

Эффективная оценка средней наработки до отказа для плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением

Efficient Estimation of Mean Time to Failure for a Time-Limited Test Plan with Recoverability

Михайлов В.С.^{1*}
Mikhailov V.S.^{1*}

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева», Российская Федерация, Москва

¹ Federal State Unitary Enterprise Central Scientific Research Institute of Chemistry and Mechanics, Russian Federation, Moscow

mvs1956@list.ru



Михайлов В.С.

Резюме. В качестве показателя, характеризующего такое свойство надежности сложного восстанавливаемого изделия, как безотказность, выбирают в соответствии со средней наработкой до отказа (далее – t). С организационной и экономической точек зрения наиболее подходящим для испытаний восстанавливаемых (заменяемых) изделий при условии подчинения наработки до отказа экспоненциальному закону распределения вероятностей является план $NB\tau$, где N – число испытываемых однотипных изделий; τ – наработка (одинаковая для каждого изделия); B – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний восстанавливается. Традиционно в качестве оценки средней наработки до отказа (СНДО) выбирается оценка $t_1 = N\tau/R$, где $R > 0$ – количество наблюдаемых отказов, которые произошли в течение времени τ . Эта оценка является смещенной и, кроме того, если за время испытаний наблюдается небольшое число отказов (порядка нескольких единиц) или не наблюдается, то эта оценка может дать значительную ошибку из-за смещения. За последнее время появились оценки СНДО лишенные указанных недостатков. Однако эти полученные оценки не являются абсолютно эффективными. **Цель работы.** Целью работы является построение более эффективной оценки СНДО для плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением. **Методы.** При сравнении оценок СНДО на эффективность используется простой критерий эффективности смещённых оценок. **Выводы.** 1. Получена эффективная и сбалансированная оценка СНДО. Поиск осуществлялся в классе линейных оценок в соответствии с простым критерием эффективности смещенных оценок для плана с ограниченным временем испытаний и восстановлением отказавших изделий. Полученная оценка СНДО имеет направленность практического применения при испытаниях и эксплуатации однородной продукции различного назначения, в процессе которых отказы не возникали; 2. Из оценок с одинаковой эффективностью следует выбирать оценку с минимальным смещением, а затем попытаться отбалансировать её. 3. Оценке, определенной в классе оценок $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$ с минимальным смещением, начиная с некоторой величины смещения вплоть до нуля, всегда соответствует большая дисперсия. Аналогично, оценке из этого класса с большим смещением всегда соответствует меньшая дисперсия, что не соответствует принципу минимизации функционала на смещенной оценке с уменьшением смещения при поиске эффективных смещенных оценок. Сказанное позволяет сделать более широкий вывод, что использовать дисперсию в качестве характеристики критерия эффективности смещенных оценок в принципе не имеет смысла.

Abstract. As an indicator characterizing such a property of reliability of a complex restored product as failure-free operation, the mean time to failure (hereinafter – t) is selected in accordance with. From the organizational and economic points of view, the most suitable for testing restored (replaceable) products, provided that the mean time to failure is subject to the exponential probability distribution law, is the $NB\tau$ plan, where N is the number of similar products being tested; τ is the operating time (the same for each product); B is the plan characteristic, meaning that the operability of the product is restored after each failure during the testing period. Traditionally, as an estimate of the mean time to failure (MTTF), the estimate $t_1 = N\tau/R$ is chosen, where $R > 0$ is the number of observed failures that occurred during the time τ . This estimate is biased and, in addition, if a small number of failures (of the order of

several units) are observed during the testing period or are not observed, then this estimate can give a significant error due to the bias. Recently, estimates of the SNDO free from the above-mentioned shortcomings have appeared. However, these estimates are not absolutely efficient. Purpose of the work. The purpose of the work is to construct a more efficient estimate of the SNDO for a time-limited test plan with recovery. Methods. A simple efficiency criterion of biased estimates is used to compare SNDO estimates for efficiency. Conclusions. 1. An efficient and balanced estimate of the SNDO has been obtained. The search was carried out in the class of linear estimates in accordance with a simple efficiency criterion of biased estimates for a plan with a time-limited test and recovery of failed products. The obtained SNDO estimate is aimed at practical application in testing and operating homogeneous products for various purposes, during which failures did not occur; 2. Of the estimates with the same efficiency, one should select the estimate with the minimum bias, and then try to balance it. 3. An estimate defined in the class of estimates $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$ with a minimum bias, starting from a certain bias value down to zero, always corresponds to a large variance. Similarly, an estimate from this class with a large bias always corresponds to a smaller variance, which does not correspond to the principle of minimizing the functional on a biased estimate with a decrease in bias when searching for efficient biased estimates. This allows us to draw a broader conclusion that using variance as a characteristic of the efficiency criterion of biased estimates does not make sense in principle.

Ключевые слова: оценка, эффективная оценка, критерий эффективности, план испытаний, смещенные оценки.

Keywords: evaluation, effective evaluation, efficiency criterion, test plan, biased estimates.

Для цитирования: Михайлов В.С. Эффективная оценка средней наработки до отказа для плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением // Надежность. 2025. №2. С. 19-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-2-19-24>

For citation: Viktor S. Mikhailov. Efficient Estimation of Mean Time to Failure for a Time-Limited Test Plan with Recoverability. Dependability 2025;2: 19-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-2-19-24>

Поступила: 17.12.2024 / **После доработки:** 14.05.2025 / **К печати:** 09.06.2025

Received on: 17.12.2024 / **Revised on:** 14.05.2025 / **Print in:** 09.06.2025

Введение

В качестве показателя, характеризующего такое свойство надежности сложного восстанавливаемого изделия, как безотказность, выбирают в соответствии с [1] среднюю наработку до отказа (далее – t). С организационной и экономической точек зрения наиболее подходящим для испытаний восстанавливаемых (заменяемых) изделий при условии подчинения наработки до отказа экспоненциальному закону распределения вероятностей является план типа $NB\tau$, где N – число испытываемых однотипных изделий; τ – наработка (одинаковая для каждого изделия); B – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний восстанавливается (мгновенно) [2]. Традиционно в качестве оценки средней наработки до отказа (СНДО) выбирается оценка $t_l = N\tau/R$, где $R > 0$ – количество наблюдаемых отказов, которые произошли в течение времени τ . Эта оценка является смещенной [2] и, кроме того, если за время испытаний наблюдается небольшое число отказов (порядка нескольких единиц) или не наблюдается, то эта оценка может дать значительную ошибку из-за смещения. За последнее время появились оценки СНДО лишённые указанных недостатков [3, 4]. Однако эти полученные оценки не являются абсолютно эффективными.

Цель работы. Целью работы является построение более эффективной оценки СНДО для плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением.

Методы. При сравнении оценок СНДО на эффективность используется простой критерий эффективности смещённых оценок [3, 4].

Понятия балансировки и абсолютного суммарного смещения [3, 4]. Под суммарным смещением B понимается суммирование смещений по всем возможным величинам параметра $t \in T$,

$$B(\theta(R; N, \tau)) = \int_{t \in T} \{E\theta(R; N, \tau) - t\} dt = \int_{t \in T} b dt.$$

где T – множество всех возможных величин параметра t .

Сформулируем понятие балансировки для оценки параметра t , а именно:

$$\begin{aligned} A(\theta(R; N, \tau)) &= B(\theta(R; N, \tau)) / = \\ &= \int_{t \in T} \{E\theta(R; N, \tau) - t\} dt / = \int_{t \in T} b dt / , \end{aligned}$$

где $/$ – абсолютная величина, суммирование смещений ведется по всем возможным величинам оцениваемого параметра, которые принадлежат некоторому числовому множеству $t \in T$. Балансировка характеризует сбалансированность разностей реализаций оценки θ от оценивае-

мого параметра t в целом по всевозможным величинам, которые может принимать этот параметр t .

Обозначим суммарное смещение одного знака через:

$$K_{>0} = \int_{\{\theta > 0\}} \{E\theta(R; N, \tau) - t\} dt = \int_{b(t) > 0} b dt = B_{>0} - \text{положительное суммарное смещение, где суммирование ведется по тем величинам параметра } t, \text{ для которых выполняется условие } E(\theta) - t > 0;$$

– отрицательное суммарное смещение, взятое по абсолютной величине, где суммирование ведется по тем величинам параметра t , для которых выполняется условие $E(\theta) - t < 0$;

$$K_{<0} = \int_{\{\theta < 0\}} \{E\theta(R; N, \tau) - t\} dt = \int_{b(t) < 0} b dt = -B_{<0} = B_{<0} /$$

– отрицательное суммарное смещение, взятое по абсолютной величине, где суммирование ведется по тем величинам параметра t , для которых выполняется условие $E(\theta) - t < 0$;

$$W = \int_{t \in T} |E\theta(R; N, \tau) - t| dt = \int_{t \in T} |b| dt - \text{абсолютное суммарное смещение (разброс и точность оценки } \theta \text{ относительно параметра } t), \text{ где суммирование смещений, взятых по абсолютной величине, ведется по всем возможным величинам оцениваемого параметра, которые принадлежат некоторому числовому множеству } t \in T.$$

Тогда $A(\theta) = |K_{>0} - K_{<0}|$. Заметим, что для оценки θ балансировка, равная нулю $A = 0$ (или сбалансированность оценки θ), не означает симметрию распределения вероятностей реализаций оценки $\theta(R)$.

Т.к. величины $K_{>0} \geq 0$ и $K_{<0} \geq 0$, то для сбалансированной оценки $A = 0$ выполняется соотношение $K_{>0} = K_{<0}$.

Абсолютное суммарное смещение можно выразить через элементы разности балансировки ($K_{>0} - K_{<0}$) следующим образом $W = K_{>0} + K_{<0}$.

Формулировка простого критерия эффективности смещенных оценок. Выразим через характеристики A и W простой критерий эффективности смещенных оценок как некоторую характеристику $Q = (A + 1) \cdot W$, минимизация которой на предложенных оценках определяет эффективную смещенную оценку [3, 4]. Компоненты построенного критерия легко вычислить через компоненты балансировки $K_{>0}$, $K_{<0}$, а именно: $Q = (|K_{>0} - K_{<0}| + 1) \cdot (K_{>0} + K_{<0})$.

Получение эффективной смещенной оценки СНДО по результатам испытаний, проводимых в соответствии с планом испытаний типа NBт, с использованием простого критерия эффективности смещенных оценок

Заметим, что в классе всех возможных смещенных оценок параметра t (СНДО) экспоненциального закона распределения (впрочем, как и для любого закона распределения) эффективной оценки не существует [5]! Поэтому с целью получения эффективной смещенной оценки СНДО сужают поисковый класс оценок до линейного для параметров плана испытаний N и τ (далее – линейные оценки), а именно:

$(1/t) \cdot \theta(R; N, \tau) = \theta(R; m/t)$, где $t > 0$ – параметр экспоненциального закона распределения наработки до отказа [3, 4].

До настоящего момента наиболее эффективной среди предложенных оценок СНДО для плана испытаний типа

NBт является смещенная и сбалансированная оценка $T_d(R = 0) = 2,4N\tau$, $T_d(R = 1) = 0,35N\tau$, $T_d(R = 2) = 0,3N\tau$, $T_d(R > 2) = N\tau / (R + 1)$, $A = 0$. При выборе оценки T_d в качестве эффективной кроме строгой монотонности учитывалась ее простота.

Найдем более эффективную и сбалансированную оценку параметра t для плана испытаний NBт. Для этого рассмотрим класс линейных оценок, представленных в виде $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$, тогда балансировка $A(\theta)$ для плана испытаний NBт после подстановки оценок класса $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$ имеет вид ($\Delta = N\tau/t$ – параметр пуассоновского распределения):

$$A(\theta) = \int_0^\infty \frac{1}{t} \{E\theta - t\} d\Delta = \int_0^\infty (e^{-\Delta} \sum_{r=0}^\infty \frac{\Delta^{r+1}}{(r+1)!} + e^{-\Delta} \sum_{r=0}^\infty f(r) \frac{\Delta^{r+1}}{r!} - 1) d\Delta /$$

Аналогично и для абсолютного суммарного смещения, а именно:

$$W(\theta) = \int_0^\infty \frac{1}{t} |E\theta - t| d\Delta = \int_0^\infty (e^{-\Delta} \sum_{r=0}^\infty \frac{\Delta^{r+1}}{(r+1)!} + e^{-\Delta} \sum_{r=0}^\infty f(r) \frac{\Delta^{r+1}}{r!} - 1) d\Delta.$$

Заметим, что первая часть суммы под интегралом для $A(\theta)$ или $W(\theta)$ равна $e^{-\Delta} \sum_{r=0}^\infty \frac{\Delta^{r+1}}{(r+1)!} = e^{-\Delta} (e^\Delta - 1) = 1 - e^{-\Delta}$.

Из вида функционалов $A(\theta)$ и $W(\theta)$ следует, что для нахождения более эффективной и сбалансированной оценки $A(\theta) = 0$, чем оценка T_d , необходимо действовать по схеме аналогичной в [3, 4] и рассматривать большое количество членов $f(r)$ суммы под интегралом. В такой постановке решение задачи, нахождения эффективной оценки, становится весьма затруднительным. В такой ситуации единственным способом нахождения эффективной оценки является прямое вычисление на электронной вычислительной машине. Решение получается методом спуска варьированием величинами коэффициентов линейных оценок, представленных в виде $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$.

Балансировка для плана испытаний типа NBт на линейных оценках имеет вид $A(\theta(m, R)) = \int_0^\infty \{E\theta(\Delta, R) - 1\} d\Delta /$, где $\Delta = m/t$, $m = N\tau$ – параметр пуассоновского потока отказов [3, 4]. Аналогично абсолютное суммарное смещение представимо в виде $W(\theta(m, R)) = \int_0^\infty |E\theta(\Delta, R) - 1| d\Delta$.

Эффективная оценка СНДО θ ищется в классе линейных оценок в соответствии с простым критерием эффективности смещенных оценок [3, 4], а именно:

$$Q = (A + 1) \cdot W = (|K_{>0} - K_{<0}| + 1) \cdot (K_{>0} + K_{<0}),$$

$$\text{где } K_{\{\theta>0\}} = \int_{\{\theta>0\}} \{E\theta(\Delta, R) - 1\} d\Delta,$$

$$K_{\{\theta<0\}} = \int_{\{\theta<0\}} \{E\theta(\Delta, R) - 1\} d\Delta.$$

На полученную оценку θ накладывается условие строгой монотонности по всем своим параметрам (N, τ, R) . Кроме того, полученная эффективная оценка должна быть сбалансированной $A(\theta)=0$. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что в соответствии с простым критерием эффективности смещенных оценок наиболее эффективной оказалась оценка θ . Остальные сбалансированные оценки приведены для сравнения [3, 4]. Результаты представлены с точностью до трёх знаков.

Проведем рассуждения о выборе эффективной оценки, основанные на выбранном классе оценок $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$. При получении двух оценок с одинаковой эффективностью следует выбирать оценку с минимальным смещением, а затем попытаться отбалансировать её. С уменьшением смещения оценок вплоть до нуля, начиная с некоторой величины, увеличивается их дисперсия D вплоть до дисперсии эффективной несмещенной оценки. Это следует непосредственно из неравенства Рао–Крамера для смещенных оценок [6]:

$$D(\theta(R)) \geq [1 + b'(\theta)]^2 / i_n(\theta),$$

где $i_n(\theta) = n/t$ – количество информации Фишера для распределения Пуассона.

То есть оценке с минимальным смещением $b(\theta)$, начиная с некоторой величины вплоть до нуля, всегда соответствует большая дисперсия и эта дисперсия всегда будет меньше дисперсии эффективной несмещенной оценки (см. примеры из [3]). Поэтому делать выбор из двух смещенных оценок с одинаковой эффективностью по их дисперсии на указанном классе оценок приведет к ошибочному мнению. Сказанное позволяет сделать

вывод, что использовать дисперсию в качестве характеристики критерия эффективности смещенных оценок не имеет смысла.

Докажем этот факт. Для указанного класса оценок смещение имеет вид

$$b(\theta; t) = E\theta - t = e^{-\Delta} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{N\tau\Delta^r}{(r+1)r!} + e^{-\Delta} \sum_{r=0}^{\infty} f(r) \frac{N\tau\Delta^r}{r!} - t.$$

Построим производную по параметру t :

$$\begin{aligned} b'(\theta; t) &= (e^{-N\tau/t} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(N\tau)^{r+1}}{t^r (r+1)!} + e^{-N\tau/t} \sum_{r=0}^{\infty} f(r) \frac{(N\tau)^{r+1}}{t^r r!} - t)' = \\ &= (e^{-N\tau/t} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(N\tau)^{r+1}}{r! t^r} \left(\frac{1}{r+1} + f(r) \right) - t)' . \end{aligned}$$

Обозначим часть рассматриваемой формулы, независимую от параметра t , через

$$K = \frac{(N\tau)^{r+1}}{r!} \left(\frac{1}{r+1} + f(r) \right). \text{ Так как } f(R=0) > 0 \text{ и по смыслу } f(R>0) < 1/(r+1), \text{ то всегда } K > 0. \text{ Тогда}$$

$$\begin{aligned} b'(\theta; t) &= (e^{-N\tau/t} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{K(r)}{t^{r+1}} - t)' = \\ &= -1 + (N\tau/t^2) e^{-N\tau/t} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{K(r)}{t^{r+1}} + e^{-N\tau/t} \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^{r+1} \frac{K(r)}{t^{2(r+1)}}. \end{aligned}$$

Для краткости и простоты изложения рассмотрим наиболее часто встречающийся случай, когда время испытаний τ совпадает со СНДО $\tau \approx t$, тогда производная от смещения по параметру СНДО примет вид

$$\begin{aligned} b'(\theta; t) &= -1 + (N/t) e^{-N} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{N^{r+1}}{r!} \left(\frac{1}{r+1} + f(r) \right) + \\ &+ e^{-N} \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^{r+1} \frac{N^{r+1}}{r!} \left(\frac{1}{r+1} + f(r) \right) \frac{1}{t^{r+1}}. \end{aligned}$$

Табл. 1. Результаты получения эффективной оценки СНДО

Оценка СНДО	A	W	$Q=(A+1) \cdot W$
$\theta(R=0) = 2,400N\tau,$ $\theta(R=1) = 0,3799N\tau,$ $\theta(R=2) = 0,2628N\tau,$ $\theta(R=3) = 0,2470N\tau,$ $\theta(R=4) = 0,2100N\tau,$ $\theta(R=5) = 0,1710N\tau,$ $\theta(R=6) = 0,1417N\tau,$ $\theta(R=7) = 0,1246N\tau,$ $\theta(R=8) = 0,1110N\tau,$ $\theta(R>8) = N\tau / (R+1)$	0	0,600	0,600
$T_d(R=0) = 2,4N\tau, T_d(R=1) = 0,35N\tau, T_d(R=2) = 0,3N\tau,$ $T_d(R>2) = N\tau / (R+1)$	0	0,624	0,624
$T_B = 2,3N\tau$ при $R=0, T_B=0,35N\tau$ при $R=1$ и $T_B = N\tau/(R+1)$ при $R>1$	0	0,635	0,635
$T_C = 2,25N\tau$ при $R=0, T_C=0,375N\tau$ при $R=1$ и $T_C = N\tau/(R+1)$ при $R>1$	0	0,65	0,65
$T_A = 2,2N\tau$ при $R=0, T_A=0,4N\tau$ при $R=1$ и $T_A = N\tau/(R+1)$ при $R>1$	0	0,665	0,665
$T_l(R=0) = 2n\tau, T_l(R>0) = n\tau / (R+1)$	0	0,736	0,736

Табл. 2. Величины производной от смещения по параметру СНДО $b'(\theta; t)$ для различных вариантов оценок из указанного выше класса при $N = 5$ и для пяти различных величин параметра СНДО t , выраженных в часах

Оценка	$t=10^2$	$t=10^3$	$t=10^4$	$t=10^5$	$t=10^6$	Нормированная суммарная дисперсия D
T_l	-1	-1	-1	-1	-1	8,80
T_A	-10,2944	-1,9277	-1,0927	-1,0092	-1,0009	9,96
T_C	-117,18	-12,5971	-2,1595	-1,1159	-1,0115	10,30
T_B	-14,9416	-2,3916	-1,1391	-1,0139	-1,0013	10,65
T_D	-20,0947	-2,9069	-1,1906	-1,019	-1,0019	11,34
θ	-21,1823	-3,0162	-1,2016	-1,0201	-1,002	11,35

В табл. 2 приведены величины производной от смещения по параметру СНДО $b'(\theta; t)$ для различных вариантов оценок из указанного выше класса при $N = 5$ и для пяти различных величин параметра СНДО t .

Из табл. 2 можно сделать вывод, что производная от смещения по параметру СНДО $b'(\theta; t)$ для указанного класса оценок $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$ всегда меньше нуля. Что доказывает выше сказанное. В последней графе представлены нормированные суммарные дисперсии указанных оценок. Наибольшей дисперсией обладает наиболее эффективная оценка θ , а наименьшей дисперсией – наименее эффективная оценка T_l . Что ещё раз подтверждает сделанные выводы. Заметим, что характер изменения величин дисперсий смещенных оценок имеет тенденцию к сближению с дисперсией наиболее эффективной оценки θ ($D = 11,35$) снизу с уменьшением смещения $b(\theta)$. Что позволяет сделать вывод на основе неравенства Рао – Крамера об абсолютной эффективности оценки θ в пределах рассматриваемого класса оценок $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$.

Таким образом оценке, определенной в классе линейных оценок $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$ с минимальным смещением, начиная с некоторой величины смещения вплоть до нуля, всегда соответствует большая дисперсия. Аналогично, оценке из этого класса с большим смещением всегда соответствует меньшая дисперсия, что не соответствует принципу минимизации функционала на смещенной оценке с уменьшением смещения при поиске эффективных смещенных оценок. Сказанное позволяет сделать более широкий вывод, что использовать дисперсию в качестве характеристики критерия эффективности смещенных оценок в принципе не имеет смысла.

Тот единственный случай, когда дисперсия играет свою роль при сравнении смещенных оценок на эффективность, это когда две смещенные оценки имеют одинаковые величины эффективности и равные по величине балансировки, представляется практически невыполнимым, так как всегда можно найти более эффективную оценку в классе всех смещенных оценок.

Заметим, что минимизация функционала $Q(\theta)$ решается при строгой монотонности оценки θ по

всем своим параметрам, что резко сужает поисковый класс оценок. Однако это не единственное условие, как может показаться. Формальная сторона строгой монотонности может привести к парадоксальному случаю, когда смещенная оценка лишь формально удовлетворяет этим условиям $\theta(R) > \theta(R+1)$ для всех реализаций R , а по сути своей $\theta(R) \approx \theta(R+1)$. В этих случаях оценка $\theta(R)$ должна отвергаться. И в дополнение к строгой монотонности приходит инженерный подход, когда добиваются, чтобы оценка $\theta(R)$ не противоречила здравому смыслу и была удобной в использовании, а полезность удобной оценки очевидна. Заметим, что инженерный подход еще больше сужает поисковый класс оценок.

Сказанное позволяет считать, что скорее всего полученная оценка $\theta(R)$ является предельной по своей эффективности на рассматриваемом классе оценок.

Выводы

Получена эффективная и сбалансированная оценка СНДО. Поиск осуществлялся в классе линейных оценок в соответствии с простым критерием эффективности смещенных оценок для плана с ограниченным временем испытаний и восстановлением отказавших изделий. Полученная оценка СНДО имеет направленность практического применения при испытаниях и эксплуатации однородной продукции различного назначения, в процессе которых отказы не возникали.

Из оценок с одинаковой эффективностью следует выбирать оценку с минимальным смещением, а затем попытаться отбалансировать её.

Оценке, определенной в классе линейных оценок $\theta = (N\tau/(R+1)) + N\tau f(R)$ с минимальным смещением, начиная с некоторой величины смещения вплоть до нуля, всегда соответствует большая дисперсия. Аналогично, оценке из этого класса с большим смещением всегда соответствует меньшая дисперсия, что не соответствует принципу минимизации функционала на смещенной оценке с уменьшением смещения при поиске эффективных смещенных оценок. Сказанное позволяет сделать более широкий вывод, что использовать дисперсию в качестве характеристики критерия

эффективности смещенных оценок в принципе не имеет смысла.

Список литературы

1. ГОСТ Р 27.003-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по заданию технических требований к надежности. М.: Стандартинформ, 2013 – 15 с.

2. Е.Ю. Барзилович, Ю.К.Беляев, В.А. Каштанов и др. Вопросы математической теории надежности.; под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.

3. Михайлов В.С. Критерий эффективности смещенных оценок в теории надежности. – М.: Изд-во ФГУП «ЦНИИХМ», 2024. – 260 с.

4. Михайлов В.С. Простой критерий эффективности смещенных оценок. //Надежность. 2024. № 1. С. 25 – 33.

5. Ясногородский Р.М. Теория вероятностей и математическая статистика: уч. пособие. СПб.: Научные технологии, 2019. 320 с.

6. Шуленин В.П. Математическая статистика. Ч. 1. Параметрическая статистика / В.П. Шуленин. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. 540 с.

References

1. GOST R 27.003-2011: Reliability in Engineering. Reliability Management. Guidelines for Setting Technical Requirements for Reliability.” Moscow: Standardinform, 2013. 15 p.

2. E. Yu. Barzilovich; Yu. K. Belyaev; V. A. Kashtanov, et al., “Issues of Mathematical Theory of Reliability,” ed. by B. V. Gnedenko. Moscow: Radio and Communication, 1983. 376 p.

3. Mikhailov, V. S. “Efficiency Criterion of the Shifted Estimations in the Reliability Theory.” Moscow: FGUP “TsNIIHM,” 2024. 260 pp.

4. Mikhailov, V. S. “Simple criterion of efficiency of the shifted estimations.” In Reliability. 2024. No. 1. pp. 25-33.

5. R. M. Yasnogorodskiy. Theory of Probabilities and Mathematical Statistics: Study Guide. St. Petersburg: Science-Intensive Technologies, 2019. 320 pp.

6. Shulenin, V. P. Mathematical Statistics. Ch. 1. Parametric Statistics. Tomsk: NTL, 2012. 540 pp.

Сведения об авторе

Виктор Сергеевич Михайлов – ведущий инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева» (ФГУП «ЦНИИХМ»). Адрес: ул. Нагатинская, д. 16а, Москва, Российская Федерация, 115487, e-mail: Mvs1956@list.ru

About the author

Viktor S. Mikhailov, Lead Engineer, Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (CNIIMH). Address: 16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487, Russian Federation, e-mail: Mvs1956@list.ru.

Вклад автора в статью:

Получена эффективная и сбалансированная оценка СНДО. Поиск осуществлялся в классе линейных оценок в соответствии с простым критерием эффективности смещенных оценок для плана с ограниченным временем испытаний и восстановлением отказавших изделий. Сделаны выводы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.