УДК 621.391.18

КОРРЕКТИРОВКА ДОПУСКОВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

А.М. Винограденко
Военная академия связи им. С.М. Буденного
Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3
E-mail: Vinogradenko.a@inbox.ru

А.В. Пасхальный
Войсковая часть 84841
Россия, 353440, Анапа, ул. Трудящихся, д. 2 В, корп. 2, кв. 160
E-mail: Alexp401@yandex.ru

Ключевые слова: радиоэлектронная система, техническое состояние, контролируемые параметры, выбросы, случайное событие, область допусков, корреляция, система массового обслуживания.

Аннотация: Предложено в математической модели технического состояния радиоэлектронной системы при оценке результатов измерений учитывать корреляцию выходных параметров. Для учета корреляции параметров предложено использовать область неопределенности, аппроксимированную эллипсоидом. Исследована зависимость взаимной корреляции параметров от числа выбросов за допустимые пределы многопараметрической радиоэлектронной системы.

1. Введение

Техническое состояние объектов контроля определяется нахождением характерных для конкретного типа оборудования параметров в пределах допусков.

Известные методы расчета эксплуатационных допусков на параметры радиоэлектронных систем (РЭС) не учитывают требования к допустимым значениям показателя качества системы, характеризующей РЭС, а также допускают значительную методическую погрешность, возрастающую с увеличением числа контролируемых параметров.

Цель исследования – исследование зависимости между контролируемыми параметрами многопараметрической РЭС для уменьшения числа отказов за счет коррекции допусков на параметры.

2. Аппроксимация допусков при многопараметрическом контроле

Существующие методы оценки технического состояния (ТС) РЭС в пространстве контролируемых параметров основаны на отображении области работоспособности и других допусковых областей в пространстве измеряемых характеристик РЭС, что отличает их от других методов более эффективным решением поставленной задачи.

Для оценки состояния РЭС в пространстве параметров необходима информация о границе области неопределенности, которая может быть задана в виде множества граничных точек или в виде гиперповерхностей. В этих целях область работоспособности аппроксимируют различными фигурами: прямоугольником (параллелепипедом), шаром (сферой), эллипсом (эллипсоидом) и др.

Проведенный анализ источников [1-4] показывает, что аппроксимация области неопределенности будет иметь форму эллипса (рис. 1), так как метод эллипсоидов наиболее применим для решения задач обработки неточных измерений величин контролируемых параметров РЭС как динамической системы с неопределенностями.

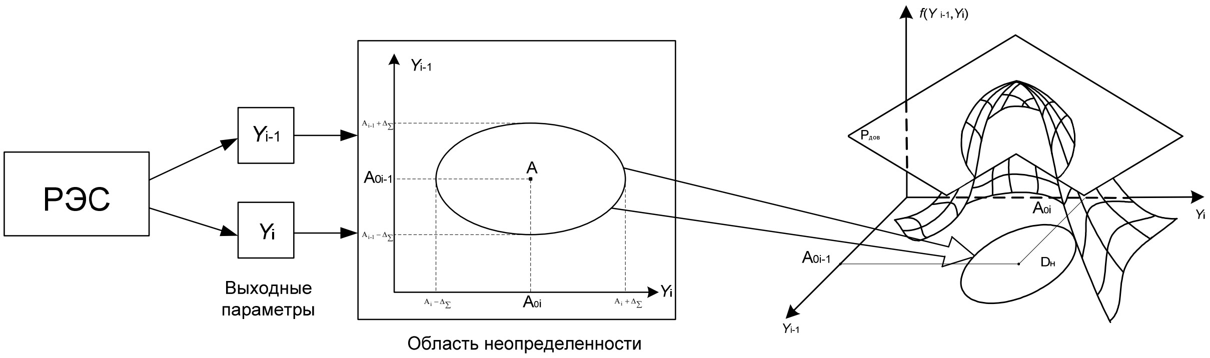

Рис. 1. Формирование области неопределенности при оценке технического состояния аппаратуры двумя выходными параметрами.

Как правило, ТС РЭС характеризуется не одним параметром, а целой группой параметров и определяется n-мерным вектором выходных параметров $\left(Y_1, Y_2, ..., Y_n\right)$. Существующий в настоящее время метод назначения независимых интервалов на каждый параметр в отдельности не позволяет учитывать корреляцию параметров РЭС, что приводит к снижению достоверности результатов контроля.

Потребность в коррекции (согласовании) допусков на параметры обусловлена тем, что один параметр Y_1, находясь в допуске, за счет связи с другим параметром Y_2, может увести последний за поле допуска.

Для учета корреляции параметров, характеризуемой функцией корреляции r, и, как следствие, повышения достоверности контроля, предлагается рассматривать область в пространстве параметров, в которой с заданной вероятностью находятся значения контролируемых параметров $\left(Y_1, Y_2, ..., Y_n\right)$. Поэтому, при оценке ТС РЭС предлагается использовать область неопределенности, размерность которой определяется количеством выходных параметров, характеризующих ТС РЭС в целом.

Область неопределенности D_H представляет собой начальное множество возможных значений n-мерного оцениваемого вектора выходных параметров $\overline{Y}$, характеризующего ТС РЭС, принимающего произвольные значения из эллипсоида [5]:

(1) $$\overline{Y} \in E\left(A_0, Q\right) = \left\{\left(Q^{-1}\left(Y - A_0\right), \left(Y - A_0\right)\right) \le 1\right\} = D_H ,$$

где $E\left(A_0, Q\right)$ – условное обозначение эллипсоида с параметрами A_0, Q; A_0 – n-мерный вектор центра эллипсоида; Q – симметричная положительно определенная матрица размерности $n \times n$ характеризующая погрешность измерений и средств измерений; скобки (,) обозначают скалярное произведение векторов. Выражение (1) является математической моделью технического состояния РЭС с учетом погрешностей измерений.

Однако учет коррелированности выходных параметров вызывает определенные трудности, поэтому возникает необходимость в упрощении математической модели, описывающей техническое состояние РЭС путем сведения исходной задачи построения кривых второго порядка к каноническому виду за счет поворота осей координат эллипсоида, характеризующего область неопределенности, параллельно осям координат параметров [6].

Решение подобных задач представлено в работах [7], в которых описывается построение области неопределенности ТС РЭС, оцениваемое двумя выходными параметрами.

Ориентация эллипса описываемого выражением (1) относительно координатных осей находится в прямой зависимости от коэффициента корреляции r системы параметров $\left(Y_{i-1}, Y_i\right)$; если выходные параметры некоррелированны, а для нормального закона распределения они и независимы, то оси симметрии эллипса параллельны координатным осям; в противном случае они составляют с координатными осями некоторый угол α . Таким образом, за счет поворота системы координат ее оси можно совместить с главными осями эллипсоида $\overline{Y}_{i-1}, \overline{Y}_i$. Тогда матрица Q будет диагональная:

$$Q = diag\left(Q_{11}, ..., Q_{nn}\right). \tag{2}$$

Неравенство (1) в случае (2) примет вид канонического уравнения эллипсоида:

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{ii}^{-1}\left(Y_i - A_i\right)^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(Y_i - A_i\right)^2}{c_i^2} \le 1, \tag{3}$$

где c_i – длины полуосей эллипсоида. Таким образом, в случае (2) имеем

$$Q_{ii} = c_i^2, \quad i = 1, ..., n. \tag{4}$$

Произведем расчет вероятности выброса контролируемых коррелированных параметров за пределы области неопределенности.

Вероятность попадания случайной точки в произвольную область D можно вычислить интегрированием плотности распределения по этой области. Если D – эллипс рассеивания B_k , интегрирование можно вести по слоям равной плотности, т.е. вычислить вероятность попадания в трехмерный и, вообще, в n-мерный эллипсоид рассеивания: заменой переменных $u_i = \frac{\xi_i}{\sigma_i}$, $i = 1, ..., n$ эллипсоид превращается в n-мерную сферу, вероятность попадания в слой $(r, r+dr)$ теперь пропорциональна $r^{n-1}\exp(-r^2/\sigma^2)$, а суммарная вероятность выражается интегралом

$$P\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{Y_i^2}{\sigma_i^2} < k^2\right) = P_{k;n} = C\int_0^k e^{-\frac{r^2}{2}} r^{n-1} dr, \tag{5}$$

где C – постоянная. Так как при $k \to \infty$, $P_{\infty;n} = 1$, значение C должно быть обратной величиной к интегралу с бесконечным верхним пределом.

Если интеграл в (5) выразить через неполную гамма-функцию, а константу C – через гамма-функцию $C = 1/\Gamma(n/2)$, то вероятность попадания в n-мерный эллипсоид можно вычислить по формуле:

$$P\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\Xi_i^2}{\sigma_i^2} < k^2\right) = P_{k;n} = \frac{\gamma(n/2, k^2/2)}{\Gamma(n/2)}. \tag{6}$$

Тогда, для выполнения задачи контроля наблюдаемых параметров, выходящих за пределы области неопределенности, вероятность выброса будет определяться исходя из (6) как «вероятность непопадания в эллипс рассеивания»:

(7) $$P_{выбр} = 1 - P_{k;n} = \frac{\gamma(n/2, k^2/2)}{\Gamma(n/2)}.$$

Представленная математическая модель оценки ТС РЭС, описанная выражением (1), позволяет повысить достоверность контроля ТС РЭС за счет учета корреляции выходных параметров, однако, нераскрытыми остаются вопросы зависимости корреляции многопараметрического объекта от частоты *n* выбросов (отказов) контролируемых параметров Y_i.

3. Влияние корреляции параметров на частоту выбросов

Пусть принята гипотеза о взаимосвязи корреляции контролируемых параметров многопараметрической РЭС с частотой выбросов.

С использованием методов теории случайных процессов определим зависимость частоты выбросов с вероятностью выбросов, определенной выше в виде вероятности непопадания в эллипс рассеяния коррелированных параметров.

Получим формулы для среднего числа $\bar{N}(T)$ выбросов стационарного случайного процесса $\xi(t)$, представляющего собой контролируемые параметры Y_i, изменяющиеся на интервале *T*, превышающих некоторый уровень *C*, а также для дисперсии $\sigma_N^2(T)$ числа выбросов.

Будем считать случайную величину $\xi(t)$ и ее производную $\xi'(t)$ непрерывными. Предположим, что известна совместная плотность вероятности $W_2(\xi(t),\xi'(t))$.

Из непрерывности следует, что на малом интервале Δt, то есть внутри интервала $t \le t' \le t + \Delta t$, функция близка к прямой $\xi'(t) = \xi(t) + \xi'(t)(t' - t)$.

Поэтому на достаточно малом Δt не будет ни одного выброса или будет один выброс. Обозначим через P_1 вероятность того, что будет один выброс, а через P_0 – вероятность того, что не будет ни одного выброса. Очевидно, что среднее число выбросов на интервале Δt равно $\bar{N}(\Delta t) = 1 \cdot P_1 + 0 \cdot P_0 = P_1$.

Для вычисления P_1 заметим, что выражение $dP = W_2(\xi(t),\xi'(t))\,\Delta\xi\Delta\xi'$, $\xi(t) = C$, определяет вероятность того, что функция $\xi(t)$, близкая к прямой и при этом производная заключена в интервале от $\xi'(t)$ до $\xi'(t) + \Delta\xi'$.

Вероятность пересечения произвольного отрезка $AC = \Delta t$ с производной в пределах от $\xi'(t)$ до $\xi'(t) + \Delta\xi'$ равна $dp = W_2(\xi(t),\xi'(t))\,\xi'(t)\Delta\xi'\Delta t$, $\xi(t) = C$.

Выбросы (пересечения уровня *C* снизу вверх) будут происходить при всех положительных значениях производной, то есть при $0 \le \xi(t) < \infty$. Поэтому полная вероятность P_1 пересечения уровня *C* на интервале $[t, t + \Delta t]$ равна

(8) $$P_1 = \Delta t \int_0^{\infty} \xi' W_2(C, \xi')\, d\xi'.$$

Но вероятность P_1 представляет собой вероятность непопадания и совпадает со средним числом выбросов, приходящихся на весь интервал $[t, t + \Delta t]$. Поделив обе части этого равенства на Δt, находим среднее число выбросов за единицу времени внутри этого интервала

(9) $$\bar{N}_1 = \int_0^\infty \xi' W_2(C,\xi')d\xi'.$$

Среднее число выбросов на интервале $[0,T]$ получаем интегрированием правой части формулы (9):

(10) $$\bar{N}(T) = \int_0^T dt \int_0^\infty \xi' W_2(C,\xi')d\xi'.$$

Следовательно, полная вероятность пересечения порогового уровня (допуска) $P_{выбр} = \Delta t \int_0^\infty \xi W_2(C,\xi)d\xi$ прямо пропорциональна среднему числу выбросов $\bar{N}_1 = \frac{P_{выбр}}{\Delta t}$ за единицу времени внутри интервала $[t; t+\Delta t]$, что позволяет осуществлять коррекцию допусков взаимосвязанных параметров.

4. Заключение

Определение допусковых областей на группу параметров позволяет учитывать корреляцию параметров РЭС, что приводит к повышению достоверности результатов контроля. С увеличением частоты взаимной коррекции допусков происходит увеличение частоты «выбросов», и наоборот – с увеличением числа (частоты) выбросов возникает необходимость адаптации допусков. Таким образом, динамика изменений пороговых величин (порогов), с учетом взаимосвязанности значений контролируемых параметров, представляет собой адаптацию пороговых значений по эллипсу. Это позволяет прогнозировать нахождение параметров РЭС в заданных допусках в течение требуемого интервала времени, что способствует более эффективной (безаварийной) работе системы.

Список литературы

1. Федоренко В.В., Винограденко А.М., Самойленко В.В., Самойленко И.В., Шарипов И.К. Минимизация области параметрической неопределенности для ремонтируемой системы // Материалы XXI Международной конференции «Мягкие вычисления и измерения» (SCM '2018). СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 35-38.
2. Abramov O.V, Dimitrov B.N. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // Reliability: Theory&Application. 2017. Vol. 12, No. 4 (47). P. 39-48.
3. Abramov O.V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devises and Systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, No. 4. P. 594-603.
4. Chernousko F.L. State Estimation for Dynamic Systems. Boca Raton: CRC Press, 1994. 304 p.
5. Федоренко В.В. Оптимизация восстановления технической системы управления в условиях неопределенности ее состояния // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 4. С. 56-58.
6. Винограденко А.М. Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния РТК // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 53-60.
7. Винограденко А.М., Федоренко В.В. Оптимизация области параметрической неопределенности контролируемого радиоэлектронного оборудования // Мягкие измерения и вычисления. 2018. № 2 (3). С. 10-18.