

УДК 621.311

ОПТИМІЗАЦІЯ НАЧАЛЬНОЇ НАДЕЖНОСТІ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНИХ УСТРОЙСТВ

Олена Ю. Бабенко, Ольга Ю. Бабенко, В. Б. Вільнер, А. М. ГалиновськийНаціональний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: ntuukafem@ua.fm

При определенном изменении взаиморасположения случайных границ определяющих воздействий (внешних и внутренних) относительно рабочей зоны можно получить для изделия максимальное значение начальной надежности (P_n), которая определяется с помощью функции Лапласа. Из приведенного в работе уравнения видно, что начальная надежность зависит от относительного расстояния между нижней границей рабочей зоны и математическим ожиданием нижней границы области работоспособности – $\mathbf{1}_1$, от отношения среднеквадратических отклонений верхней и нижней границы области работоспособности – n и от относительного расстояния между математическими ожиданиями верхней и нижней границ области работоспособности без учета ширины рабочей зоны – $\mathbf{1}$.

Задача нахождения максимального значения P_n сводится к отысканию расположения границы рабочей области $\mathbf{1}_1$ при заданных значениях n и $\mathbf{1}$. Поставленная задача решена численным методом. Результаты показали, что для высоконадежной аппаратуры точность расчета не обеспечивается возможностями табулированной функции Лапласа и необходима более точная методика настройки на максимум P_n .

Рассматривая надежность по схеме случаев и предполагая нормальный закон распределения, определены точки относительной настройки $\mathbf{1}_1$. В отличие от метода численных приближений получены уравнения, применимые при любых значениях n , $\mathbf{1}_1$, $\mathbf{1}$ и позволяющие найти условия оптимизации с любой точностью и в том числе для расположения границ, при которых нельзя рассчитать P_n по таблицам функций Лапласа. Полученное уравнение аппроксимировано и получено условие оптимальной надежности в виде линейного уравнения, коэффициенты которого могут быть найдены из таблиц или по приведенным уравнениям.

При независимости границ области работоспособности от значений внешних воздействий оптимизацию надежности можно производить по каждому внешнему воздействию отдельно. В случае, когда значения внешних воздействий, соответствующие граничным значениям области работоспособности, связаны уравнением регрессии, оптимизация может быть рассмотрена только во взаимосвязи обоих воздействий.

Погрешность от применения аппроксимирующих уравнений меньше, чем позволяет точность вычисления с применением табулированной функции Лапласа.

Ключевые слова: границы работоспособности, функция Лапласа, вероятность безотказной работы, аппроксимация, регрессия.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОЧАТКОВОЇ НАДІЙНОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ ПРИБОРІВ

Олена Ю. Бабенко, Ольга Ю. Бабенко, В. Б. Вільнер, О. М. ГалиновськийНаціональний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: ntuukafem@ua.fm

При певній зміні взаєморозташування випадкових меж визначальних дій (зовнішніх і внутрішніх) відносно робочої зони можна отримати для виробу максимальне значення початкової надійності (P_n), яка визначається за допомогою функції Лапласа. З приведеного в роботі рівняння видно, що початкова надійність залежить від відносної відстані між нижньою межею робочої зони і математичним очікуванням нижньої межі області працездатності – $\mathbf{1}_1$, від відношення середньоквадратичних відхилень верхньої й нижньої межі області працездатності – n та від відносної відстані між математичними очікуваннями верхньої й нижньої меж області працездатності без урахування ширини робочої зони – $\mathbf{1}$.

Завдання знаходження максимального значення P_n зводиться до відшукування розташування меж робочої області $\mathbf{1}_1$ при заданих значеннях n і $\mathbf{1}$. Поставлене завдання вирішено чисельним методом. Результати показали, що для високонадійної апаратури точність розрахунку не забезпечується можливостями табульованої функції Лапласа й потрібна точніша методика налаштування на максимум P_n .

Розглядаючи надійність за схемою випадків і припускаючи нормальний закон розподілу, визначено точки відносного налаштування $\mathbf{1}_1$. На відміну від методу чисельних наближень отримано рівняння, які можуть бути застосовані при будь-яких значеннях n , $\mathbf{1}_1$, $\mathbf{1}$ і дозволять знайти умови оптимізації з будь-якою точністю, у тому числі для розташування меж, при яких не можна розрахувати P_n за таблицями функцій Лапласа. Отримане рівняння апроксимовано й отримано умову оптимальної надійності у вигляді лінійного рівняння, коефіцієнти якого можуть бути знайдені з таблиць або за приведеними рівняннями.

При незалежності меж області працездатності від значень зовнішніх дій оптимізацію надійності можна робити по кожній зовнішній дії окремо. У разі, коли значення зовнішніх дій, що відповідають граничним значенням області працездатності, пов'язані рівнянням регресії, оптимізація може бути розглянута тільки у взаємозв'язку обох дій.

Похибка від застосування апроксимуючих рівнянь менша, ніж дозволяє точність обчислення із застосуванням табульованої функції Лапласа.

Ключові слова: межі працездатності, функція Лапласа, вірогідність безвідмовної роботи, апроксимація, регресія.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При случайном разбросе внутренних и внешних воздействий схемная надёжность изделия зависит от выборных значений определяющих параметров и расположения границ области работоспособности. Целью данной работы является получение соотношений, при которых обеспечиваются условия максимальной начальной надёжности преобразовательного устройства.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Значение начальной надёжности зависит от расположения границ области работоспособности относительно рабочей зоны, причем границы рабочей зоны определяются допустимыми по техническим условиям (ТУ) отклонениями параметров от номинального значения, а границы области работоспособности – фактическими отклонениями параметра, при которых исследуемое изделие работоспособно. Например, исследуется изделие, которое должно работать при изменении напряжения питания U на $\pm\alpha$ от номинального, что соответствует границам рабочей зоны U_{min} и U_{max} . При испытаниях это изделие работало при изменении напряжения от нижнего значения U_n до верхнего значения U_v , что соответствует значениям границ области работоспособности, которые являются случайными величинами, т.к. они разнятся для каждого конкретного образца. При перемещении рабочей зоны в пространстве она приближается к одним границам и удаляется от других, т.е. уменьшается начальная надёжность в направлении одних границ (или по одним критериям) и увеличивается в направлении других границ (или по другим критериям).

Рассмотрим случай, когда начальная надёжность определяется случайными величинами верхнего (λ_{IV}) и нижнего (λ_{IN}) значений внешнего воздействия λ_I при определенных значениях остальных внешних воздействий, т.е. λ_{IV} и λ_{IN} – значения границ области работоспособности. Предположим, что случайные величины λ_{IV} и λ_{IN} распределены по нормальному закону с математическими ожиданиями m_v и m_n и среднеквадратическими отклонениями σ_v и σ_n (рис. 1).

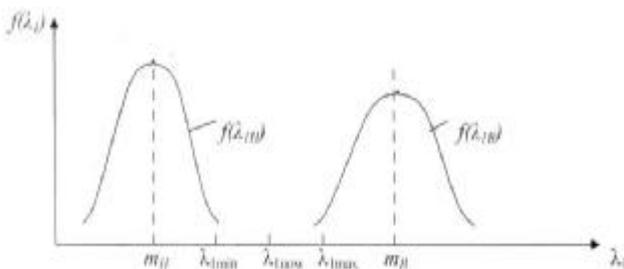


Рисунок 1 – Взаиморасположение границ области работоспособности и границ рабочей зоны

Распределение границ области работоспособности по нормальному закону близко к истине, т.к. случайные значения границ λ_{IV} и λ_{IN} зависят от множества других случайных величин (значения па-

раметров элементов изделия). Границами рабочей зоны являются значения внешнего воздействия λ_{Imin} и λ_{Imax} , т.е. те предельные значения λ_I , которые определяют диапазон работы изделия согласно ТУ. Тогда начальная надёжность определяется как вероятность выполнения следующих двух условий:

$$\lambda_{IV} > \lambda_{Imax}, \lambda_{IN} < \lambda_{Imin}. \quad (1)$$

При перемещении рабочей зоны в направлении к нижней границе λ_{IN} (при условии неизменной ширины рабочей зоны $\lambda_{Imax} - \lambda_{Imin} = \Delta\lambda_I$) уменьшается вероятность выполнения второго условия и увеличивается вероятность выполнения первого условия. По мере приближения к границе (к ее математическому ожиданию) значение плотности распределения $f(\lambda_{IN})$ в точке λ_{Imin} растет, а значение плотности распределения $f(\lambda_{IV})$ в точке λ_{Imax} падает, т.е. вероятность выполнения второго условия уменьшается быстрее, чем увеличивается вероятность выполнения первого условия. Так как при перемещении рабочей зоны к нижней границе вероятность выполнения второго условия в пределе стремится к нулю, то и начальная надёжность стремится к нулю. При перемещении рабочей зоны в обратном направлении сначала значение плотности распределения $f(\lambda_{IN})$ падает быстрее, чем увеличивается значение плотности распределения $f(\lambda_{IV})$ и, следовательно, вероятность выполнения второго условия возрастает быстрее, чем уменьшается вероятность выполнения первого условия; начальная надёжность увеличивается. Затем наступает момент, когда значения обеих плотностей распределения становятся равными и рост начальной надёжности прекращается. Это положение рабочей зоны соответствует максимальному значению начальной надёжности. При дальнейшем смещении рабочей зоны в сторону верхней границы области работоспособности значение плотности распределения $f(\lambda_{IV})$ растет быстрее, чем падает значение плотности распределения $f(\lambda_{IN})$ и вероятность выполнения первого условия уменьшается быстрее, чем увеличивается вероятность выполнения второго условия: начальная надёжность уменьшается и в пределе стремится к нулю. Таким образом, изменяя взаимное расположение границ области безотказной работы и рабочей зоны, можно найти такое расположение, при котором будет достигнута максимально возможная начальная надёжность.

Настройку аппаратуры, которая обеспечивает максимальную начальную надёжность, будем называть оптимальной настройкой по критерию начальной надёжности. Найдем условие оптимальной настройки для аппаратуры, область работоспособности которой ограничена двумя границами λ_{IV} и λ_{IN} (рис. 1), подчиненными нормальному закону.

Согласно условиям (1), начальная надёжность определяется как вероятность попадания случайной

точки $(\lambda_{1N}, \lambda_{1V})$ в прямокутник, сторони якого паралельні координатним осям:

$$\lambda_{1N} \text{ о } \lambda_{1V} (\lambda_{1N} = \lambda_{1min}, \lambda_{1V} = \lambda_{1max}).$$

$$P_n = \int_{-\infty}^{\lambda_{1min}} \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_{1N}-m_n)^2}{2\sigma_n^2}} d\lambda_{1N} \times \int_{\lambda_{1max}}^{\infty} \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_{1V}-m_v)^2}{2\sigma_v^2}} d\lambda_{1V} \quad (2)$$

Необходимо найти такое расположение рабочей зоны, т.е. λ_{1min} и λ_{1max} (пределы интегрирования), которое соответствует максимальному значению начальной надежности при известных законах распределения верхней и нижней границ области работоспособности.

В приведенном выше примере, где граничным параметром является напряжение питания, это означает, что для оптимальной настройки следует выбрать такое значение напряжения (например, изменением витков на трансформаторе), при котором P_n будет максимальным.

При определенных значениях математических ожиданий границ области работоспособности m_v и m_n начальная надежность тем выше, чем меньше диапазон изменения рабочей области $\Delta\lambda$, и стремится к наибольшему значению при $\Delta\lambda \rightarrow 0$, т.е. $\lambda_{1min} = \lambda_{1max} = \lambda_{1nom}$. Поскольку диапазон изменения рабочей области $\Delta\lambda$ может являться функцией от λ_{1nom} , то изменения начальной надежности является функцией не только перемещения рабочей области вдоль оси λ_1 , но и изменения диапазона этой области.

Примем то, что нижнее и верхнее значения рабочей зоны определяются выражениями

$$\begin{aligned} \lambda_{1min} &= (1-\alpha)\lambda_{1nom}; \\ \lambda_{1max} &= (1+\beta)\lambda_{1nom}, \end{aligned} \quad (3)$$

где α и β – относительный разброс параметра λ_1 . Тогда пределы интегрирования в уравнении (2) зависят только от номинального значения внешнего воздействия λ_1 и задача нахождения экстремума выражения (2) сводится к определению соответствующего значения λ_{1nom} .

Представим выражение (2) в следующем виде:

$$P_n = \varphi(\lambda_{1nom}) = \int_{-\infty}^{(1-\alpha)\lambda_{1nom}} \varphi_1(\lambda_{1N}) d\lambda_{1N} \int_{(1+\beta)\lambda_{1nom}}^{\infty} \varphi_2(\lambda_{1V}) d\lambda_{1V} \quad (4)$$

Найти экстремум путем приравнивания к нулю первой производной не удается:

$$\begin{aligned} \varphi'(\lambda_{1nom}) &= \frac{d}{d\lambda_{1nom}} \int_{-\infty}^{(1-\alpha)\lambda_{1nom}} \varphi_1(\lambda_{1N}) d\lambda_{1N} \int_{(1+\beta)\lambda_{1nom}}^{\infty} \varphi_2(\lambda_{1V}) d\lambda_{1V} = \\ &= \varphi_1(\lambda_{1nom}) \int_{(1+\beta)\lambda_{1nom}}^{\infty} \varphi_2(\lambda_{1V}) d\lambda_{1V} - \varphi_2(\lambda_{1nom}) \int_{-\infty}^{(1-\alpha)\lambda_{1nom}} \varphi_1(\lambda_{1N}) d\lambda_{1N}. \end{aligned} \quad (5)$$

Действительно, корни уравнения $\varphi'(\lambda_{1nom})$ отыс-

кать нельзя, т.к. интеграл $\int e^{-t^2} dt$ не выражается через элементарные функции. Для вычисления интеграла воспользуемся таблицами функции Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

С помощью функции Лапласа начальная надежность (P_n) может быть выражена:

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{1}{4} \left[\Phi\left(\frac{\lambda_{1min}-m_n}{\sigma_n\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{-\infty-m_n}{\sigma_n\sqrt{2}}\right) \right] \left[\Phi\left(\frac{\infty-m_v}{\sigma_v\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{\lambda_{1max}-m_v}{\sigma_v\sqrt{2}}\right) \right] = \\ &= \frac{1}{4} \left[1 + \Phi\left(\frac{\lambda_{1min}-m_n}{\sigma_n\sqrt{2}}\right) \right] \left[1 + \Phi\left(\frac{m_v-\lambda_{1max}}{\sigma_v\sqrt{2}}\right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

В уравнении (6) для простоты записи границы рабочей зоны обозначены λ_{1min} и λ_{1max} , но будем иметь в виду, что они однозначно могут быть выражены через λ_{1nom} или одна через другую, например:

$$\lambda_{1max} = \lambda_{1min} \frac{(1+\beta)}{(1-\alpha)}. \quad (7)$$

Поскольку функция надежности P_n является табличной, то задача нахождения максимума может быть решена численным методом. Начальная надежность зависит от расположения границ рабочей зоны λ_{1min} и λ_{1max} относительно математических ожиданий границ области работоспособности m_v и m_n и не зависит от их расположения относительно номинального значения внешнего воздействия λ_{1nom} и диапазона изменений области $\Delta\lambda$. Поэтому решение уравнения (6) нахождение экстремума лучше производить относительно крайней точки рабочей зоны.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_v}{\sigma_n} = n, \quad \frac{\lambda_{1min}-m_n}{\sigma_n} = \mathbf{1}_1; \\ \frac{m_v-\lambda_{1max}}{\sigma_v} = \frac{m_v-\lambda_{1max}}{n\sigma_n} = \mathbf{1}_2; \\ \frac{m_v-m_n-\Delta\lambda}{\sigma_n} = \frac{(m_v-\lambda_{1max})+(\lambda_{1min}-m_n)}{\sigma_n} = \mathbf{1}_1 + \mathbf{1}_2 n = \mathbf{1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Произведем подстановку выражений (8) в уравнение (6):

$$P_n = \frac{1}{4} \left[1 + \Phi\left(\frac{\mathbf{1}_1}{\sqrt{2}}\right) \right] \left[1 + \Phi\left(\frac{\mathbf{1}-\mathbf{1}_1}{n\sqrt{2}}\right) \right]. \quad (9)$$

Из (9) видно, что начальная надежность зависит от относительного расстояния между нижней границей рабочей зоны и математическим ожиданием нижней границы области работоспособности – $\mathbf{1}_1$, от отношения среднеквадратических отклонений верхней и нижней границы области работоспособности – n и от относительного расстояния между математическими ожиданиями верхней и нижней границ области работоспособности без учета ширины рабочей

зоны – $\mathbf{1}$. Таким образом, задача нахождения максимального значения начальной надежности сводится к отысканию расположения границы рабочей области при заданных значениях n и $\mathbf{1}$.

$$\mathbf{1}_1 = \varphi(n, \mathbf{1}).$$

Поставленная задача решена численным методом. По известным параметрам границ области работоспособности λ_{1N} и λ_{1V} и границ рабочей зоны λ_{1max} и λ_{1min} по выражениям (8) находятся значения n и $\mathbf{1}$ и затем ищется взаимное расположение этих зон для обеспечения максимального значения P_n . Это расположение задается значением $\mathbf{1}_1$, которое указывает на число среднеквадратичных отклонений σ_n нижней границы λ_{1N} на отрезке от m_n до λ_{1min} . Программа вычислений предусматривает для ряда фиксированных значений n по уравнению (9) нахождение путем последовательных вычислений соответствующего максимуму начальной надежности значения $\mathbf{1}_1$ при различных значениях $\mathbf{1}$ (рис. 2):

$$\mathbf{1}_1 = \varphi(\mathbf{1}) \text{ при } n = const. \quad (10)$$

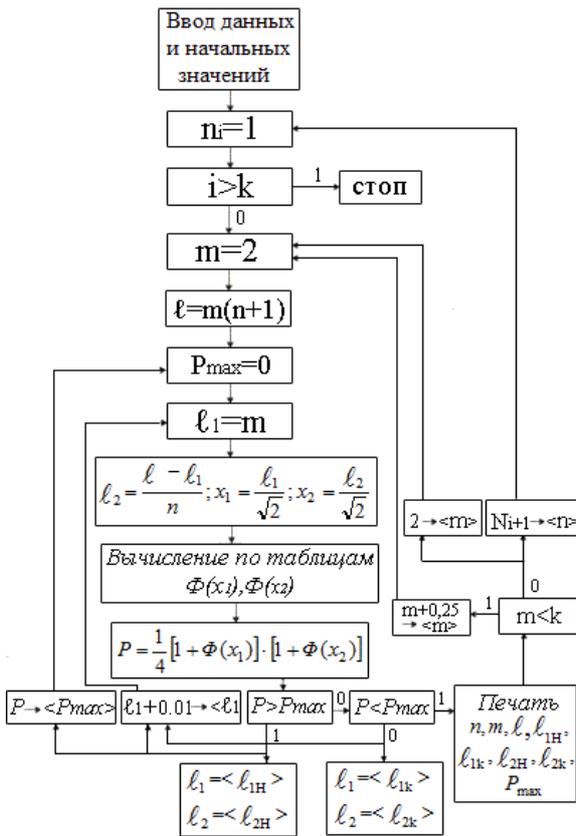


Рисунок 2 – Блок-схема расчета (алгоритм) максимума начальной надежности

Полученные результаты приведены на графике (рис. 3).

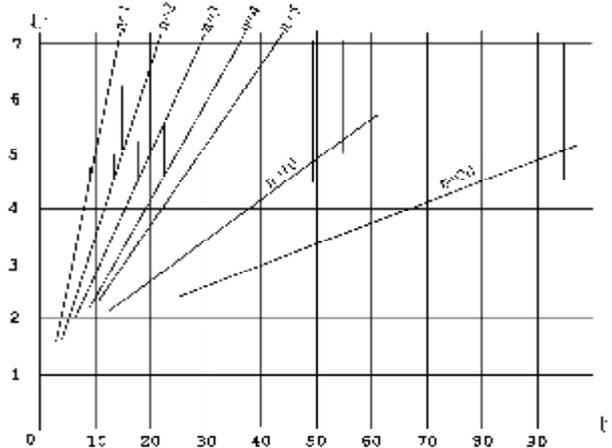


Рисунок 3 – График определения параметров для получения максимальной начальной надежности

Приведенные в программе значения m являются промежуточными величинами, предназначенными для задания значений $\mathbf{1}[\mathbf{1} = m(n+1)]$, при которых относительные расстояния между границами области работоспособности и рабочей зоны $\mathbf{1}_1$ и $\mathbf{1}_2$ находятся вблизи определенных значений, соответствующих аппаратуре высокой начальной надежности ($\mathbf{1}_1 > 2$; $\mathbf{1}_2 > 2$). Вычисление производилось при изменении $\mathbf{1}_1$ с шагом 0,01. В некоторых случаях при изменении точки оптимальной настройки $\mathbf{1}_1$ изменение начальной надежности настолько незначительно, что его невозможно выявить при вычислении с точностью, которую позволяют получить таблицы функции Лапласа. В этом случае вычислялся диапазон значений $\mathbf{1}_1$ (от $\mathbf{1}_{1N}$ до $\mathbf{1}_{1k}$) и $\mathbf{1}_2$ (от $\mathbf{1}_{2N}$ до $\mathbf{1}_{2k}$), внутри которого предполагается нахождение точки оптимальной настройки. На графике (рис. 3) полученным диапазонам настройки соответствуют прямые линии, параллельные оси ординат.

Рассмотрим оптимизацию P_n для приведенного выше изделия, которое получает энергию от источника с номинальным напряжением U_{nom} , имеющим разброс $\pm\alpha$. В этом случае $U_{min} = (1-\alpha)U_{nom}$ и $U_{max} = (1+\alpha)U_{nom}$. По данным граничных испытаний [1] была установлена верхняя граница работоспособности с математическим ожиданием U_v и среднеквадратическим отклонением σ_v , соответственно для нижней границы U_n и σ_n . По этим данным получим:

$$n = \frac{\sigma_v}{\sigma_n};$$

$$\mathbf{1} = \frac{U_v - U_n - (U_{max} - U_{min})}{\sigma_n}.$$

По графику (рис. 3) (или из таблицы расчета) находим значение $\mathbf{1}_1$ и затем значение напряжения питания $U_{min} = \mathbf{1}_1 \sigma_n + U_n$; $U_{nom} = \frac{U_{min}}{1-\alpha}$, которое соответствует значению надежности P_n , определяемой

по (9).

Невозможность получения точки оптимальной настройки при достаточно больших запасах схемной надежности является существенным недостатком данного метода.

В тех случаях, когда достаточным является трех-сигмовый запас надежности, т.е. когда расстояние между границами области работоспособности и рабочей зоны находится в пределах $(3-4)\sigma$, приведенный расчет с использованием функции Лапласа обеспечивает необходимую точность. Если же аппаратура должна быть особо надежной, т.е. расстояние между границами более $(4-5)\sigma$, то точность расчета не обеспечивается возможностями табулированной функции Лапласа, и в этом случае надо иметь более точную методику настройки на максимум P_n .

Выше было показано, что максимум начальной надежности соответствует такому расположению рабочей зоны, при котором имеет место равенство значений плотностей распределения $f(\lambda_{IV})$ и $f(\lambda_{IN})$ в точках $\lambda_{I\max}$ и $\lambda_{I\min}$. Рассмотрим это положение подробнее. Начальная надежность выражается уравнением:

$$P_n = P_{n1}P_{n2} = (1 - q_1)(1 - q_2) = 1 - (q_1 + q_2) + q_1q_2, \quad (11)$$

где P_{n1} и q_1 , P_{n2} и q_2 – соответственно, вероятности безотказной работы и отказа по каждой границе.

Величина q_1q_2 является высшего порядка малости по сравнению с q_1 и q_2 , и ею можно пренебречь, тем более что ошибка от этого в сторону уменьшения P_n , а не увеличения. Тогда

$$P_n = 1 - (q_1 + q_2).$$

Это означает, что начальная надежность P_n максимальна, если сумма $q_1 + q_2$ минимальна.

Но q_1 – площадь под кривой $f(\lambda_{IN})$ при $\lambda_{IN} > \lambda_{I\min}$, q_2 – площадь под кривой плотности распределения $f(\lambda_{IV})$ при $\lambda_{IV} < \lambda_{I\max}$, т.е. сумма площадей должна быть минимальна.

Если передвинуть рабочую зону на величину элементарного участка $d\lambda_I$, то вероятность попадания случайной величины λ_I на этот элементарный участок (с точностью до бесконечно малых высшего порядка) составит $f(\lambda_I)d\lambda_I$. Вероятность отказа по первой границе λ_{IN} изменится на величину $f(\lambda_{IN})d\lambda_I$, а по второй границе λ_{IV} – на величину $f(\lambda_{IV})d\lambda_I$. Если при изменении положения рабочей зоны $f(\lambda_{IN})d\lambda_I$ меньше, чем $f(\lambda_{IV})d\lambda_I$, то при движении рабочей зоны в сторону границы λ_{IN} вероятность отказа уменьшается, т.к. сумма площадей уменьшается. По мере движения $f(\lambda_{IN})d\lambda_I$ увеличивается, а $f(\lambda_{IV})d\lambda_I$ уменьшается. Наконец, наступает равенство площадей, что соответствует максимуму начальной надежности, т.к. при дальнейшем движении q_2 уменьшается меньше, чем увеличивается q_1 . Следовательно, максимальная надежность соответ-

ствует равенству

$$f(\lambda_{IN})d\lambda_I = f(\lambda_{IV})d\lambda_I \quad \text{или} \quad f(\lambda_{IN}) = f(\lambda_{IV}). \quad (12)$$

Предполагая нормальный закон распределения, что имеет место в исследованных преобразователях и устройствах [2–4], имеем:

$$\frac{1}{\sigma_n\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_1 - m\lambda_1)^2}{2\sigma_n^2}} = \frac{1}{\sigma_v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_2 - m\lambda_2)^2}{2\sigma_v^2}}. \quad (13)$$

С учетом выражений (8) после несложных преобразований получим

$$\frac{I_1^2}{ne^2} = e^{-\frac{(1-I_1)^2}{2n^2}}. \quad (14)$$

Решая данное уравнение относительно I_1 , нетрудно показать, что

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + 2In(n)}; \quad (15)$$

$$I_1 = \frac{-1 \pm n\sqrt{I_2^2 + 2(n^2 - 1)In(n)}}{n^2 - 1}. \quad (16)$$

Так как I_1 отрицательным быть не может (не имеет физического смысла), то остается принять, что при $n \geq 1$

$$I_1 = \frac{-1 + n\sqrt{I_2^2 + 2(n^2 - 1)In(n)}}{n^2 - 1}. \quad (17)$$

При $n = 1$ квадратный трехчлен относительно I_1 выражается в уравнении первой степени и поэтому выражением (16) при таком условии пользоваться нельзя, т.к. имеет неопределенность типа $\frac{0}{0}$. Однако, раскрывая неопределенность (или из исходного уравнения), легко получить, что при $n = 1$ $I_1 = 0,5I_2$.

В результате определения точки оптимальной настройки I_1 по данному уравнению получаются значения, совпадающие с полученным выше методом численных приближений. Но, в отличие от метода численных приближений, полученные формулы (15), (16) применимы при любых значениях n , I_1 и I_2 и позволяют найти условия оптимизации с любой точностью и для любых положений рабочей зоны относительно границ области работоспособности, в том числе и для положений, которые нельзя рассчитать по таблицам функций Лапласа (например, при $\frac{I_1}{\sqrt{2}} > 3$). Полученные уравнения являются

несложными при применении их в инженерных расчетах для определения оптимальных режимов настройки по исходным данным I и n . Но в то же время при аналитическом исследовании режимов

работы аппаратуры данные выражения, введенные в уравнения, описывающие поведение аппаратуры, плохо поддаются преобразованиям и потому неудобны в применении.

Из анализа графиков зависимостей $\mathbf{I}_1 = \varphi(\mathbf{I})$ (10) установлено, что при заданном n зависимость точки настройки \mathbf{I}_1 от \mathbf{I} хорошо аппроксимируется уравнением прямой линии вида

$$\mathbf{I}_1 = a + b\mathbf{I}. \quad (18)$$

Для ряда значений n , приведенных на графике (рис. 3), определяются параметры линейной функции a и b . Вычисления сделаны по методу наименьших квадратов. Для этого для каждого значения n по выражению (15) вычисляется \mathbf{I}_1 при изменении \mathbf{I}_2 от двух до пяти с шагом 0,1 и по выражению (8) определяется \mathbf{I} . В результате получаем совокупность значений $\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_i; i=1, 2, 3, \dots, k$, где $k = \frac{5-2}{0,1} + 1 = 31$.

Коэффициенты a и b для каждого значения n , полученные путем обработки этих совокупностей по выражениям метода наименьших квадратов, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты линейного уравнения для определения точки настройки на максимальную начальную надежность

N	A	B	a_i	b_i
1	0,0000	0,5000	0,0000	1,0000
2	0,2768	0,3202	0,4072	0,9422
3	0,47674	0,23338	0,6219	0,9133
4	0,6258	0,1827	0,76577	0,89448
5	0,74234	0,14977	0,8731	0,88076
6	0,83699	0,12664	0,95836	0,8700
7	0,91597	0,10956	1,02867	0,8613
8	0,98358	0,09645	1,08857	0,85394
9	1,04226	0,086076	1,14043	0,84765
10	1,09409	0,07767	1,18623	0,84212
15	1,28655	0,051948	1,35705	0,82192
20	1,41621	0,03885	1,47346	0,8085

Зависимости, построенные по выражениям (17) и (18), отличаются от зависимостей графика (рис. 3) тем, что имеем точечные значения \mathbf{I}_1 для каждого n и \mathbf{I} , а не диапазон от \mathbf{I}_{1N} до \mathbf{I}_{1k} .

Максимальная погрешность в определении точки настройки \mathbf{I}_1 может быть получена после исследования уравнения погрешности $\Delta \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_1'$, где \mathbf{I}_1 и \mathbf{I}_1' – значения, полученные по выражениям (17) и (18).

$$\Delta \mathbf{I}_1 = \frac{-1 + n\sqrt{1^2 + 2(n^2 - 1)\ln(n)}}{n^2 - 1} - a - b\mathbf{I}. \quad (19)$$

Исследование данного уравнения на экстремум с целью определения максимальной погрешности путем приравнивания первой производной по \mathbf{I} нулю дает следующее равенство:

$$\mathbf{I}^2 = \frac{2\ln(n)(n^2 - 1)[1 + b(n^2 - 1)]^2}{n^2 - [1 + b(n^2 - 1)]^2}. \quad (20)$$

Подставляя это уравнение в исходное для определения погрешности, после преобразований получим

$$\Delta \mathbf{I}_1 = \sqrt{\frac{2\ln(n)}{n^2 - [1 + b(n^2 - 1)]^2}} \left\{ \frac{[1 + b(n^2 - 1)]^2}{n^2 - 1} + \frac{n^2\sqrt{n^2 - 1}}{(n^2 - 1)\sqrt{n^2 - [1 + b(n^2 - 1)]^2}} \right\}. \quad (21)$$

Максимальная погрешность от линейризации не превышает 0,6 %. Обычно ни в каких инженерных расчетах (в частности, для источников питания и других преобразователей, на которых производились исследования P_n) не производится выбор элементов с такой высокой точностью [3, 4]. Поэтому такая линейризация вполне приемлема. Кроме того, следует учесть, что максимальная ошибка в определении ℓ_1 еще не означает максимального отклонения от начальной надежности, т.к. \mathbf{I}_1 и P_n связаны сложной нелинейной зависимостью. Анализ погрешности был произведен численным методом. Получены результаты, из которых вытекает, что применение выражений линейризации дает отклонение начальной надежности в диапазоне изменения n от 1 до 20 не более чем $6 \cdot 10^{-5}$.

При настройке на надежность, соответствующую, например, $\mathbf{I}_1 \approx \mathbf{I}_2 \approx 3\sigma$, изменение \mathbf{I}_1 на 5 % при $n=1$ приводит к уменьшению начальной надежности с 0,9972 до 0,9971, т.е. всего на 0,01 %. Конечно, точность, которая должна предъявляться к настройке, может быть определена только при анализе конкретных требований к надежности аппаратуры и оценке ее, например, по экономическому критерию [4]. Но уже при расположении границ области работоспособности на расстоянии, примерно равном 4σ , определение точки настройки \mathbf{I}_1 с точностью 10 % приводит к практически незначительному изменению начальной надежности (0,99993–0,99982 = 0,00011) – примерно 0,01 %. С увеличением n изменение надежности становится еще меньше.

Таким образом, анализ погрешности показывает приемлемость применения аппроксимирующих линейных уравнений для определения точки оптимальной настройки.

Имея коэффициенты, связывающие величины \mathbf{I}_1 и \mathbf{I} , нетрудно, пользуясь зависимостями (8), найти коэффициенты линейных уравнений, связывающих величины \mathbf{I}_1 и \mathbf{I}_2 :

$$\mathbf{I}_1 = a_1 + b_1\mathbf{I}_2, \quad (22)$$

$$\text{где } a_{1i} = \frac{a_i}{1 - b_i}; \quad b_{1i} = \frac{n_i b_i}{1 - b_i}$$

Зависимостью $I_1 = f(I_2)$ можно воспользоваться, если рабочая зона от λ_{1min} до λ_{1max} ($\Delta\lambda_1$) может корректироваться с целью получения более высокой надежности. Например, может быть скорректирован диапазон изменения тока нагрузки от I_{min} до I_{max} , диапазон температуры, при которой работает изделие, и т.п.

Как видим, полученные коэффициенты уравнений a_i и b_i , a_{1i} и b_{1i} , приведенные в табл. 1, являются функцией отношения среднеквадратических отклонений n :

$$\begin{aligned} a &= \phi(n); \\ b &= \phi(n). \end{aligned} \quad (23)$$

Из табл. 1 легко увидеть, что зависимость b от n является гиперболической, т.е.

$$b = \frac{1}{k_1 + k_2 n}. \quad (24)$$

Нахождение коэффициентов k_1 и k_2 (так же, как это сделано выше, при нахождении коэффициентов a и b) может произойти по методу наименьших квадратов. Из вышеприведенного расчета имеем совокупность значений (n_i, b_i) ($i=1, 2, 3, \dots, 20$). Условием для получения минимума среднеквадратической ошибки является

$$\sum_{i=1}^n \left(b_i - \frac{1}{k_1 + k_2 n_i} \right)^2 = \min. \quad (25)$$

Взяв частные производные по коэффициентам k_1 и k_2 , получим систему уравнений для определения коэффициентов гиперболы:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(b_i - \frac{1}{k_1 + k_2 n_i} \right) \frac{1}{(k_1 + k_2 n_i)^2} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \left(b_i - \frac{1}{k_1 + k_2 n_i} \right) \frac{n_i}{(k_1 + k_2 n_i)^2} &= 0. \end{aligned} \quad (26)$$

После математических преобразований, в процессе которых был применен искусственный прием введения относительного значения коэффициента b по отношению к его истинному значению при каждом n , получены выражения определения коэффициентов k_1 и k_2 .

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n b_i - k_2 \sum_{i=1}^n n_i b_i^2}{\sum_{i=1}^n b_i^2}; \\ k_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n n_i b_i \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 - \sum_{i=1}^n n_i b_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n n_i^2 b_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n n_i b_i^2 \right)^2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Для оценки точности результатов по полученным данным k_1 и k_2 рассчитаны значения коэффициента b для каждого значения n . Результаты расчета приведены в табл. 2. При значениях $k_1 = 0,778$ и

$k_2 = 1,19$ ошибка в определении коэффициента b не превышает 1,5 % при изменении n от 1 до 10.

Таким образом, выражение для определения коэффициента b может иметь следующий вид:

$$b = \frac{1}{0,778 + 1,19n}. \quad (28)$$

Таблица 2 – Значение коэффициента b при его аппроксимации (28)

n	1	2	3	4	5	6
b	0,507	0,317	0,23	0,1805	0,1483	0,1261
n	7	8	9	10	15	20
b	0,1096	0,097	0,087	0,0788	0,0536	0,0407

Если значения a , вычисленные выше для каждого n , нанести на график, то по виду графика кривая аппроксимируется уравнением параболы вида

$$n = c_1 a^2 + c_2 a + c_3, \quad (29)$$

откуда коэффициент a равен

$$a = \frac{-c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - 4c_1(c_3 - n)}}{2c_1}. \quad (30)$$

Для определения коэффициентов c_1 , c_2 и c_3 также применяем метод наименьших квадратов по полученным выше совокупностям значений (n_i, a_i) ($i=1, 2, 3, \dots, k$). Коэффициенты находятся по известной методике.

Путем несложных преобразований приведем уравнение (30) к другому виду:

$$a = -k_3 \pm \sqrt{k_4 + k_5 n}, \quad (31)$$

где

$$k_3 = \frac{c_2}{2c_1}; k_4 = k_3^2 - \frac{c_3}{c_1}; k_5 = \frac{1}{c_1}.$$

Данное уравнение недостаточно точно аппроксимирует зависимость коэффициента a от n . Поэтому найдены коэффициенты уравнений k_3 , k_4 и k_5 для трех случаев: по пяти точкам для n от 1 до 5, по 10 точкам для n от 1 до 10 и по 12 точкам для n от 1 до 20. Значения коэффициентов приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Данные для аппроксимации коэффициента a

Коэффициенты	Значения n		
	$n=1...5$	$n=1...10$	$n=1...,15, 20$
c_1	4,1738	7,06413	11,9857
c_2	2,22486	0,0896580	-4,95742
c_3	1,01529	1,17272	1,81998
k_3	0,266526	0,0634598	-0,206807
k_4	-0,172217	-0,165970	-0,109076
k_5	0,239580	0,141560	0,083432

По полученным коэффициентам рассчитаны значения a (a') для всех целых значений n , проведено сравнение их с исходными значениями a и оценена погрешность для заданных точек.

Аппроксимирующая кривая, построенная по методу наименьших квадратов по пяти точкам, дает неплохое приближение для ориентировочных расчетов. Наибольшее отклонение составляет около 0,01 в точке $n=2$, что при определении точки оптимальной настройки \mathbf{I}_1 дает отклонение в наихудших случаях (при низких надежностьях в районе $\mathbf{I}_1=2$) не более 0,5 %.

Аппроксимирующая кривая, построенная по десяти точкам от $n=1$ до $n=10$, дает примерно такие же данные при $n=4$ и до $n=10$. При значении $n=2$ ошибка увеличивается и при расчете \mathbf{I}_1 может составлять около 3 %.

Кривая, построенная по значениям n до 20 в области малых n , дает ошибку при определении \mathbf{I}_1 до 9 %. Поэтому этой кривой можно пользоваться только при больших значениях n (15 и 20), что практически не встречается.

Таким образом, для практических расчетов можно пользоваться аппроксимирующей кривой 1, определенной для значений n от 1 до 5, или кривой 2, определенной для n от 1 до 10. Причем кривая 1 дает большую точность, но кривая 2 дает значение коэффициента a при n свыше 5.

Применение уравнения аппроксимирующей кривой удобно для различного рода аналитических исследований и вывода различных соотношений. Для практических расчетов можно также пользоваться приведенными в табл. 1 значениями a , находя промежуточные, не указанные в таблице значения методом линейной интерполяции.

При этом ошибка в среднем не превышает 0,2 % в определении \mathbf{I}_1 , за исключением участков от $n=1$ до $n=2$ и от $n=10$ до $n=15$, где она может достигать примерно до 0,8 % в самых неблагоприятных случаях. Надо учесть, что даже увеличение ошибки в 2–3 раза дает удовлетворительные, приемлемые для практики результаты.

Подставив полученные значения коэффициентов $k_1...k_5$ в уравнение (18), получим аналитический вид зависимости по определению оптимальной точки настройки

$$\mathbf{I}_1 = -k_3 \pm \sqrt{k_4 + k_5 n} + \frac{1}{0,778 + 1,19 \cdot n}. \quad (32)$$

Рассмотрим погрешность, которая может возникнуть при применении для настройки выражения (32). Оценку возможности применения аппроксимирующих уравнений производим по значениям начальной надежности. Для этого произведен расчет значений \mathbf{I}_1 по выражению (32) для всех тех же значений n и \mathbf{I}_1 , которые были рассчитаны по исходному уравнению (16), получены значения отклонения

точки оптимальной настройки $\Delta \mathbf{I}_1$ и значения отклонения надежности в точке оптимальной настройки, полученной по прямой и аппроксимированной зависимости.

Анализ показывает, что при аппроксимации уравнения (17) кривой для n от 1 до 5 ошибка по надежности появляется только в шестом знаке после запятой, что вполне приемлемо для практических расчетов. Кривая для n от 1 до 10 также дает приемлемые результаты при $n \geq 3$, а также во всем диапазоне n , если запасы по надежности составляют не менее 3σ . Наконец, кривая для n от 1 до 20 дает приемлемые результаты той же точности в области $6 \geq n \geq 4$ и $n > 10$. При запасах надежности не менее 3σ эта кривая дает приемлемые результаты в области $n \geq 3$.

Таким образом, получено условие оптимальной надежности в виде линейного уравнения (18) или (32), где коэффициенты a и b могут быть найдены из табл. 3 с использованием интерполяции для промежуточных значений n или же по уравнениям (28) и (31). Но следует учесть, что все приведенные уравнения получены при условии независимости случайных границ области работоспособности.

Если рассмотреть начальную надежность по схеме случаев, то она может быть вычислена по выражению:

$$P_n = 1 - Q_n = 1 - (P_m q_{NN} + P_m q_{NV} + q_{NN} q_{NV}), \quad (33)$$

где q_{NN} и q_{NV} – соответственно, значения вероятности начального отказа по нижней и верхней границам.

При зависимости границ максимальная возможная ошибка составит:

$$\Delta P_n = q_{NN} \cdot q_{NV}. \quad (34)$$

Аппаратура должна обладать высокой надежностью; расстояние от границ области работоспособности до границ рабочей области составляет примерно (3–4) σ . В этом случае указанной погрешностью можно пренебречь. Так, при $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = 3$ погрешность составит примерно $2 \cdot 10^{-6}$, в то время как таблицы функции Лапласа позволяют ее вычислить с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, уравнениями (18) и (32) практически можно пользоваться как для зависимых, так и для независимых границ области работоспособности.

При оптимизации аппаратуры по приведенным выражениям следует учесть, что они получены при значениях $n \geq 1$ (т.е. n определяется как отношение большего значения среднеквадратического отклонения к меньшему), а \mathbf{I}_1 определяется как относительное расстояние границы рабочей области от границы области работоспособности с меньшим значением среднеквадратического отклонения.

В случае, когда ширина рабочей области $\Delta \lambda = \lambda_{1\max} - \lambda_{1\min}$ является постоянной величиной, то

оптимальное положение рабочей области может быть найдено непосредственно по выражению (18). Если же крайние точки рабочей области связаны зависимостью (3), т.е. ширина рабочей области меняется в зависимости от ее положения, то данное уравнение требует некоторых преобразований. После подстановки (7) и (8) в (18) и несложных преобразований получим

$$\lambda_{nom} = \frac{a\sigma_n + bm_v + m_n(1-b)}{1-\alpha+b(1+\beta)}. \quad (35)$$

По данному уравнению непосредственно вычисляется номинальное значение внешнего воздействия λ_1 , крайние значения рабочей области вычисляются по уравнениям (3).

Полученные выше выражения оптимизации аппаратуры по критерию начальной надежности выведены при следующих двух ограничениях:

- область работоспособности аппаратуры имеет две границы – верхнюю λ_{IV} и нижнюю λ_{IN} ;
- оптимизация достигается за счет изменения номинального (соответственно, и крайних) значения одного внешнего воздействия.

Рассмотрим, насколько эти ограничения сужают область применения данного способа оптимизации.

Область работоспособности, ограниченная любым количеством границ, может быть сведена при определенных условиях к области работоспособности с двумя границами. Поэтому первое ограничение существенного значения не имеет.

Если на аппаратуру действует несколько внешних воздействий, то не всеми из них можно свободно варьировать. Например, если внешним воздействием является напряжение переменного тока, то его значение легко изменять изменением коэффициента передачи трансформатора на входе данной аппаратуры. Если же внешним воздействием является температура окружающей среды, то изменять ее пределы – значит сужать область применения аппаратуры, т.е. температура окружающей среды не может быть параметром оптимизации.

Поэтому и это ограничение во многих случаях может оказаться несущественным.

В случае независимости границ области работоспособности от значений внешних воздействий оптимизацию начальной надежности можно производить по каждому внешнему воздействию отдельно.

В случае, когда значения одного внешнего воздействия, например λ_1 , соответствующие граничным значениям области работоспособности, связаны уравнением регрессии с другим внешним воздействием λ_2 и каждое внешнее воздействие может изменяться при настройке, оптимизация может быть рассмотрена только во взаимосвязи обоих воздействий. Оптимизацию можно вести как изменением λ_1 , так и λ_2 . Общего выражения оптимизации быть не может, т.к. условие оптимизации зависит от вида уравнений

регрессии каждой границы. Каждому значению λ_2 соответствуют свои значения математических ожиданий и среднеквадратических отклонений границ области работоспособности. Подставив эти зависимости в (35), можно получить уравнение $\lambda_{1nom}=f(\lambda_2)$, соответствующее линии максимального значения начальной надежности. С учетом этого уравнения для каждого значения λ_2 по выражению (6) можно вычислить значение начальной надежности и выбрать такое λ_2 (и, соответственно, λ_1), которое соответствует максимальному значению надежности.

Деление всех воздействий на внешние воздействия и внутренние параметры является чисто условным, поэтому указанным методом может быть исследовано влияние и произведена оптимизация аппаратуры по любому параметру.

Нахождение оптимального значения как любого параметра, так и рабочей зоны может быть проведено по выражению (18) с табулированными значениями a и b в зависимости от n или по аналитической зависимости по выражению (32) со значениями k_3 , k_4 и k_5 , согласно табл. 3.

Погрешность от применения аппроксимирующих уравнений меньше, чем позволяет точность вычисления с применением табулированной функции Лапласа.

ВЫВОДЫ. От расположения границ области работоспособности относительно рабочей зоны зависит начальная надежность изделия. Возможно такое их взаимное расположение, при котором начальная надежность изделия будет максимальной. Условия получения максимальной надежности рассчитано числовым методом с применением табулированной функции Лапласа. Расчет показал, что табулированную функцию возможно заменить аналитической. Путем аппроксимации числовых зависимостей получено аналитическое уравнение условия максимальной надежности. Оценка погрешности от применения аналитических зависимостей показала, что погрешность значительно меньше, чем обычно требуется при оценке надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тэйлор Н. Проектирование надежной аппаратуры // Вопросы радиолокационной техники. – 1957. – № 6. – С. 811–822.
2. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Советское право, 1970. – 77 с.
3. Вильнер В.Б. Контроль начальной надежности вторичных источников питания при приемодаточных испытаниях. В кн.: Оптимизация устройств автономной энергетики. – К., 1978.
4. Вильнер В.Б., Смолянский И.И. Оценка начальной надежности устройств преобразовательной техники. Сб. «Преобразование параметров электрической энергии». – Киев: Наукова думка, 1975.

OPTIMIZATION OF INITIAL RELIABILITY OF INVERTER DEVICES

H. Babenko, O. Babenko, V. Vilner, O. Galinovsky

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»
 prosp. Pobedy, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: ntuukafem@ua.fm

At a certain change of interposition of the boundaries of defining influences (external and internal) with respect to the working area it is possible to receive the maximum value of initial product reliability (P_n), which is determined by using the Laplace function. From the formula given in article it is visible that initial reliability depends on relative distance between the bottom boundary of the working area and the expectation of the lower boundary of the area of capacity – $\mathbf{1}_1$, on the ratio of the standard deviations of the upper and lower boundaries of area of capacity – n and on the relative distance between the expectations of the upper and lower boundaries of area of capacity without working area width – $\mathbf{1}$.

The problem of finding the maximum value of P_n is reduced to finding the location of boundary of the working area $\mathbf{1}_1$ for given values of n and $\mathbf{1}$. Problem is solved by a numerical method. The results showed that the accuracy of the calculation of highly reliable equipment is not provided with opportunities of tabulated Laplace function and a more accurate method of setting a maximum P_n is necessary.

Considering reliability according to the scheme of cases and assuming the normal law of distribution, points of relative control $\mathbf{1}_1$ are defined. In contrast to the method of numerical approximations obtained formulas are applicable at any values of n , $\mathbf{1}_1$, $\mathbf{1}$ and allow to find optimization conditions with any accuracy and including the location of the boundaries in which it is impossible to calculate the P_n according to tables of Laplace functions. The resulting equation is approximated and received a condition of optimum reliability in the form of the linear equation which coefficients can be found from tables or by the above formulas.

At independence of borders of area of capacity from values of external influences reliability optimization can be performed for each external action separately. In a case when the values of external influences, corresponding boundary values of area of capacity, related to external influences regression equation, the optimization can be considered only in relation of both effects.

The error from the use of approximate formulas is less than allowed by the calculation accuracy using tabulated Laplace function.

Key words: boundaries of capacity, Laplace function, reliabilities, approximation, regression.

REFERENCES

1. Taylor, N.H. (1958), "Design of reliable equipment", *Voprosy radiolokacionnoj tehniki*, no. 1. (in Russian)
2. Mihaylov, A.V. (1970), *Ekspluatacionnye dopuski i nadezhnost v radioelektronnoj apparature* [Operational tolerances and reliability in electronic equipment], Sovetskoe pravo, Moscow, Russia. (in Russian)
3. Vilner, V.B. (1978), "Control of initial reliability of secondary power supplies at acceptance tests", *Optimization of devices of autonomous power*, Kyiv, Ukraine. (in Russian)
4. Vilner, V.B. and Smolyanskiy I.N. (1975), "Assessment of initial reliability of devices of transforming technique", *Preobrazovanie parametrov elektricheskoy energii*, Naukova dymka, Kyiv, Ukraine. (in Russian)

Стаття надійшла 10.05.2013.