

УДК 62-52:006.91:53.088.6

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГРАНИЦ КОНТРОЛЬНЫХ ДОПУСКОВ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

¹Гузенко В.Л., ¹Миронов А.Н., ¹Миронов Е.А., ²Шестопалова О.Л.

¹ФГКВООУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург,
e-mail: vka@mail.ru, mironov-anik@yandex.ru, john682@mail.ru;

²Филиал «Восход» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Байконур, e-mail: neman2004@mail.ru

Исследуется влияние абсолютного значения и знака погрешности задания контрольных допусков на качество функционирования промышленного оборудования непрерывного использования. При положительной погрешности снижается качество выпускаемой продукции из-за возможности функционирования оборудования в состоянии скрытого параметрического отказа. При отрицательной погрешности уменьшается производительность оборудования из-за вынужденных перерывов функционирования для избыточного регулирования параметров технического состояния. Показано, что в случае несимметричной функции потерь (неодинаковом ущербе при равных по модулю и противоположных по знаку погрешностях задания контрольных допусков) для минимизации обобщенного ущерба целесообразно смещать назначаемую границу поля контрольных допусков относительно ее истинного значения. Величина и знак смещения при этом зависит от соотношения ущербов от простоев и нахождения в состоянии скрытого отказа. Предлагается оценивать степень снижения качества функционирования оборудования величиной обобщенного ущерба. Рассматривается способ определения границ области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков, основанный на минимальной либо приемлемой величине обобщенного ущерба.

Ключевые слова: контрольный допуск, погрешность задания контрольных допусков, промышленное оборудование непрерывного использования, обобщенный ущерб, качество функционирования

EVALUATION OF INFLUENCE ACCURACY OF BORDER CONTROL VALUES TOLERANCE ON THE QUALITY OF FUNCTIONING EQUIPMENT FOR CONTINUOUS USE

¹Guzenko V.L., ¹Mironov A.N., ¹Mironov E.A., ²Shestopalova O.L.

¹Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg,
e-mail: vka@mail.ru, mironov-anik@yandex.ru, john682@mail.ru;

²A Branch «Voskhod» of the Moscow aviation institute (national research university),
Baykonur, e-mail: neman2004@mail.ru

Influence of absolute value and sign of the error of job of control tolerances for quality of functioning of the industrial equipment of continuous use is investigated. At a positive error quality of products decreases because of the possibility of equipment functioning in a condition of the hidden parametric failure. At a negative error equipment productivity decreases because of the compelled functioning breaks for regulation of parameters of technical condition. It is shown that in the case of asymmetric loss function (not identical damage at equal in magnitude and opposite in sign to the control selection error tolerances) to minimize the generalized damage it is advisable to shift the field boundary assignable control tolerances relative to its true value. It is offered to estimate extent of decline in quality of functioning of the equipment by the use the size of the damage. A method is proposed for determining the boundaries of the tolerance range error of job control tolerances, based on the acceptable value of the generalized damage.

Keywords: control tolerance, the error of job of control tolerances, the industrial equipment of continuous use, generalized damage, quality of functioning

Промышленное оборудование непрерывного применения составляет значительную долю современного технологического парка средств производства в различных отраслях экономики. В наибольшей степени к данному виду техники относится оборудование газо- и нефтеперерабатывающих и добывающих комплексов, автоматических и автоматизированных машиностроительных производств конвейерного типа, систем мониторинга параметров объектов управ-

ления в космической технике, энергетике, медицине, атомной, химической промышленности и в военном деле. Особенностью такого оборудования является необходимость обеспечения непрерывного и качественного функционирования в течение заданных длительных интервалов эксплуатации [3]. Перерывы в функционировании при этом жестко регламентированы планами целевого применения и используются в основном для поддержания оборудования

в удовлетворительном техническом состоянии, а также для восполнения расходуемых в процессе функционирования запасов материальных ресурсов.

Перерывы в применении по назначению отрицательно влияют на суммарный объем выпуска продукции, однако вообще без них обойтись невозможно, так как в этом случае снижается качество выпускаемой продукции из-за изменения в процессе эксплуатации значений параметров технического состояния элементов оборудования вследствие действия процессов старения, износа и разрегулирования. При достижении параметрами технического состояния заданных предельно допустимых значений (границ контрольных допусков) возникает потребность в регулировании параметров. В этих условиях важное значение приобретает задача повышения точности определения граничных значений полей контрольных допусков параметров технического состояния [2, 4].

В статье рассматриваются вопросы моделирования влияния погрешности задания граничных значений полей контрольных допусков на качество функционирования промышленного оборудования непрерывного использования. Кроме того, предложен способ определения границ области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков, основанный на введении максимально допустимой величины обобщенного ущерба от неточности задания допусков.

Формулировка проблемы и противоречий

Существующие расчетно-аналитические методы определения значений границ полей допусков параметров технического состояния основаны в основном на аппроксимации многомерной области работоспособности вписанным в нее гипербрусом, проекции которого на оси пространства состояний объекта позволяют задавать независимые поля допусков на параметры технического состояния [1, 5, 6]. При таком подходе минимизируется вероятность нахождения оборудования в состоянии скрытого параметрического отказа, однако формируются дополнительные потери из-за простоев на регулирование параметров, обусловленные принудительным сужением границ области работоспособности при проведении аппроксимации.

Представляется целесообразным при определении границ поля допуска комплексно учитывать два вида ущерба – возможный ущерб в виде потерь качества продукции от нахождения оборудования в состоянии скрытого параметрического от-

каза и возможный ущерб от простоев в выпуске продукции, обусловленный необходимостью периодического регулирования параметров технического состояния.

Обобщенный (суммарный) ущерб является в данном случае интегральным показателем качества функционирования промышленного оборудования непрерывного использования и напрямую зависит от погрешности определения граничных значений полей контрольных допусков параметров технического состояния элементов оборудования. При оценивании величины обобщенного ущерба должны учитываться как величина абсолютного значения погрешности, так и ее знак. Так, при положительной погрешности составляющая ущерба обусловлена снижением качества выпускаемой продукции из-за возможности функционирования оборудования в состоянии скрытого параметрического отказа. При отрицательной погрешности составляющая ущерба возникает по причине уменьшения объема произведенной продукции из-за вынужденных перерывов функционирования для избыточного регулирования параметров технического состояния.

В связи с отмеченным выше представляется важным и актуальным решение проблемы определения границ области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков (диапазона допустимой погрешности определения контрольных допусков) на основе учета величины обобщенного ущерба.

Пути решения проблемы

Проанализируем процесс функционирования промышленного оборудования непрерывного использования, которое в дальнейшем будем называть объектом контроля (ОК), при следующих допущениях.

Техническое состояние ОК определяется по результатам контроля группы параметров технического состояния (ПТС)

$X_{(n)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, n – число ПТС. Все параметры статистически независимы. Контроль параметров технического состояния непрерывный. Изменение значений ПТС во времени – монотонное, возрастающее.

На каждый параметр задано значение верхней границы поля контрольного допуска (ГПКД) $x_{ни}$. В начале эксплуатации и после окончания регулировки значение параметра равно его номинальному значению $x_{ном}$. ОК функционирует на интервале времени $[0, t]$, на котором возможны регулировки значений параметров в случае достижения ГПКД. На интервале $[0, t]$ размещается целое число N_c циклов обслуживания ОК

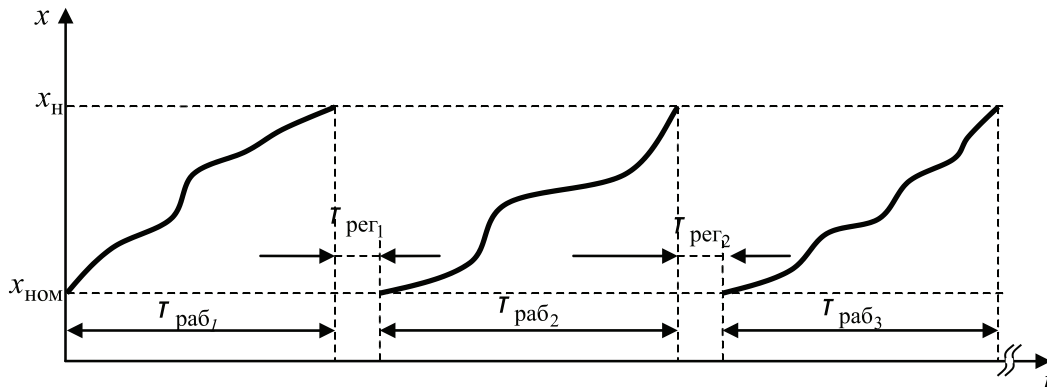


Рис. 1. Изменение значений периодически регулируемого параметра технического состояния объекта контроля во времени

(циклом обслуживания будем считать суммарное время нахождения ОК в работоспособном состоянии и примыкающим к нему состоянию регулирования ПТС).

Рассмотрим вначале случай с единственным ПТС. Для данного варианта изменение ПТС во времени можно представить в виде случайной пилообразной функции, показанной на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что на интервале $[0, t]$ функционирование ОК периодически прерывается на проведение регулировок ПТС с целью приведения его к номинальному значению.

Назовем коэффициентом простоя ОК $K_{\Pi}(t)$ долю времени, определенную на интервале $[0, t]$, в течение которого объект не используется по прямому назначению вследствие проведения на нем мероприятий по регулировке ПТС.

Выражение для коэффициента простоя ОК можно записать в следующем виде:

$$K_{\Pi}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{рег}}(t)} \tau_{\text{рег}_i}}{\sum_{j=1}^{N_{\text{раб}}(t)} \tau_{\text{раб}_j} + \sum_{i=1}^{N_{\text{рег}}(t)} \tau_{\text{рег}_i}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{рег}}$ – число интервалов регулировок; $N_{\text{раб}}$ – число интервалов работы ОК на интервале $[0, t]$.

С учетом сделанного выше допущения можно записать, что $N_{\text{рег}} = N_{\text{раб}} = N_c$. Тогда выражение (1) преобразуется к виду

$$K_{\Pi}(t) = \frac{\bar{\tau}_{\text{рег}}}{\bar{\tau}_{\text{раб}} + \bar{\tau}_{\text{рег}}},$$

где $\bar{\tau}_{\text{рег}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \tau_{\text{рег}_i}}{N_c}$ – средняя длительность ре-

гулировки ПТС; $\bar{\tau}_{\text{раб}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_c} \tau_{\text{раб}_j}}{N_c}$ – средняя дли-

тельность нахождения в работоспособном состоянии за один цикл обслуживания ОК.

Принимая во внимание, что процедура регулировки ПТС обычно слабо зависит от случайных факторов, так как выполняется подготовленным штатным персоналом по одним и тем же технологическим картам, можно полагать $\bar{\tau}_{\text{рег}_i} = \text{const} = \tau_{\text{рег}}$. Тогда можно записать

$$K_{\Pi}(t) = \frac{\tau_{\text{рег}}}{\bar{\tau}_{\text{раб}} + \tau_{\text{рег}}}. \quad (2)$$

Определим, каким образом погрешность задания границы поля контрольного допуска Δ_x влияет на коэффициент простоя $K_{\Pi}(t)$.

Погрешность может быть вычислена как $\Delta_x = x_{\text{н}} - x_0$, где $x_{\text{н}}$ – назначенное (установленное в документации) значение верхней ГПКД параметра x , а x_0 – истинное значение данной границы. В зависимости от соотношения значений $x_{\text{н}}$ и x_0 значение погрешности Δ_x может быть как положительным, так и отрицательным

$$\Delta_x = \begin{cases} \Delta_x^{(+)}, & x_{\text{н}} > x_0, \\ \Delta_x^{(-)}, & x_{\text{н}} < x_0. \end{cases}$$

Положительный знак погрешности свидетельствует о том, что фактическая ГПКД смещена относительно истинной в сторону расширения поля допуска. Такое смещение ГПКД, с одной стороны, приводит к уменьшению коэффициента простоя, так как увеличивается средняя длительность нахождения в работоспособном состоянии за один цикл обслуживания ОК. С другой стороны, при положительной погрешности с течением времени возникает возможность достижения параметром технического состояния зоны скрытого параметрического отказа, т.е. при $x(t) \in [x_0, x_{\text{н}}]$ ОК считается работоспособным, хотя фактически достигнуто состояние параметрического отказа, при котором параметры

в качества продукции, производимой ОК, не полной мере удовлетворяют требованиям. Такое состояние в теории статистического контроля качества продукции называется ошибкой 2-го рода.

При отрицательной погрешности $\Delta_x^{(-)}$ вероятность ошибки 2-го рода равна нулю, однако появляется ошибка 1-го рода, когда при $x(t) \in [x_H, x_0]$ ОК считается отказавшим и производится регулировка ПТС, хотя в действительности в данной ситуации параметрического отказа нет.

Если бы цена ошибок первого и второго рода была одинаковой при равенстве модулей погрешностей $|\Delta_x^{(+)|}$ и $|\Delta_x^{(-)}|$, оптимальным вариантом с точки зрения минимума обобщенного ущерба был бы вариант $x_H = x_0$, т.е. с нулевой погрешностью $\Delta_x = 0$. В действительности же, как правило, функция потерь не симметрична, при этом ущерб при равенстве модулей погрешностей $|\Delta_x^{(+)|}$ и $|\Delta_x^{(-)}|$ не одинаков. В этой ситуации для минимизации обобщенного ущерба целесообразно смещать назначаемую ГПКД относительно x_0 , т.е. применять вариант с $x_H \neq x_0$. Величина и знак смещения при этом зависят от соотношения потерь.

Рассмотрим далее возможность получения модельных соотношений, позволя-

ющих определить величину и знак целесообразного смещения назначаемой ГПКД относительно x_0 .

В выражении (2) от Δ_x зависит только $\bar{\tau}_{\text{раб}}$ – средняя длительность нахождения в работоспособном состоянии за один цикл обслуживания ОК. С учетом этого можно записать

$$K_{\Pi}(t) = \frac{\tau_{\text{пер}}}{\bar{\tau}_{\text{раб}}(\Delta_x) + \tau_{\text{пер}}}. \quad (3)$$

Для определения $\bar{\tau}_{\text{раб}}(\Delta_x)$ представим изменение математического ожидания ПТС линейной функцией вида (рис. 2):

$$\bar{x}(t) = at + x_{\text{ном}}; \quad a = \text{tg}\alpha = \frac{1}{k}. \quad (4)$$

Рассмотрим вначале ситуацию с расширением ГПКД, т.е. когда $\Delta_x = \Delta_x^{(+)} \in]0, \infty]$. При расширении ГПКД имеем

$$\bar{\tau}_{\text{раб}}(\Delta_x) = \bar{\tau}_{\text{раб}0} + \Delta\bar{\tau}_{\text{раб}}(\Delta_x^{(+)}). \quad (5)$$

Подставив (5) в (3), и с учетом того, что $\bar{\tau}_{\text{раб}0} = k\Delta_x^* = k(x_0 - x_{\text{ном}})$, $\Delta\bar{\tau}_{\text{раб}}(\Delta_x^{(+)}) = k\Delta_x^{(+)}$, получим

$$K_{\Pi}(\Delta_x^{(+)}) = \frac{\tau_{\text{пер}}}{\bar{\tau}_{\text{раб}0} + \Delta\bar{\tau}_{\text{раб}}(\Delta_x^{(+)}) + \tau_{\text{пер}}}$$

или

$$K_{\Pi}(\Delta_x^{(+)}) = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(x_0 - x_{\text{ном}}) + k\Delta_x^{(+)} + \tau_{\text{пер}}} = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(\Delta_x^* + \Delta_x^{(+)}) + \tau_{\text{пер}}}, \quad (6)$$

где $\Delta_x^* = x_0 - x_{\text{ном}}$.

В ситуации с сужением ГПКД относительно x_0 , когда $\Delta_x^{(-)} \in [-\Delta_x^*, 0]$, аналогично (6) имеем

$$K_{\Pi}(\Delta_x^{(-)}) = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(x_0 - x_{\text{ном}}) + k\Delta_x^{(-)} + \tau_{\text{пер}}} = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(\Delta_x^* + \Delta_x^{(-)}) + \tau_{\text{пер}}}. \quad (7)$$

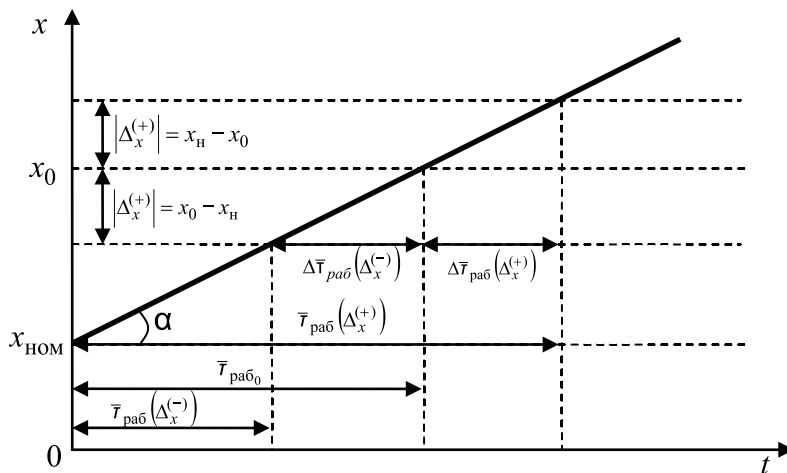


Рис. 2. Линейная аппроксимация изменения математического ожидания параметра технического состояния объекта контроля

Выражения (6) и (7) можно объединить, представив следующим образом:

$$K_{\Pi}(\Delta_x) = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(x_0 - x_{\text{ном}}) + k\Delta_x + \tau_{\text{пер}}} = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(\Delta_x^* + \Delta_x) + \tau_{\text{пер}}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta_x = \begin{cases} \Delta_x^{(+)}, & x_n > x_0, \\ \Delta_x^{(-)}, & x_n < x_0. \end{cases}$$

Заметим, что при $x_n = x_0 \cdot \Delta_x$ и выражение (8) преобразуется к виду

$$K_{\Pi}(0) = K_{\Pi 0} = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k(x_0 - x_{\text{ном}}) + \tau_{\text{пер}}} = \frac{\tau_{\text{пер}}}{k\Delta_x^* + \tau_{\text{пер}}}.$$

График зависимости коэффициента простоя ОК от погрешности Δ_x представлен на рис. 3.

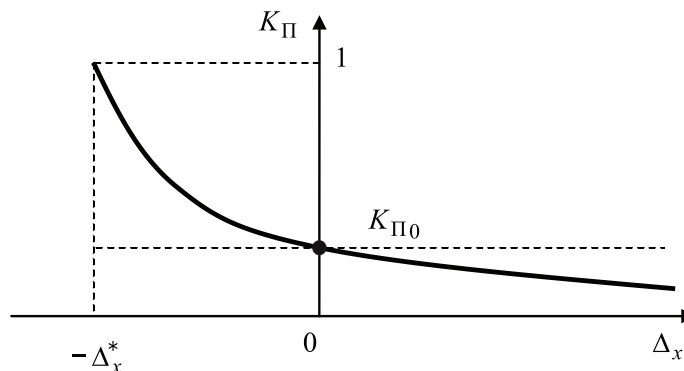


Рис. 3. Зависимость коэффициента простоя объекта контроля от погрешности Δ_x

Теперь можно рассчитать суммарный за время t ущерб от простоя при погрешности задания контрольного допуска, равной Δ_x , как

$$L_{\text{пр}}(\Delta_x; t) = K_{\Pi}(\Delta_x) \xi_{\text{пр}}^{\text{уд}} t = \frac{\tau_{\text{пер}} \xi_{\text{пр}}^{\text{уд}} t}{k(x_0 - x_{\text{ном}}) + k\Delta_x + \tau_{\text{пер}}} = \frac{\tau_{\text{пер}} \xi_{\text{пр}}^{\text{уд}} t}{k(\Delta_x^* + \Delta_x) + \tau_{\text{пер}}}, \quad (9)$$

где $\Delta_x \in [-\Delta_x^*, \infty)$; $\xi_{\text{пр}}^{\text{уд}}$ – средние удельные потери от нахождения ОК в состоянии простоя.

Суммарный за время t ущерб от нахождения в состоянии скрытого отказа при погрешности задания контрольного допуска, равной Δ_x , определяется на основе выражения

$$L_{\text{с.о.}}(\Delta_x; t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \Delta_x \leq 0; \\ \xi_{\text{с.о.}}^{\text{уд}} t Q_{\text{с.о.}}(\Delta_x; t), & \text{при } \Delta_x > 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $Q_{\text{с.о.}}(\Delta_x; t) = \int_{x_0}^{x_0 + \Delta_x} \varphi_{\dot{x}}(x, t) dx$ – вероятность нахождения ОК в состоянии скрытого параметрического отказа; $\varphi_{\dot{x}}(x, t)$ – плотность распределения случайного процесса с функцией математического ожидания (4) в сечении t ; $\xi_{\text{с.о.}}^{\text{уд}}$ – средние удельные потери от нахождения ОК в состоянии скрытого параметрического отказа.

Суммируя функции ущерба (9) и (10), можем представить обобщенный ущерб как

$$L_{\Sigma}(\Delta_x; t) = L_{\text{пр}}(\Delta_x; t) + L_{\text{с.о.}}(\Delta_x; t).$$

Рис. 4 иллюстрирует процесс определения границ области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков (диапазона допустимой погрешности определения контрольных допусков) на основе учета величины обобщенного ущерба.

Минимальное значение обобщенного ущерба достигается при $\Delta_x = \Delta_x^{\text{опт}}(t)$. При $\Delta_x = -\Delta_x^*$ значение обобщенного ущерба равно $L_{\text{пр}}^{\text{max}}(t) = \xi_{\text{пр}}^{\text{уд}} t$. При увеличении Δ_x величина обобщенного ущерба стремится к $L_{\text{с.о.}}^{\text{max}}(t) = \xi_{\text{с.о.}}^{\text{уд}} t \int_{x_0}^{\infty} \varphi_{\dot{x}}(x, t) dx$, причем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L_{\text{с.о.}}^{\text{max}}(t) = \xi_{\text{с.о.}}^{\text{уд}} t.$$

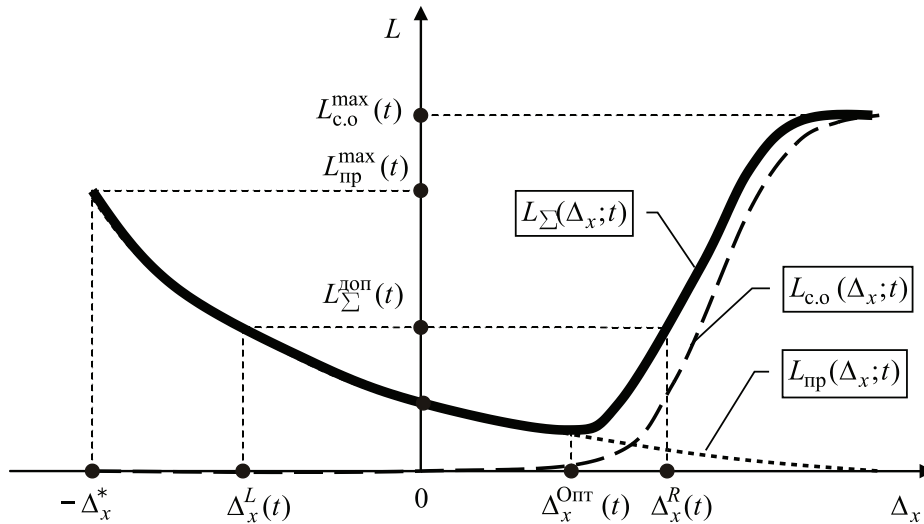


Рис. 4. Определение зависимости обобщенного ущерба от погрешности Δ_x

Если задать значение максимально допустимого обобщенного ущерба $L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t)$ на интервале $[0, t]$, границы области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков определяются как

$$\Delta_x^{\text{доп}}(t) \in [\Delta_x^L(t), \Delta_x^R(t)],$$

где

$$\Delta_x^L(t) = \Delta_x \mid L_{\text{np}}(\Delta_x; t) = L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t); \quad (11)$$

$$\Delta_x^R(t) = \Delta_x \mid L_{\text{np}}(\Delta_x; t) + L_{\text{c.o.}}(\Delta_x; t) = L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t). \quad (12)$$

Найдем аналитическое выражение для левой границы области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков $\Delta_x^L(t)$.

Для этого составим уравнение

$$L_{\text{np}}(\Delta_x; t) = L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t)$$

или
$$\frac{\tau_{\text{пер}} \xi_{\text{np}}^{y_{\text{д}}} t}{k(\Delta_x^* + \Delta_x^L) + \tau_{\text{пер}}} = L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t).$$

После несложных преобразований получаем

$$\Delta_x^L(t) = - \left[a \tau_{\text{пер}} \left(1 - \frac{\xi_{\text{np}}^{y_{\text{д}}} t}{L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t)} \right) + \Delta_x^* \right]. \quad (13)$$

Значение правой границы области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков $\Delta_x^R(t)$ является корнем уравнения

$$\frac{\tau_{\text{пер}} \xi_{\text{np}}^{y_{\text{д}}} t}{k(\Delta_x^* + \Delta_x^R) + \tau_{\text{пер}}} + \xi_{\text{c.o.}}^{y_{\text{д}}} t \int_{x_0}^{x_0 + \Delta_x^R} \varphi_{\dot{x}}(x, t) dx = L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t) \quad (14)$$

или

$$\frac{\tau_{\text{пер}} \xi_{\text{np}}^{y_{\text{д}}} t}{k(\Delta_x^* + \Delta_x^R) + \tau_{\text{пер}}} + \xi_{\text{c.o.}}^{y_{\text{д}}} \int_{x_0}^{x_0 + \Delta_x^R} \varphi_{\dot{x}}(x, t) dx = L_{\Sigma}^{\text{доп}} / t. \quad (15)$$

В последнем случае задается допустимый средний удельный ущерб $L_{\Sigma}^{\text{доп}} / t$ и, исходя из его значения, определяется правая граница области допустимых значений погрешности $\Delta_x^R(t)$.

При нескольких ПТС $X_{(n)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ на каждый параметр задаются свои значения верхней ГПКД $x_{\text{ни}}$ и определяются номинальные значения $x_{\text{номи}}$.

Рассчитываются величины $L_{\Sigma_i}^{\text{доп}}(t) = \frac{L_{\Sigma}^{\text{доп}}(t)}{n}$, $i = \overline{1, n}$ максимально допустимых на интервале $[0, t]$ значений обобщенного ущерба по всем параметрам технического состояния. Затем на основе выражений (11)–(15) определяются значения границ области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков для каждого ПТС.

И, наконец, вычисляются оптимальные по критерию минимума обобщенного ущерба значения погрешности $\Delta_{x_i}^{\text{опт}}(t)$, $i = \overline{1, n}$.

Выводы

Рассмотрены вопросы моделирования влияния погрешности задания граничных значений полей контрольных допусков на качество функционирования промышленного оборудования непрерывного использования. Показано, что в случае несимметричной функции потерь (неодинаковом

ущербе при равных по модулю и противоположных по знаку погрешностях задания контрольных допусков) для минимизации обобщенного ущерба целесообразно смещать назначаемую границу поля контрольных допусков относительно ее истинного значения. Величина и знак смещения при этом зависит от соотношения ущербов от простоев и нахождения в состоянии скрытого отказа. Предложен способ определения границ области допустимых значений погрешности задания контрольных допусков, основанный на введении максимально допустимой величины обобщенного ущерба от погрешности задания допусков.

Список литературы

1. Абрамов О.В., Здор В.В., Супоня А.А. Допуски и номиналы систем управления. – М.: Наука, 1976. – 160 с.
2. Вечеркин В.Б., Лоскутов А.И., Шестопалова О.Л. Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 2 (57). – С. 74–81.
3. Гузенко В.Л., Клепов А.В., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л. Оценивание показателей готовности элементов системы сбора и обработки информации о характеристиках эксплуатационных процессов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/117-13309>.
4. Миронов А.Н., Новиков А.Н., Шестопалова О.Л. Задание границ области работоспособности модернизируемого вооружения и военной техники с учетом неопределенности информации об условиях эксплуатации // Сб. трудов академии ВКА имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2011. – № 631. – С. 68–72.
5. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надёжность в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1970. – 216 с.
6. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1973. – 128 с.