, r]$

1. Условия задачи

Проверка соответствия характеристик надежности РЭС заданным требованиям является второй задачей ее испытаний на надежность. Необходимо ответить на вопрос, соответствуют ли характеристики надежности изделия (изготовленной РЭС) заданным требованиям, предусмотренным техническими условиями на изготовление изделия. Для решения этой задачи используется математический аппарат статистической теории гипотез [14].

а) Предполагается, что проводятся испытания опытной партии из 1 ($n = 1$) РЭС с заменой отказавших систем до 100 ($r = 100$) отказов. Полученная выборка является совокупностью случайных чисел, если при этом учитывать, что восстановление проходит мгновенно.

б) Прежде чем определять характеристики надежности по результатам испытаний, необходимо проверить соответствие закона распределения полученной выборки $w_1(y_i)$ показательному закону распределения (например, $w_1(y_i) = n\lambda e^{-n\lambda y_i}$, где λ – среднее число отказов в единицу времени) или другому. Это можно сделать по критерию χ^2 .

Для начала необходимо разделить полученную выборку на некоторое количество равных интервалов времени $k = 10$. Затем определить количество отказов на каждом из этих интервалов и занести результаты в таблицу (табл. 2).

Таблица 1

Значения выборки Y

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y_i	1298	1307	1154	1454	1137	1250	1305	913	1027	1296
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
y_i	1430	1405	1499	1307	1271	1358	1009	1398	1242	1234
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
y_i	1464	896	1381	931	1272	1108	854	915	1173	1057
i	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
y_i	812	1134	991	917	864	828	1359	1156	1335	976
i	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
y_i	1202	820	1161	1227	813	1160	1465	812	1469	1110
i	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
y_i	1077	1485	1153	1358	803	1092	1417	842	1404	1491
i	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
y_i	1339	1262	1048	1042	957	1261	936	1432	1171	1325
i	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
y_i	1430	1169	912	1020	1404	1371	1486	1017	1181	1256
i	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
y_i	1421	1227	1236	860	1037	847	1392	1257	848	1273
i	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
y_i	1064	815	1303	1360	1328	1220	1447	1044	835	978

Находим точечную оценку

$$\hat{\lambda} = \frac{r-1}{t_{\Sigma}}. \quad (1).$$

Предположим, что закон распределения y_i – экспоненциальный.

Вычисляем теоретическую вероятность числа отказов на каждом интервале, и так же заносим результаты в таблицу (табл. 2).

$$P_i = 1 - e^{-n\hat{\lambda} \frac{t_{\Sigma}}{k}} \tag{2}$$

и оценку вероятности отказов в каждом интервале

$$\hat{P}_i = \frac{m_i}{r} \tag{3}$$

Таблица 2

Распределение вероятностей

<i>N</i>	<i>m_i</i>	\hat{P}_i	<i>P_i</i>
1	14	0.14	1
2	7	0.07	1
3	5	0.05	1
4	10	0.10	1
5	5	0.05	0.999999997
6	11	0.11	0.999999931
7	13	0.13	0.999999279
8	13	0.13	0.999995777
9	10	0.10	0.999983298
10	12	0.12	0.999949825

Определяется

$$\chi^2 = \sum_1^k \frac{(\hat{P}_i - P_i)^2}{P_i} \leq \chi_{\alpha}^2(k-1-\theta), \tag{4}$$

где $\chi_{\alpha}^2(k-1-\theta)$ – допустимое отклонение, $\alpha \ll 1$; θ – количество параметров оцениваемого закона распределения,

$$\chi^2 = \sum_1^k \frac{(\hat{P}_i - P_i)^2}{P_i} \leq 8.11;$$

$$\chi_{0.05}^2(8) = 15.5 .$$

Так как неравенство (4) справедливо, то полученные экспериментальные результаты не противоречат предполагаемому теоретическому закону распределения.

с) Как принято в математической статистике, формулируются две конкурирующие гипотезы:

H_0 : среднее время наработки на отказ соответствует техническим требованиям ($t^* = T_0$);

H_1 : обратное утверждение ($t^* \neq T_0$).

д) Решение о справедливости той или иной гипотезы принимается по правилу Неймана–Пирсона.

2. Решение

а) Выборка – это точка в r -мерном пространстве Y (рис. 1).

До начала испытаний пространство выборки надо разбить на два подпространства в соответствии с принятым правилом решения:

$$\text{если } (y_1, \dots, y_r) \in y_r^{(H_0)} \xrightarrow{\gamma_0} H_0 ;$$

$$\text{если } (y_1, \dots, y_r) \in y_r^{(H_1)} \xrightarrow{\gamma_1} H_1 , \quad (5)$$

где γ_0 – решение в пользу гипотезы H_0 , а γ_1 – в пользу гипотезы H_1 .

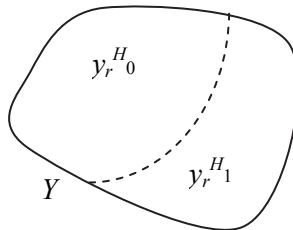


Рис. 1. Пространство выборки Y

При этом возможны и ошибочные решения:

– ошибка первого рода: γ_0/H_1 (принятие ошибочного решения об истинности гипотезы H_0) – риск заказчика;

– ошибка второго рода: γ_1/H_0 – риск изготовителя.

Соответственно, правильные решения имеют вид γ_0/H_0 и γ_1/H_1 .

б) Согласно правила Неймана–Пирсона:

– риск заказчика $\alpha = P\{\gamma_0/H_1\}$ (вероятность ошибок первого рода задается заказчиком);

– риск изготовителя $\beta = P\{\gamma_1/H_0\}$ (вероятность ошибок второго рода минимизируется изготовителем).

Показатель качества решения: $(1-\beta) = P\{\gamma_1/H_1\}$ – вероятность правильного решения о том, что изделие плохое.

Для облегчения расчетов рекомендуется принимать стандартные значения вероятностей ошибок. Допустим, $\alpha = 0.05$.

Вычисляем отношение правдоподобия

$$L(y_1, y_2, \dots, y_r) = \frac{w_r(y_1, \dots, y_r / H_0)}{w_r(y_1, \dots, y_r / H_1)}. \quad (6)$$

Это дает возможность преобразовать правило решения в r -мерном пространстве (5) в правило решения в одномерном пространстве, когда отношение правдоподобия сравнивается с некоторым порогом:

решение $\gamma_0 : H_0$, если $L(y_1, \dots, y_r) \geq C$,

решение $\gamma_1 : H_1$, если $L(y_1, \dots, y_r) \leq C$.

с) Определяем порог C для правила Неймана–Пирсона.

Порог C определяется через заданное значение α следующим образом:

$$\alpha = P\{\gamma_0/H_1\} = P\{L(y_1, \dots, y_r) \geq C/H_1\}. \quad (7)$$

Перепишем правило (6) в виде

$$\ln L(y_1, \dots, y_r) \geq \ln C. \quad (8)$$

Тогда

$$\ln L(y_1, \dots, y_r) \geq \ln \prod_{i=1}^r \frac{w_1(y_i/H_0)}{w_1(y_i/H_1)} = \sum_{i=1}^r \ln \left(\frac{w_1(y_i/H_0)}{w_1(y_i/H_1)} \right),$$

если y_i независимы, то

$$w_r(y_1, \dots, y_r/H_0) = \prod_{i=1}^r w_1(y_i/H_0).$$

При условии замены отказавших систем (процедура $[n, B, r]$)

$$w_1(y_i/H_0) = \frac{n}{T_0} e^{-\frac{n}{T_0} y_i}, \quad (9)$$

где $\lambda_0 = \frac{1}{T_0}$ – допустимая интенсивность отказов хороших изделий. Для данной задачи допустимо положить $T_0 = 1000$ ч. Тогда возможно для примера рассчитать

$$w_1(y_i/H_0) = \frac{1 \text{ шт.}}{1000 \text{ ч}} e^{\frac{1 \text{ шт.}}{1000 \text{ ч}} \cdot 1298} = 0.0003.$$

И обратное

$$w_1(y_i/H_1) = \frac{n}{T_1} e^{-\frac{n}{T_1} y_i},$$

где $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} > \lambda_0$ – интенсивность отказов изделий, не удовлетворяющих техническим условиям. Для данной задачи допустимо положить $T_1 = 100$ ч.

Тогда

$$\frac{w_1(y_i/H_0)}{w_1(y_i/H_1)} = \frac{T_1}{T_0} e^{-ny_i \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right)},$$

и отношение правдоподобия принимает вид

$$\begin{aligned} \ln L(y_1, \dots, y_r) &= \sum_{i=1}^r \left\{ \ln \frac{T_1}{T_0} - ny_i \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right\} = \\ &= r \ln \frac{T_1}{T_0} + n \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right] \sum_{i=1}^r y_i = r \ln \frac{T_1}{T_0} + \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) t_{\Sigma}. \end{aligned} \quad (10)$$

Правило решения (8) с учетом (10) принимает вид

$$t_{\Sigma} \geq K.$$

где порог

$$K = f(C) = \frac{C - r \ln \frac{T_1}{T_0}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}}. \quad (11)$$

d) Порог K может быть определен с помощью таблиц распределения χ^2 . Для этого перепишем (5) в виде

$$P\{t_{\Sigma} \geq K/H_1\} = \alpha \quad (12)$$

и преобразуем переменную t_{Σ} так, чтобы новая переменная имела нормированное распределение χ^2 .

Известно, что $t_{\Sigma} = \sum y_i$ – это сумма экспоненциально распределенных случайных величин y_i

$$t_{\Sigma} = 116\,889 \text{ ч,}$$

тогда оценка среднего времени безотказной работы

$$t^* = t_{\Sigma}/r = 1168,89 \text{ ч.}$$

Следовательно, t_{Σ} имеет ненормированное распределение χ^2 . Для его нормирования надо ввести новую переменную $\tau = \left(\frac{2t_{\Sigma}}{t^*}\right)$.

Тогда с учетом того, что гипотеза H_1 соответствует среднему времени наработки на отказ $t^* = T_1$, вероятность (12) принимает вид

$$P\left\{\frac{2t_{\Sigma}}{t^*} \geq \frac{2K}{T_1}\right\} = \alpha \quad \text{или} \quad P\left\{\tau \geq \frac{2K}{T_1}\right\} = \alpha,$$

где τ имеет $\chi^2(2r)$ распределение с $2r$ степенями свободы.

На этом распределении (рис. 2) $\frac{2K}{T_1} = \chi_{\alpha}^2(2r)$, что соответствует $\alpha\%$ – точке распределения $\chi^2(2r)$.

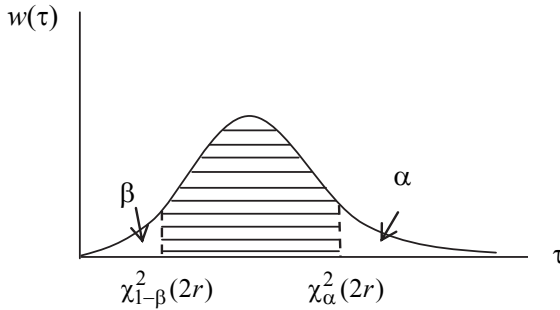


Рис. 2. α % и $(1 - \beta)$ % точки $\chi^2(2r)$ распределения

Следовательно, порог для проверки соответствия выборки (5) $T_{\text{ср}} = 1000$ ч равен

$$K = \frac{T_1}{2} = \left[\chi^2_{\alpha}(2r) \right] = 116\,697 \text{ ч.}$$

И так как t_{Σ} в нашем случае получилось больше порога K , принимаем решение, что данная РЭС соответствует стандарту, заданному заказчиком.

е) Для порога решения найдем риск изготовителя β , значение которого для правила Неймана–Пирсона будет минимальным.

Согласно правилу Неймана–Пирсона и уравнению (11)

$$\beta = P\{\gamma_1/H_0\} \text{ или } \beta = P\{t_{\Sigma} < K/H_0\}.$$

Переходим к нормированному распределению $\chi^2(2r)$:

$$\beta = P\left\{ \frac{2t_{\Sigma}}{T_0} < \frac{2K}{T_0} \right\} \text{ или } \beta = P\left\{ \tau < \frac{2K}{T_0} \right\},$$

где $\frac{2K}{T_0} = \chi^2_{(1-\beta)}(2r)$, что соответствует $(1-\beta)$ % – точке распределения $\chi^2(2r)$, рис. 2.

В данном примере $\beta \approx 5 \cdot 10^{-7}$.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена процедура испытаний опытной партии РЭС $[n, B, r]$ и определены следующие показатели надежности:

- оценка среднего времени безотказной работы;
- коэффициент соответствия выборки заданным производителем параметрам;
- оценка риска производителя для данного опытного образца.

Из проведенных испытаний можно сделать вывод, что рассматриваемый образец соответствует требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жаднов В.В., Полесский С.Н.* Проектная оценка надежности радиотехнических систем // Надежность и качество: труды международного симпозиума: в 2 т. / под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – Т. 1. – С. 24–29.

2. *Филиппов Б.И.* Априорный анализ надежности радиотехнических систем без восстановления // Известия ВолгГТУ. Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Вып. 12. – 2015. – № 11 (176). – С. 97–103.

3. *Филиппов Б.И.* Апостериорный анализ надежности радиоэлектронных систем // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 4 (176). – С. 81–91.

4. *Филиппов Б.И., Малахова Е.А.* Расчет надежности донной части аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (81). – С. 79–97.

5. *Филиппов Б.И., Малахова Е.А.* Расчет надежности аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (82). – С. 67–91.

6. *Филиппов Б.И., Труш Т.Б.* Расчет надежности радиотехнических систем без восстановления // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (83). – С. 47–68.

7. *Маркин А.В., Полесский С.Н., Жаднов В.В.* Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования // Надежность. – 2010. – № 2 (33). – С. 63–70.

8. *Жаднов В.В., Лазарев Д.В.* Параметры показателей характеристик надежности и их определение // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электротехники и связи имени А.С. Попова. Серия:

Научная сессия, посвященная Дню радио. – М.: Инсвязьиздат, 2005. – Вып. 60-1. – С. 205–207.

9. *Лазарев Д.В., Жаднов В.В.* Практическое использование характеристик надежности при оценке РЭА // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов / под ред. А.И. Громыко, А.В. Сафонова. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2005. – С. 558–564.

10. *Кофанов Ю.Н., Жаднов В.В.* Анализ постепенных отказов при обеспечении живучести РЭА // Теоретические основы живучести информационно-вычислительных и управляющих систем: тезисы докладов второй всесоюзной научно-технической конференции «Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных и управляющих систем». – М.: ВИНТИ., 1988. – Вып. 1. – С. 56.

11. *Жаднов В.В., Савосин В.В., Коваленко Г.Л.* Анализ и обеспечение безотказности ИВЭП при проектировании // Проблемы конструирования, производства и обеспечения качества интегральных радиоэлектронных устройств: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1989. – С. 132–135.

12. *Борковский А.В., Жаднов В.В., Коноплев Я.И.* Автоматизация анализа отказов ИЭТ // Современные методы обеспечения качества и надежности электронных приборов: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1990. – С. 123–125.

13. *Жаднов В.В.* Обеспечение высоких показателей качества и надежности ИВЭП // Системный анализ и принятие решения в задачах автоматизированного обеспечения качества и надежности изделий приборостроения и радиоэлектроники: тезисы докладов Российской научно-технической конференции. – Махачкала: ДПИ, 1991. – С. 112.

14. *Жаднов В.В., Сарафанов А.В.* Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 464 с.

15. Надежность электрорадиоизделий: справочник. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.

16. *Левин Б.Р.* Теория надежности радиотехнических систем. – М.: Советское радио, 1978. – 264 с.

Филиппов Борис Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: Fillippov-boris@rambler.ru

Замятина Юлия Владимировна, студентка Новосибирского государственного технического университета. E-mail: zamiatina.abs323@gmail.com

Calculation of reliability characteristics of radio systems with recovery***B.I. Filippov¹, J.V. Zamiatina²**

¹ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk state technical university, associate professor, candidate of technical science. E-mail: filippov-boris@rambler.ru

² 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk state technical university. E-mail: Zamiatina.abs323@gmail.com

We consider the a posteriori analysis of the reliability of electronic systems (RES) which is performed after production of an experimental batch of equipment to determine its reliability characteristics. These tests are necessary because at the design stage designer does not have the full apparatus of a priori information, which would allow to determine in advance the reliability indicators with sufficiently high reliability. An important source of gathering information about the reliability of the system is the product of the work of data collection in the course of their operation. There are two main types of the reliability tests. One of them - the standard test, which task is to estimate indicators of reliability. It is typical for high-volume products. Another type of test - control tests, which task is to verify compliance with the specifications of the system reliability index. The second test is devoted to this type of work. It is necessary to answer the question whether the characteristics of grade products (produced RESs) specify the requirements laid down specifications for the manufacture of the product. To solve this problem using the mathematical apparatus of the theory of statistical hypotheses. We consider two hypotheses: a hypothesis H_0 – mean time before failure $t^* = T_0$ – specifies the requirements of TU (good product); hypothesis H_1 – mean time before failure $t^* = T_1 < T_0$ – alternative (bad product). The decision on the validity of a hypothesis is accepted by the rule of the Neumann – Pearson. The paper considers the procedure RES pilot lot testing procedure for $[n, B, r]$ and identified the following indicators of reliability: MTBF; sample rate matching parameters specified by the manufacturer; risk assessment for the manufacturer of the test sample. From tests carried out it can be concluded that the sample in question complies with the requirements.

Keywords: electronic systems, test procedures, failure rate, the risk of the customer, the manufacturer of the risk, the average uptime, the duration of the test, Neumann - Pearson rule, criterion χ^2

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-3-83-97

REFERENCES

1. Zhadnov V.V., Poleskii S.N. [Project evaluation of reliability of radio systems]. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma*: v 2 t. [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium: in 2 vol.]. Penza, Penza State University Publ., 2006, vol. 1, pp. 24–29.

* Received 11 July 2016.

2. Filippov B.I. Apriorni analiz nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem bez vosstanovleniya [Apriori reliability analysis of radio systems without restoration]. *Izvestiya VolgGTU. Izvestiya VolgGTU. Seriya Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'*. Vyp. 12 – *News of Volgograd state technical University. Series Electronics, measuring equipment, radio and telecommunications*. Iss. 12, 2015, no. 11 (176), pp. 97–103.

3. Filippov B.I. Aposteriorni analiz nadezhnosti radioelektronnykh sistem [The aposteriori analysis of the reliability of radio systems without restoring]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 4 (176), pp. 81–91.

4. Filippov B.I., Malakhova E.A. Raschet nadezhnosti donnoi chasti apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Calculation of reliability of ground part of the equipment hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 79–97.

5. Filippov B.I., Malakhova E.A. Raschet nadezhnosti apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Calculation of reliability of the equipment hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 67–91.

6. Filippov B.I., Trush T.B. Raschet nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem bez vosstanovleniya [Calculation of reliability of radio systems without recovery]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (83), pp. 47–68.

7. Markin A.V., Poleskii S.N., Zhadnov V.V. Metody otsenki nadezhnosti elementov mekhaniki i elektromekhaniki elektronnykh sredstv na rannikh etapakh proektirovaniya [Methods of assessing the reliability of mechanical and electromechanical components of electronic means in the early stages of design]. *Nadezhnost' – Dependability*, 2010, no. 2 (33), pp. 63–70.

8. Zhadnov V.V., Lazarev D.V. [Parameters indicators of reliability characteristics and their definition]. *Trudy Rossiiskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektrotekhniki i svyazi imeni A.S. Popova. Seriya: Nauchnaya sessiya, posvyashchennaya Dnyu radio* [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electrical Engineering and Communication named after AS Popova. Series: Scientific session dedicated to the Day of radio], 2005, iss. 60-1, pp. 205–207. (In Russian)

9. Lazarev D.V., Zhadnov V.V. [Practical use of the reliability characteristics when evaluating REA]. *Sovremennyye problemy radioelektroniki: sbornik nauchnykh trudov* [Modern Problems of Radio Electronics: collection of scientific papers], 2005, pp. 558–564. (In Russian)

10. Kofanov Yu.N., Zhadnov V.V. [Analysis of gradual failures in ensuring the survivability of REA]. *Teoreticheskie osnovy zhivuchesti informatsionno-vychislitel'nykh i upravlyayushchikh sistem: tezisyy dokladov Vtoroi Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Zhivuchest' i rekonfiguratsiya informatsionno-vychislitel'nykh i upravlyayushchikh sistem"* [Theoretical bases of survivability information computing and control systems. Proceedings Second All-Union Scientific-Technical Conference "Vitality and reconfiguration of data-processing and control systems"]. Moscow, 1988, vol. 1, p. 56. (In Russian)

11. Zhadnov V.V., Savosin V.V., Kovalenko G.L. [Analysis and maintenance of reliability in design IWEP]. *Problemy konstruirovaniya, proizvodstva i obespecheniya kachestva integral'nykh radioelektronnykh utroistv: materialy seminar* [Problems of design, production and quality assurance of integrated radio electronic devices. Materials of the seminar]. Moscow, 1989, pp. 132–135.

12. Borkovskii A.V., Zhadnov V.V., Konoplev Ya.I. [Automating the analysis of failures of electronic devices]. *Sovremennyye metody obespecheniya kachestva i nadezhnosti elektronnykh priborov: materialy seminar* [Modern methods of quality assurance and reliability of electronic devices. Materials of the seminar]. Moscow, 1990, pp. 123–125.

13. Zhadnov V.V. [Ensuring high quality performance and reliability IWEP]. *Sistemnyi analiz i prinyatie resheniya v zadachakh avtomatizirovannogo obespecheniya kachestva i nadezhnosti izdelii priborostroeniya i radioelektroniki: tezisyy dokladov Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [System analysis and decision-making in the problems of the automated ensuring software quality and reliability of the articles of instrumentation and radio electronics. Proceedings Russian scientific and technical conference]. Makhachkala, 1991, pp. 112.

14. Zhadnov V.V., Sarafanov A.V. *Upravlenie kachestvom pri proektirovanii teplonagruzhennykh radioelektronnykh sredstv* [Quality management in the design of heat-loaded radio-electronic means]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004. 464 p.

15. *Nadezhnost' elektroradioizdelii: spravochnik* [Reliability of electric articles: directory]. Moscow, Ministry of Defence of the Russian Federation Publ., 2006. 641 p.

16. Levin B.R. *Teoriya nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem* [Reliability theory of radio systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978, pp. 264.