
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 629.7.01

**АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОНТРОЛЯ ЕГО АГРЕГАТОВ**

© 2024 г. О. В. Тушавина¹, В. В. Родченко¹, А. А. Золотов¹,
Е. В. Гусев^{1,*}, П. Ф. Пронина¹

¹*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Россия, Москва
e-mail: ccg-gus@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2024 г.
после доработки 06.06.2024 г.
Принята к публикации 15.06.2024 г.

В статье на основе синтеза и совершенствования существующих методов предложена модель прогнозирования, включающая в себя алгоритм проверки работоспособности изделия по результатам контроля его агрегатов. Разработаны модели прогнозирования параметров контроля сложных технических систем и методы оптимизации числа испытаний агрегатов технических систем при проведении контроля их работоспособности. Эффективность предложенного алгоритма прогнозирования работоспособности продемонстрирована на примере. Материалы и результаты статьи можно использовать инженерным работникам конструкторских бюро, научно-исследовательских институтов и научно-производственных объединений в процессе проектирования высоконадежных систем.

Ключевые слова: надежность, экспериментальная отработка, число испытаний, контроль работоспособности

DOI: 10.31857/S0235711924050148, **EDN:** NSZVYQ

Разработаны подходы к решению проблемы прогнозирования и планирования эксплуатации в условиях неполной достоверности исходной информации и ее дефицита, которые обеспечивают достаточно надежные результаты. Один из таких подходов — метод индивидуального гарантированного прогноза [1, 2], основная идея которого заключается в выборе «наихудших» вариантов из множества возможных реализаций случайного процесса деградации свойств исследуемого технического объекта, согласующихся и непротиворечащих результатам контроля. Методы прогнозирования надежности на этапе экспериментальной отработки изложены в работах [3–5]. В работе [6] рассмотрены вопросы согласования проектных решений технических систем с мероприятиями по их обслуживанию при хранении.

В статье разработаны методы и модели контроля работоспособности технических систем (ТС), соответствующие этапу выходного контроля при производстве изделия, а также стадии проверки изделия перед его применением.

Постановка задачи. При проведении контроля работоспособность изделия определяется по факту удовлетворения требований, предъявляемых к его надежности. Очевидно, контроль сложных технических систем (ТС) должен охватывать все уровни начиная от элементов и подсистем и заканчивая контролем всего изделия. В ста-

ть рассматривается задача контроля работоспособности ТС, соответствующая этапу выходного контроля при производстве изделия, а также на стадии проверки изделия перед его применением.

Решение задачи заключается в определении объема контрольных испытаний для различных агрегатов ТС. При этом предполагается, что известны объемы испытаний, проведенные на предшествующих этапах экспериментальной отработки, обеспечивающие требуемый уровень их надежности. Необходимо уточнить формулу оценки общего риска при принятии бракованного изделия.

В дальнейшем рассмотрим приближенное выражение для оценки суммарного риска β_Σ принятия бракованного изделия, при контроле отдельных агрегатов изделия β_i

$$\beta_\Sigma \approx \sum_{i=1}^m \beta_i,$$

где β_i — величина риска при контроле отдельных агрегатов изделия; m — число агрегатов в составе изделия.

Рассматриваемая оценка β_Σ является гарантированной, т.к. оценка суммарного риска проводится без учета проверки изделия в целом, проведение которой приводит к уменьшению величины β_Σ [1].

Оценка риска принятия ошибочных решений для агрегатов изделия. При оценке риска принятия ошибочных решений при контроле отдельных агрегатов β_i будем считать, что для каждого агрегата можно оценить математическое ожидание коэффициента запаса, обеспечивающего удовлетворение заданных требований по надежности. В случае нормального закона распределения параметров работоспособности математическое ожидание коэффициента параметрического запаса удовлетворяет соотношению [2]

$$m_{\eta,i} = \frac{\eta_i}{\left(1 - \frac{t_{\gamma,i} k_{V,i}}{\sqrt{n_i}}\right)}, \quad (1)$$

где $m_{\eta,i}$ — оценка математического ожидания коэффициента запаса i -го агрегата, соответствующая надежности подтвержденной на этапе экспериментальной отработки; $\eta_i = \frac{1}{1 - \arg F^* \{h_i\} k_{V,i}}$ — оценка коэффициента запаса, соответствующая за-

данной надежности агрегата; $k_{V,i}$ — коэффициент вариации коэффициента запаса; n_i — число испытаний, проведенных на этапе экспериментальной отработки; $t_{\gamma,i}$ — аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий принятому уровню доверительной вероятности γ ; h_i — заданный уровень надежности i -го агрегата.

Поэтому основная цель прогнозирования заключается в вычислении необходимого объема проверочных испытаний на основе известных значений математического ожидания коэффициента запаса агрегатов.

Для оценки риска принятия ошибочных решений при контроле отдельных агрегатов изделия β_i рассмотрим области отработки агрегата (рис. 1) [2]. Согласно результатам, полученным в работе [2], если значение точечной оценки математического ожидания коэффициента запаса m_{η} лежит в области подтверждения надежности, то заданные требования к надежности удовлетворяются с вероятностью γ . Следовательно с вероятностью $\beta_i = 1 - \gamma$ надежность может быть ниже требуемой. Таким образом β характеризует вероятность принятия изделия, не удовлетворяющего заданным требованиям по надежности, т.е. вероятность принятия брака.

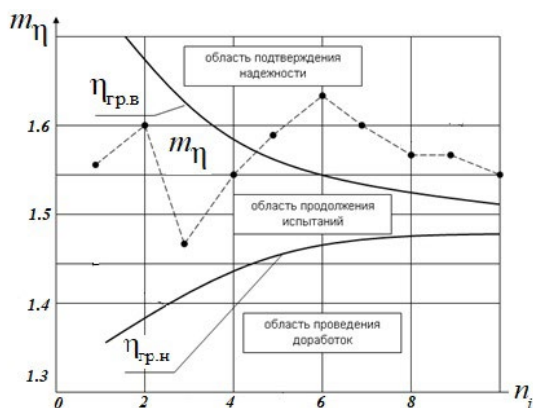


Рис. 1. Области принятия решений по результатам испытаний: 1 — $\eta_{гр.в}$; 2 — m_{η} ; 3 — $\eta_{гр.н}$.

Для того чтобы оценить вероятность брака β , необходимо проанализировать доверительную вероятность γ . Для этой цели мы воспользуемся соотношением (1), применяемым к параметрам управления.

Разрешая это соотношение относительно $t_{\gamma,i}$, найдем

$$t_{\gamma,i} = \frac{\sqrt{n_i}}{k_{V,i} * m_{\eta,i}} \left(m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} t_{h,i}} \right), \quad (2)$$

где $m_{\eta,i}$ — оценка математического ожидания коэффициента запаса агрегата; $t_{h,i}$ — аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий уровню надежности h_i ; $k_{V,i}$ — коэффициент вариации коэффициента запаса; n_i — число испытаний, проведенных на этапе контроля; $t_{\gamma,i}$ — аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий уровню доверительной вероятности γ_i .

Отсюда

$$\beta_i = 1 - F^* \{ t_{\gamma,i} \}. \quad (3)$$

Оптимизация рисков принятия ошибочных решений и объемов испытаний отдельных агрегатов изделия. Как видно из соотношений (2) и (3) риск принятия браковочного агрегата зависит от характеристик надежности агрегата и объема его контрольных испытаний.

В дальнейшем рассмотрим задачу оптимального распределения объема испытаний для различных агрегатов, обеспечивающих заданные требования по уровню суммарного риска при минимальных затратах на проведение контроля.

Последние можно представить в виде

$$C(n_i) = \sum_{i=1}^m C_i * n_i + C_{\text{пр}},$$

где C_i — затраты на проведение одного испытания i -го агрегата; $C_{\text{пр}}$ — прочие затраты; n_i — число испытаний i -го агрегата; m — число систем в составе изделия.

Как было показано величину суммарного риска β_{Σ} без учета проверки агрегата в целом можно оценить по соотношению

$$\beta_{\Sigma} \approx \sum_{i=1}^m \beta_i = \sum_{i=1}^m F^* \{-t_{\gamma,i}\},$$

где $t_{\gamma,i} = d_i \sqrt{n_i}$; $d_i = \frac{m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} * t_{h,i}}}{k_{V,i} * m_{\eta,i}}$; $t_{h,i} = \arg F^* \{h_i\}$; h_i — заданные требования к надежности i -го агрегата.

Для решения задачи оптимизации параметров контроля использовался метод Лагранжа. В рассматриваемом случае функция Лагранжа примет вид

$$L = \sum_{i=1}^m C_i n_i + \lambda (\beta_{\Sigma} - \beta_{\text{ЗАД}}),$$

где C_i — затраты на проведение одного испытания i -го агрегата; n_i — число испытаний i -го агрегата; λ — неопределенный множитель Лагранжа; $\beta_{\text{ЗАД}}$ — заданный уровень суммарного риска.

Оптимальные объемы испытаний удовлетворяют системе алгебраических уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial n_i} = C_i - \lambda \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \frac{d_i}{\sqrt{n_i}} = 0.$$

Разрешая полученное соотношение относительно $\sqrt{n_i}$, приходим к искомому соотношению

$$\sqrt{n_i(\lambda)} = \left[\frac{\lambda}{C_i} \frac{d_i}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right].$$

Оптимальные параметры выходного контроля соответствуют значению λ^* , для которого выполняется дисциплинирующее условие

$$\beta_{\text{ЗАД}} \approx \sum_{i=1}^m \beta(n_i).$$

Поставленную задачу можно решить методом перебора по параметру λ . Для принятого значения λ_j оценивается оптимальный объем испытаний по каждому агрегату

$$\sqrt{n_i} = \left\{ \frac{\lambda_j}{C_i} \frac{\frac{m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} t_{h,i}}}{2 k_{V,i} m_{\eta,i}}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right\}.$$

Параметр $t_{\gamma,i}$ находится методом последовательных приближений по соотношениям

$$t_{\gamma,i} = d_i \sqrt{n_i(\lambda)} = \left[\frac{\lambda}{C_i} \frac{d_i^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right],$$

где $d_i = \frac{m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} * t_{h,i}}}{k_{V,i} * m_{\eta,i}}$; $t_{h,i} = \arg F^* \{h_i\}$.

Программа в mathcad и результаты расчета $t_{\gamma,i} = U_i$ для трех агрегатов, входящих в состав изделия, представлены на рис. 2.

$$\begin{aligned}
 &U := \begin{cases} \text{for } i \in 0..2 \\ \text{for } j \in 0 \\ U_{i,0} \leftarrow 2.7 \\ \text{for } i \in 0..2 \\ \text{for } j \in 0..6 \\ \left[2 \cdot \ln \left[\frac{\lambda}{c_i} \cdot \frac{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v \cdot t_i} \right)^2}{\frac{(v \cdot \eta_i)}{\sqrt{2 \cdot \pi}}} \right] - 2 \cdot \ln(U_{i,j}) \right]^{0.5} \\ U_{i,j+1} \leftarrow \end{cases} \\
 &U = \begin{pmatrix} 2.7 & 3.359 & 3.293 & 3.299 & 3.299 & 3.299 & 3.299 & 3.299 \\ 2.7 & 2.852 & 2.832 & 2.835 & 2.834 & 2.834 & 2.834 & 2.834 \\ 2.7 & 2.379 & 2.432 & 2.423 & 2.424 & 2.424 & 2.424 & 2.424 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Программа проведения последовательных приближений.

При написании программы были приняты следующие обозначения: $\eta_i = m_{\eta, i}$, $t_i = t_{h, i}$, $v = k_{V, i}$.

Зависимость $\beta(\lambda)$ представлена на рис. 3.

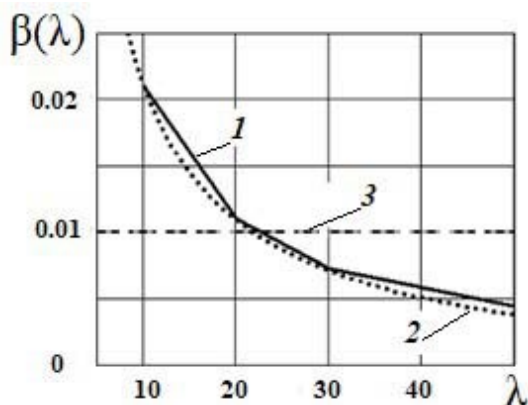


Рис. 3. Изменения суммарного риска по параметру λ : 1 — $\beta(\lambda)$; 2 — $\gamma(\lambda)$; 3 — $\beta_{3AD} = 10^{-2}$.

На графике введены следующие обозначения: $\gamma(\lambda)$ — аппроксимирующая кривая; $\beta(\lambda)$ — расчетная кривая; $\beta_{3AD} = 0.01$ — заданный уровень риска для изделия в целом.

Как видно из графика требуемое значение $\beta_{3AD} = 0.01$ удовлетворяется при значении $\lambda = 20.5$. Для найденного значения λ риски принятия ошибочных решений оцениваются по соотношениям

$$\beta_i = \left[1 - \int_{-\infty}^{U_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right],$$

где $U_i = t_{V, i}$.

Потребные объемы испытаний рассчитываются по соотношению

$$n_i = \left[\frac{U_i}{\frac{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v_i t_i} \right)}{v_i \eta_i}} \right]^2,$$

где $k_{V, i} = v_i$.

Оптимизация суммарной вероятности брака. Полученные результаты позволяют оценивать оптимальную суммарную вероятность брака для всего изделия. Очевидно оптимальное значение β_Σ должно обеспечивать минимум суммарных затрат

$$C_\Sigma(\lambda) = \sum_{i=1}^m C_i n_i(\lambda) + C_{\text{ущ}} \beta_\Sigma(\lambda),$$

где C_i — затраты на проведение одного испытания при контроле i -го агрегата; $C_{\text{ущ}}$ — величина ущерба, обусловленного ошибкой контроля.

Задача решается методом перебора значений λ и графической оценкой оптимального уровня множителя Лагранжа, соответствующего минимальным затратам. Характер изменения суммарных затрат при $C_{\text{ущ}} = 100$ представлен на рис. 4а.

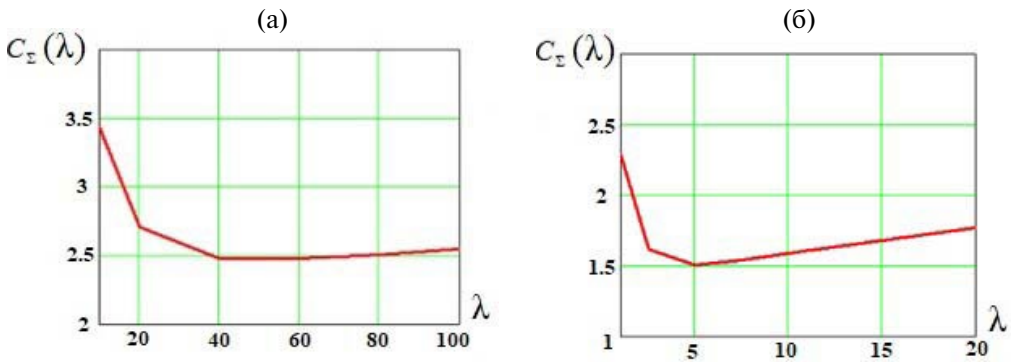


Рис. 4. Изменение суммарных затрат $C_\Sigma(\lambda)$ по множителю Лагранжа:
(а) — $C_{\text{ущ}} = 100$; (б) — $C_{\text{ущ}} = 10$.

Характер изменения суммарных затрат при $C_{\text{ущ}} = 10$ представлен на рис. 4б. В рассматриваемом случае минимум затрат достигается при значении $\lambda = 5$, которому соответствует величина суммарного риска равная $\beta_\Sigma = 0.04$. Последовательность проведения расчетов по предлагаемому подходу представлена в алгоритме прогнозирования работоспособности изделия по результатам контроля его агрегатов.

Алгоритм прогнозирования работоспособности изделия по результатам контроля его агрегатов.

Исходные данные:

$C_{\text{ущ}}$ — ущерб при отказе агрегатов;

C_i — затраты на проведение одного испытания при контроле агрегата;

t_γ — аргумент функции нормированного нормального распределения, соответствующий принятому уровню доверительной вероятности γ ($t_\gamma = \arg F^*\{\gamma\}$);

$k_{V,i}$ — коэффициент вариации коэффициента запаса;

h_i — уровень надежности агрегата, подтвержденной на этапе экспериментальной отработки.

$\beta_{\text{зАд}}$ — заданный уровень риска для изделия в целом;

n_i — число испытаний на этапе экспериментальной отработки.

Расчет параметра $m_{\eta,i}$.

$$m_{\eta,i} = \frac{\eta_i}{\left(1 - \frac{t_\gamma k_{V,i}}{\sqrt{n_i}}\right)},$$

где $m_{\eta,i}$ — оценка математического ожидания коэффициента запаса i -го агрегата, соответствующая надежности подтвержденной на этапе экспериментальной

отработки; $\eta_i = \frac{1}{1 - \arg F^* \{h_i\} k_{V,i}}$ — оценка коэффициента запаса, соответствующая заданной надежности агрегата.

Расчет параметра $t_{\gamma,i} = U_i$.

Параметр $t_{\gamma,i}$ находится методом последовательных приближений по соотношению

$$t_{\gamma,i} = d_i \sqrt{n_i(\lambda)} = \left[\frac{\lambda}{C_i} \frac{d_i^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\gamma,i}^2}{2}} \right],$$

$$d_i = \frac{m_{\eta,i} - \frac{1}{1 - k_{V,i} t_{h,i}}}{k_{V,i} m_{\eta,i}}; t_{h,i} = \arg F^* \{h_i\},$$

где n_i — число испытаний на этапе контроля.

Расчет процента брака отдельных агрегатов.

$$\beta_i = \left[1 - \int_{-\infty}^{U_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right],$$

где $U_i = t_{\gamma,i}$.

Расчет числа испытаний агрегатов.

$$n_i = \left[\frac{U_i}{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v_i t_i} \right)} \right]^2,$$

где $k_{V,i} = v_i$.

Расчет процента брака изделия в целом.

$$\beta_{\Sigma} \approx \sum_{i=1}^m \beta_i.$$

Оценка значения множителя Лагранжа λ^* . Строится зависимость $\beta_{\Sigma}(\lambda_j)$ (рис. 5).

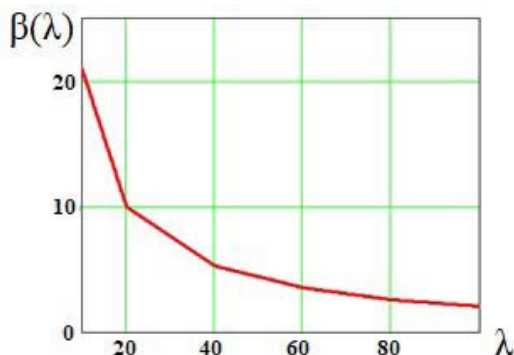


Рис. 5. Изменение риска по параметру λ .

Множитель Лагранжа λ^* находится из условия обеспечения заданного уровня суммарного процента брака: $\beta_{\Sigma}(\lambda^*) = \beta_{\text{ЗАд}}$. Для принятого значения параметра λ^* находим параметры контроля β_i, n_i , обеспечивающие удовлетворение требуемого уровня процента брака изделия.

Оптимизация суммарного риска. Расчет суммарных затрат

$$C_{\Sigma}(\lambda) = \sum_{i=1}^m C_i n_i(\lambda) + C_{\text{ущ}} \beta_{\Sigma}(\lambda).$$

Построение зависимости затрат от множителя Лагранжа для различных значений ущерба при отказе представлено на рис. 6а, б.

Оптимальный уровень множителя Лагранжа, соответствует минимальным затратам.

Пример расчета работоспособности изделия по результатам контроля его агрегатов на основе предложенного алгоритма.

Исходные данные: $\lambda = 100$, $c_0 = 0.05$, $c_1 = 0.2$, $c_2 = 0.5$, $v = 0.1$, $\eta_0 = 1.4$, $\eta_1 = 1.6$, $\eta_2 = 1.8$, $t_0 = 2$, $t_1 = 2.5$, $t_2 = 3$.

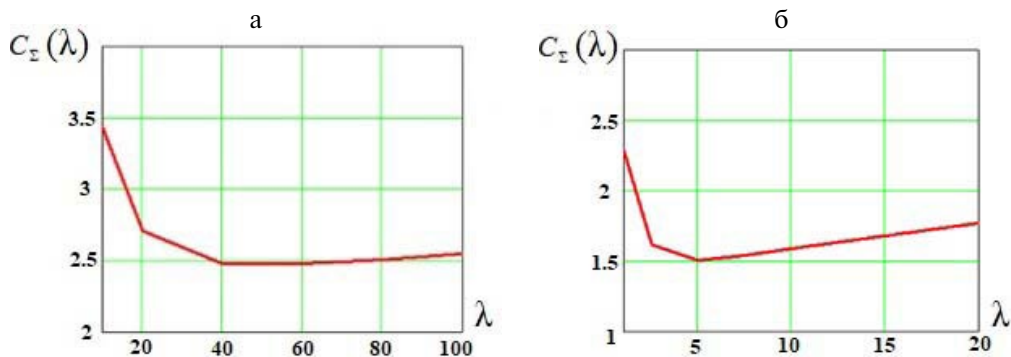


Рис. 6. Изменение суммарных затрат $C_{\Sigma}(\lambda)$ по множителю Лагранжа:

(а) – $C_{\text{ущ}} = 100$; (б) – $C_{\text{ущ}} = 10$.

1. Параметр $m_{\eta, i}$ можно рассчитать по формуле

$$m_{\eta, i} = \frac{\eta_i}{\left(1 - \frac{t_{\gamma, i} k_{V, i}}{\sqrt{n_i}}\right)}.$$

2. Параметр $t_{\gamma, i} = U_i$ рассчитывается по алгоритму (рис. 7)

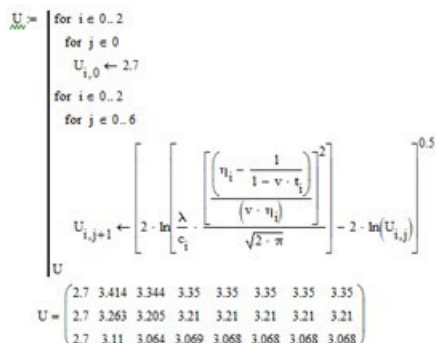


Рис. 7. Алгоритм расчета параметра $t_{\gamma, i} = U_i$.

3. Расчет процента брака отдельных агрегатов проводится по формуле при $i = 0, 1, 2$

$$\beta_i = \left[1 - \left(\int_{-\infty}^{U_{i,6}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \right],$$

Результаты расчета: $\beta_1 = 4.042 \cdot 10^{-4}$, $\beta_2 = 6.643 \cdot 10^{-4}$, $\beta_3 = 1.077 \cdot 10^{-3}$.

4. Параметр n_i можно рассчитать по формуле

$$n_i = \left[\frac{U_i}{\frac{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v_i t_i} \right)}{v_i \eta_i}} \right]^2.$$

Результаты расчета: $n_1 = 9.776$, $n_2 = 3.709$, $n_3 = 2.211$.

5. Процент брака можно рассчитать по формуле

$$\beta_{\Sigma} = \sum_{i=0}^2 \left[1 - \left(\int_{-\infty}^{U_{i,6}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \right] = 2.145 \cdot 10^{-3}.$$

6. Стоимостные затраты можно рассчитать по формуле

$$z(c) = c \left[\sum_{i=0}^2 \left[1 - \left(\int_{-\infty}^{U_{i,6}} \frac{1}{\sqrt{2A}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \right] \right],$$

$$\sum_{i=0}^2 \left[\frac{U_{i,6} \sqrt{c_i}}{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v_i t_i} \right)} \right]^2 + z(100) = 2.551.$$

7. Оценка значения множителя Лагранжа λ^* . Построение зависимости процента брака от множителя Лагранжа. Задаются значения λ_j ($j = 1, m$)

$$\lambda = \begin{pmatrix} 100 \\ 80 \\ 60 \\ 40 \\ 20 \\ 10 \end{pmatrix}; \beta(\lambda) = \begin{pmatrix} 2.1 \\ 2.6 \\ 3.6 \\ 5.3 \\ 10 \\ 21 \end{pmatrix}.$$

Оценка множителя Лагранжа из условия обеспечения заданного уровня суммарного процента брака по рис. 5.

Искомая оценка параметра λ^* должна удовлетворять дисциплинирующему условию $\beta_\Sigma(\lambda^*) = \beta_{\text{ЗАД}}$.

Для принятого значения параметра λ^* находим параметры контроля β_i , n_i обеспечивающие удовлетворение требуемого уровня процента брака по формулам

$$\beta_i = \left[1 - \int_{-\infty}^{U_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right],$$

где $U_i = t_{\gamma,i}$;

$$n_i = \left[\frac{\frac{U_i}{\left(\eta_i - \frac{1}{1 - v_i t_i} \right)}}{v_i \eta_i} \right]^2.$$

8. Для оптимизации суммарного риска необходимо произвести расчет суммарных затрат (пункт 6 алгоритма) и построить зависимость затрат от множителя Лагранжа рис. 8. Как видно из графика минимум затрат достигается при значении $\lambda = 50$. При этом оптимальное значение процента брака изделия равно $\beta_\Sigma = 0.004$. Далее проводится расчет параметров контроля для значения $\lambda = 50$.

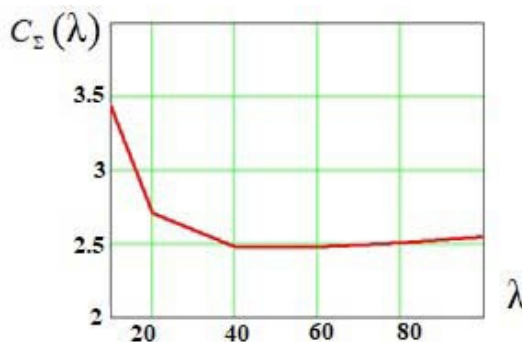


Рис. 8. Зависимость затрат от множителя Лагранжа.

Принятые в программе обозначения:

c — ущерб при отказе агрегатов;

W — суммарный процент брака;

$\eta_i = m_{\eta,i}$ — оценка математического ожидания коэффициента запаса;

$t_i = t_{h,i}$ — аргумент функции нормированного нормального распределения;

$v = k_{V,i}$ — коэффициент вариации коэффициента запаса;

$\beta_{\text{ЗАД}}$ — заданный уровень риска для изделия в целом.

Заключение. 1. Разработаны модели прогнозирования параметров контроля сложных технических систем. 2. Предложены вероятностно-стоимостные модели используемые при контроле работоспособности агрегатов технических систем. 3. Разработаны методы оптимизации числа испытаний агрегатов технических систем при проведении контроля их работоспособности. 4. Предложен методы оценки оптимального уровня суммарного процента брака изделия.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр FSFF-2023-0007).

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов О. В., Розенбаум А. Н.* Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990. 126 с.
2. *Абрамов О. В.* Управление состоянием сложных технических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 1. С. 24.
3. *Волков Л. И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов. М.: Высш. шк., 1987. 386 с.
4. *Александровская Л. Н., Афанасьев А. П., Лисов А. А.* Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М.: Логос, 2001. 209 с.
5. *Галеев А. Г., Золотов А. А., Перминов А. Н., Родченко В. В.* Эксплуатация стартовых комплексов ракетно-космических систем. М.: Изд-во МАИ, 2007. 260 с.
6. *Gusev E., Pronkin A.* Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage // AS. 2023. V. 6. P. 383.
<https://doi.org/10.1007/s42401-023-00225-6>
7. *Федотов В. К., Сергеев Н. П., Кондрашин А. А.* Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 502 с.
8. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10-и т. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания. М.: Машиностроение, 1989. 376 с.
9. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10-и т. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности. М.: Машиностроение, 1990. 336 с.
10. *Меньшиков В. А., Рудаков В. Б., Сычев В. Н.* Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.
11. *Золотов А. А., Родченко В. В., Гусев Е. В.* Прикладные задачи обеспечения надежности при разработке аппаратов ракетно-космических систем. М.: Московский авиационный институт, 2023. 160 с.