УДК 623.764 (7.3)

© Цыплаков Ю.В., Ульянов С.В., Арцивенко В.В.
Tsyplakov Y., Ulyanov S., Artsivenko V.

УРАВНОВЕШИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА РАВЕНСТВА РИСКОВ УЩЕРБА ПРИ ЗНАЧИМЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТАХ НА БЕЗАВАРИЙНОСТЬ

BALANCING SAFETY RECORD MISSILE COMPLEXES ON THE BASIS OF EQUALITY SIGNIFICANT RISK OF LOSS TO THE ADDITIONAL EXPENSES ACCIDENTLESS

Аннотация. *Представлены методические материалы, развивающие и обобщающие результаты инженерного применения принципа равенства рисков ущерба от различных типов аварии ракетного комплекса или другой технической системы, предназначенные для определения и целенаправленного изменения показателей безопасности, когда дополнительные затраты на безаварийность сопоставимы с общим риском ущерба от аварии. Решение задачи в новой оптимизационной постановке расширяет номенклатуру технических систем, для которых при наличии необходимых данных можно осуществлять эффективное снижение суммы общего риска ущерба и дополнительных затрат.*

Annotation. *Methodical materials, develop and generalize the results of the engineering application of the principle of equality of risk of damage from different types of accident missile system or other technical systems designed to identify and focus changes for safety when the additional costs of accident-free compatible with the overall risk of damage from the accident. The solution to the optimization of the new formulation expands the range of technical systems, for which the presence of the necessary data can be carried out effectively reduce the amount of the overall risk of damage and additional costs.*

Ключевые слова. *Показатели безопасности, ракетный комплекс, принцип равенства риска ущерба, затраты, безопасность.*

Key words. *Safety performance, missile system, principle equality of risks damages, costs, safety.*

Введение

Применение принципа равенства слагаемых рисков ущерба от различных типов аварии технической системы для снижения общего риска ущерба в предположении, что дополнительные затраты на уменьшение вероятностей тех или иных типов аварии не ограничиваются, привело к двум относительно простым последовательно используемым правилам снижения общего риска [5]. Одно из них, названное правилом минимаксного выравнивания слагаемых рисков, применяется, если среди слагаемых рисков имеются по меньшей мере два, которые не равны друг другу.

В соответствии с ним снижение общего риска проводится путем уменьшения слагаемых рисков до уровня, наименьшего из них. Другое заключается в равномерном по всем слагаемым рискам снижении общего риска. Для пояснения сказанного воспользуемся следующими соотношениями.

Общий риск ущерба R_Σ от аварии A технической системы, имеющей k типов аварии, как следует из работ [1, 2, 4], равен

$$R_\Sigma = \sum_{j=1}^{k} R_j = \sum_{j=1}^{k} P(A_j) M\left[U_j\right], \qquad (1)$$

где R_j – слагаемые риски общего риска R_Σ, представляю-

Цыплаков Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник; 4 ЦНИИ Минобороны РФ;
Ульянов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника управления; 4 ЦНИИ Минобороны РФ;
Арцивенко Валерий Владимирович – начальник лаборатории;4 ЦНИИ Минобороны РФ, тел. 8-903-117-22-58.

Tsyplakov Yuri – doctor of technical sciences, professor, senior researcher, 4 CRI for the Defense Ministry RF;
Ulyanov Sergey – candidate of technical sciences, senior researcher, deputy head, 4 CRI for the Defense Ministry RF;
Artsivenko Valery – head of Laboratory, 4 CRI for the Defense Ministry RF, tel. 8-903-117-22-58.

щие собой для каждого типа аварии с номером j произведение вероятности $P(A_j)$ аварии A_j (аварии j-го типа) в течение одного года и математического ожидания $M\left[U_j\right]$ случайной величины ущерба U_j от аварии A_j.

В качестве управляющих воздействий для уменьшения R_Σ используются суммарные дополнительные затраты C_Σ, величина которых находится как сумма C_j

$$C_\Sigma = \sum_{j=1}^{k} C_j. \qquad (2)$$

Каждое из слагаемых C_j суммы (2) предназначено для снижения вероятности $P(A_j)$ посредством применения апроксимаций вида

$$P(A_j) = a_j e^{-b_j C_j}, \qquad (3)$$

область определения которых равна интервалу [0; ∞), а a_j, b_j – апроксимационные коэффициенты ($0< a_j <1$, $b_j >0$).

Принимается, что вероятность $P(A)$ аварии системы за один год для суммарного потока аварий различных типов с точностью до величин высших порядков малости равна

$$P(A) = \sum_{j=1}^{k} P(A_j). \qquad (4)$$

Однако простота применения принципа равенства рисков ущерба, обусловленная тем, что суммарные дополнительные затраты C_Σ не ограничиваются, сразу исчезают, если ввести ограничение величины C_Σ при помощи максимально допустимого ее значения C_Σ^D.

Даже при условии

$$C_\Sigma^D << R_\Sigma^{(T)}, \qquad (5)$$

в котором $R_\Sigma^{(T)}$ – требуемое (приемлемое) значение R_Σ, т.е. при условии, позволяющем пренебречь величиной C_Σ в сумме

$$S_\Sigma = R_\Sigma + C_\Sigma, \qquad (6)$$

где

$$S_\Sigma = \sum_{j=1}^{k} S_j = \sum_{j=1}^{k} (R_j + C_j), \qquad (7)$$

а именно в такой постановке решалась задача сбалансирования показателей безопасности в методике [6], имелись серьезные методические трудности. Было бы наивно ожидать, что трудности решения данной задачи в новой постановке, свободной от условия (5), станут меньше.

При выполнении исходных соотношений (1) – (4), (6), (7) и условий, диктуемых принятым принципом на входящие в исходные соотношения переменные величины $R_\Sigma, R_j, C_\Sigma, C_j, P(A_j), P(A), S_\Sigma, S_j$, между величинами S_Σ и C_Σ существует функциональная связь $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$. Такого функционального соответствия между значением величины S_Σ, равным

$$S_\Sigma^{(T)} = R_\Sigma^{(T)} + C_\Sigma^{(D)}, \qquad (8)$$

где $S_\Sigma^{(T)}$ – требуемое (приемлемое значение) S_Σ, и значением C_Σ^D величины C_Σ нет.

Поэтому условие

$$S_\Sigma \le S_\Sigma^{(T)}, \qquad (9)$$

ограничивающее сверху переменную S_Σ, в общем случае не эквивалентно условию

$$C_\Sigma \le C_\Sigma^{(D)}. \qquad (10)$$

Возникающие трудности будет легче преодолеть, если воспользоваться в качестве своеобразного трамплина предыдущей методикой [6], для которой аналогичным трамплином в свое время служил методический подход [5], использующий принцип равенства слагаемых рисков ущерба.

Постановка задачи и пути ее решения

Исходными данными для расчета сбалансированных показателей безопасности технической системы, игнорирующего требование (5), являются k, $R_\Sigma^{(T)}$, C_Σ^D, а также a_j, b_j, $M\left[U_j\right]$ для j=1,...,k.

Решаемая задача формулируется следующим образом.

При перечисленных исходных данных, из которых $R_\Sigma^{(T)}$, C_Σ^D – конечные положительные значения, найти для ракетного комплекса или другой интересующей технической системы уравновешенные по слагаемым рискам ущерба R_j значения S_Σ, R_Σ, C_Σ, $P(A)$, а также $P(A_j)$, R_j, C_j, S_j для j=1,...,k, соответствующие условному минимуму суммы S_Σ или, если под воздействием одного из двух ограничений (9) или (10) такого минимума не существует, то значения перечисленных показателей, соответствующие наименьшему значению S_Σ. В задаче должны выполняться две группы условий, одна из которых определяется функциональными связями между переменными S_Σ, C_Σ, $P(A)$, S_j, R_j, C_j, S_j, $P(A_j)$ в исходных соотношениях и действующими ограничениями при постоянных a_j, b_j, $M\left[U_j\right]$; другая – принятым для задачи принципом равенства рисков ущерба от различных типов аварии системы.

Развернутую постановку общей задачи и путей ее решения можно представить как следующую последовательность частных задач, при решении которых целесообразно использовать ранее опубликованные результаты, сделав необходимые ссылки.

1. Оценка необходимости сбалансированного снижения суммы

Снижение необходимо, если в исходном состоянии безопасности системы, характеризуемом начальным значением $S_\Sigma^{(0)} = R_\Sigma^{(0)}$ величин R_Σ и S_Σ для C_Σ=0 и начальными значениями $S_j^{(0)} = R_j^{(0)}$ величин S_j, R_j для C_j=0, j=1,...,k выполняется соотношение

$$R_\Sigma^{(0)} \geq R_\Sigma^{(T)} \tag{11}$$

или если среди $R_j^{(0)}$ найдутся хотя бы два отличающихся по величине значения.

Значения $R_\Sigma^{(0)}, R_j^{(0)}$ вычисляются по исходным данным для расчета с использованием формул

$$R_\Sigma^{(0)} = \sum_{j=1}^{k} R_j^{(0)}; \tag{12}$$

$$R_j^{(0)} = a_j M\left[U_j\right]. \tag{13}$$

Примем, что все значения $R_j^{(0)}$ разные по величине. Остальные возможные случаи (когда среди $R_j^{(0)}$ имеются одинаковые значения) будет легко получить из случая для разных $R_j^{(0)}$.

Кроме того, надо, как скоро выяснится, проверить, выполняется ли условие

$$a_{(1)} b_{(1)} M[U_{(1)}] > 1, \tag{14}$$

использующее обозначения, которые будут приняты после ранжирования значений $R_j^{(0)}$.

Если (14) не выполняется, то снижение S_Σ не возможно, так как уменьшение R_Σ в сумме $S_\Sigma = R_\Sigma + C_\Sigma$ будет сопровождаться опережающим увеличением C_Σ.

2. Ранжирование значений $R_j^{(0)}$. Разбиение области снижения R_Σ на шаги

При установленной необходимости решения задачи производится ранжирование $R_j^{(0)}$, как это сделано в работе [6], – значения $R_j^{(0)}$, j=1,...,k располагаются в порядке убывания. В обозначении $R_{(r)}^{(0)}$ общего элемента новой ранжированной последовательности подстрочный индекс r, являющийся порядковым номером элемента этой последовательности, заключен в скобки, чтобы отличать его от номера типа аварии j. Первый элемент $R_{(1)}^{(0)}$ ранжированной последовательности, обозначаемый еще $R_{\min}^{(0)}$, будет наибольшим из значений $R_j^{(0)}$, а последний $R_{(r)}^{(0)} = R_{\min}^{(0)}$ – наименьшим.

Этап выравнивания слагаемых рисков является частью снижения общего риска, на которой происходит уменьшение R_Σ от значения $R_\Sigma^{(0)}$, определенного формулами (12), (13), до уровня R_Σ^{k-1}, равного

$$R_\Sigma^{k-1} = kR_{\min}^{(0)}.$$

Этот этап можно разбить на шаги снижения общего риска R_Σ, отличающиеся числом уменьшаемых на них слагаемых рисков $R_{(r)}$. Число шагов выравнивания слагаемых рисков зависит от k и от того, на каком шаге «сработает» действующее в задаче ограничение. Максимальное число шагов равно k–1.

За этапом выравнивания $R_{(r)}$ следует этап равномерного по всем $R_{(r)}$ снижения R_Σ. Весь этот этап (от R_Σ^{k-1} до нуля) будет последним (k-м) шагом, на котором закончится, если этого не произойдет раньше, снижение R_Σ.

Таким образом, снижение R_Σ будет состоять как максимум из k шагов, которые получаются в результате разбиения области уменьшения R_Σ от его значения до нуля точками $R_\Sigma = R_\Sigma^{(q)}$, $q = 1, \ldots, k-1$. Чтобы q считать номером шага для всех шагов, надо к только что перечисленным значениям q добавить еще одно, равное k. Значение R_Σ в начале q-го шага ($q = 1, \ldots, k$) равно $R_\Sigma^{(q-1)}$, в конце – $R_\Sigma^{(q)}$.

На первом шаге снижается один-единственный слагаемый риск $R_{(1)}$, на втором снижаются два риска – $R_{(1)}, R_{(2)}$, на третьем – $R_{(1)}, R_{(2)}, R_{(3)}$ и т.д. На последнем шаге снижаются k рисков $R_{(r)}$ т.е. происходит равномерное снижение R_Σ по всем слагаемым риска.

В результате будут получены следующие шаги: от $R_\Sigma^{(0)}$ до $R_\Sigma^{(1)}$, от $R_\Sigma^{(1)}$ до $R_\Sigma^{(2)}$,..., от $R_\Sigma^{(k-2)}$ до $R_\Sigma^{(k-1)}$, от $R_\Sigma^{(k-1)}$ до $R_\Sigma^{(k)} = 0$.

После ранжирования значений $R_j^{(0)}$ слагаемых рисков R_j все величины и значения, имеющие индекс j в обозначениях, должны быть перенумерованы по r=1,...,k.

Это дает право записать

$$R_\Sigma = \sum_{r=1}^{k} R_{(r)} = \sum_{r=1}^{k} P(A_{(r)}) M\left[U_{(r)}\right]; \tag{15}$$

$$C_\Sigma = \sum_{r=1}^{k} C_{(r)}; \tag{16}$$

$$P(A_{(r)}) = a_{(r)} e^{-b_{(r)} C_{(r)}}. \tag{17}$$

3. Формулировка условий задачи, диктуемых принятым принципом

Из дальнейшего станет ясно, что переменная C_Σ в решаемой задаче равна

$$C_\Sigma = 2C_\Sigma^*, \tag{18}$$

где C_Σ^* – переменная, соответствующая условиям задачи [6].

Условия, являющиеся следствием принятия принципа равенства рисков ущерба от различных типов аварии системы, касаются отношений текущих приращений величин C_Σ^* на шагах снижения R_Σ и не зависят от коэффициента пропорциональности между C_Σ и C_Σ^*.

Поэтому при решении настоящей задачи можно использовать соответствующие формулы методики [6].

4. Аналитическое представление прямой и обратной зависимости R_Σ^* от C_Σ^*

Здесь R_Σ^*, C_Σ^* – новые обозначения использованных в работе [6] переменных R_Σ, C_Σ.

Опорными точками зависимости $R_\Sigma^* = R_\Sigma^*(C_\Sigma^*)$ являются точки $(C_\Sigma^{*(q)}, R_\Sigma^{*(q)})$, $q = 1, \ldots, k$.

Рис. 1 является графиком строго монотонной функции $R^*_\Sigma = R^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$, имеющей во внутренних опорных точках (при $q = 1, ..., k-1$) разрывы I рода. Показанный на рис.1 график $C^*_\Sigma = C^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$ не является биссектрисой угла между координатными осями. Это объясняется тем, что масштабы шкал координатных осей отличаются друг от друга.

При аналитическом представлении прямой и обратной зависимости R^*_Σ от C^*_Σ для нашей задачи следует использовать новые обозначения R^*_Σ, C^*_Σ вместо R_Σ, C_Σ

$$R^*_\Sigma = R^*_\Sigma(C^*_\Sigma) = R^{*(q-1)}_\Sigma - qR^{(q)}_{(q)} \times \\ \times\left[1 - \exp\left\{-b_{(q)}\alpha^{(q)}_{(\alpha)}(C^*_\Sigma - C^{*(q-1)}_\Sigma)\right\}\right], \qquad (19)$$

где q – номер шага, начиная с первого;

$\alpha^{(q)}_{(q)}$ – постоянные для каждого q коэффициенты;

$C^{*(q-1)}_\Sigma$, $R^{*(q-1)}_\Sigma$ – координаты опорных точек зависимости R^*_Σ, (C^*_Σ);

$$C^*_\Sigma = C^{*(q-1)}_\Sigma - \frac{1}{b_{(q)}\alpha^{(q)}_{(q)}} \ln\left[1 + \frac{R^*_\Sigma - R^{*(q-1)}_\Sigma}{qR^{(q)}_{(q)}}\right]. \qquad (20)$$

5. Анализ основной зависимости

В качестве таковой в данной работе принимается

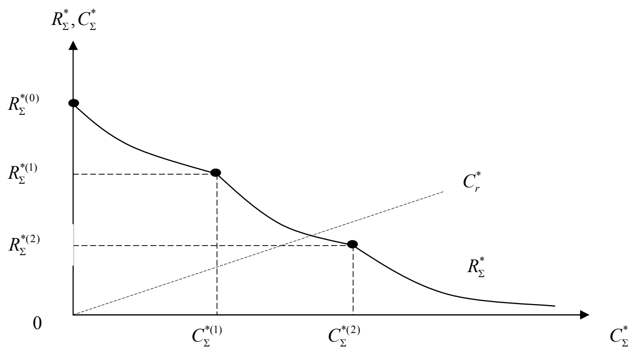

Рис. 1. Графики зависимостей R^*_Σ, C^*_Σ от C_r^*

зависимость S_Σ от C_Σ.

Рассмотрим переменные величины S_Σ, C_Σ, R_Σ, R_Σ^*, C_Σ^* и их пары:

$$\left.\begin{array}{l} S_\Sigma, C_\Sigma; S_\Sigma, R_\Sigma; S_\Sigma, R^*_\Sigma; S_\Sigma, C^*_\Sigma; \\ C_\Sigma, R_\Sigma; C_\Sigma, R^*_\Sigma; C_\Sigma, C^*_\Sigma; \\ R_\Sigma, R^*_\Sigma; R_\Sigma, C^*_\Sigma; \\ R^*_\Sigma, C^*_\Sigma. \end{array}\right\} \qquad (21)$$

Можно показать, что при выполнении условий задачи существуют функциональные зависимости переменных, являющихся первыми элементами каждой пары из перечисленных в записи (21), от вторых, т.е. зависимости

$$S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma), S_\Sigma = S_\Sigma(R_\Sigma), ..., R^*_\Sigma(C^*_\Sigma), \qquad (22)$$

которые будем называть прямыми зависимостями или прямыми функциями.

Несмотря на то, что все прямые зависимости, входящие, кроме последней, в перечень (22), пока не известны, можно уже теперь убедиться, что для некоторых из пар (21) не существует при определенных условиях обратных функций. Например, для $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$ не существует обратная функция $C_\Sigma = C_\Sigma(S_\Sigma)$, если области $C_\Sigma \ge 0$ «физического» определения основной зависимости принадлежит стационарная точка $C_\Sigma = C^{(C)}_\Sigma$, в которой эта функция обращается в минимум.

В результате предыдущих исследований было установлено, что при тамошних посылках зависимость $R^*_\Sigma = R^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$ представляет собой непрерывную строго монотонную функцию, приближающуюся к нулю при неограниченном возрастании C^*_Σ. Были получены аналитические представления для прямой $R^*_\Sigma = R^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$ и обратной $C^*_\Sigma = C^*_\Sigma(R^*_\Sigma)$ функций, связывающих величины C^*_Σ и R^*_Σ.

Потянув за эту ниточку, можно попытаться распутать весь запутанный клубок существующих и нет, нужных и нет, известных и нет, прямых и обратных функциональных зависимостей между элементами пар (21) рассматриваемой пятерки переменных.

Величина S_Σ как функция аргумента C_Σ^* имеет вид

$$S_\Sigma = S_\Sigma(C^*_\Sigma) = R^*_\Sigma(C^*_\Sigma) + C^*_\Sigma, \qquad (23)$$

показанный на рис. 2, на котором, кроме $S_\Sigma(C^*_\Sigma)$, изображены зависимости $R^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$, $C_\Sigma(C^*_\Sigma)$, $C^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$.

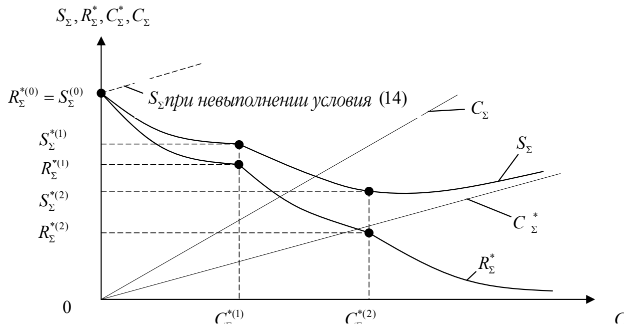

Рис. 2. Графики зависимостей величин $S_\Sigma, R^*_\Sigma, C^*_\Sigma, C_\Sigma$ от величины C_Σ^*

Из (23) и рис. 2 следует, что текущее значение $S_\Sigma(C^*_\Sigma)$ больше $R^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$ на C^*_Σ и что

$$C_\Sigma = C_\Sigma(C^*_\Sigma) = 2C^*_\Sigma; \qquad (24)$$

$$C^*_\Sigma = C^*_\Sigma(C_\Sigma) = \frac{1}{2}C_\Sigma. \qquad (25)$$

Так просто выглядят прямая $C_\Sigma(C^*_\Sigma)$ и обратная $C^*_\Sigma(C^*_\Sigma)$ функциональные зависимости между C^*_Σ и C^*_Σ.

Величины связывает равенство

$$R_\Sigma(C_\Sigma) = R^*_\Sigma(C^*_\Sigma), \qquad (26)$$

полученное при помощи доказательства от противного. Это равенство, в частности, означает, что ординаты опорных точек $(C^{(q)}_\Sigma, R^{(q)}_\Sigma)$ зависимости $R_\Sigma = R_\Sigma(C_\Sigma)$ такие же, как для зависимости $R_\Sigma^*(C_\Sigma^*)$, а их абсциссы вдвое больше аргументов функции $R_\Sigma^*(C_\Sigma^*)$

$$R_\Sigma^{(q)} = R_\Sigma^{*(q)}; C_\Sigma^{(q)} = 2C_\Sigma^{*(q)}; q = 0,1,...,k. \qquad (27)$$

Можно получить основную зависимость в явном виде, если воспользоваться понятием сложной функции, в которой операции выполняются справа налево.

Перед этим запишем очевидное равенство

$$S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma) = R_\Sigma(C_\Sigma) + C_\Sigma. \qquad (28)$$

Величина R_Σ как функция C_Σ по формуле сложной функции равна

$$R_\Sigma = R_\Sigma(C_\Sigma) = R_\Sigma(R_\Sigma^*(C_\Sigma)). \qquad (29)$$

Правая часть (29) – известная функция от величины C_Σ, так как аргумент $R_\Sigma^*(C_\Sigma)$ данной функции равен

$$R_\Sigma^*(C_\Sigma) = R_\Sigma^*(C_\Sigma^*(C_\Sigma)) = R_\Sigma^*(\frac{1}{2}C_\Sigma), \qquad (30)$$

что следует из (25). В результате этих нехитрых преобразований получаем

$$S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma) = R_\Sigma^*(\frac{1}{2}C_\Sigma) + C_\Sigma. \qquad (31)$$

Под аналитическим представлением основной зависимости $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$ понимается выраженное при помощи конечных формул правило, позволяющее для любого значения C_Σ из области $C_\Sigma \geq 0$ вычислять значение координаты S_Σ точки (C_Σ, S_Σ), принадлежащей этой зависимости. Правило в первую очередь по значению C_Σ устанавливает номер шага $q(q = 1,...,k)$, на котором находится точка (C_Σ, S_Σ). Отыскание шага снижения R_Σ заключается в определении номера q, для которого выполняется одно из соотношений

$$C_\Sigma^{(q-1)} \leq C_\Sigma < \tilde{N}_\Sigma^{(q)}, q = 1,...,k. \qquad (32)$$

Зная q, можно вычислить значение S_Σ, находящееся в пределах данного шага, по формуле

$$S_\Sigma = R_\Sigma^{(q-1)} - qR_q^{(0)} \times$$
$$\times\left[1 - e^{-b_{(q)}\alpha_{(q)}^{(q)}}(C_\Sigma - C_\Sigma^{(q-1)})\right] + C_\Sigma. \qquad (33)$$

Продолжим анализ основной зависимости.

Казалось бы, функция $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$, как сумма двух положительных слагаемых, одно из которых убывает, а другое возрастает, должна иметь минимум. Но это было бы всегда так, если бы область определения основной зависимости занимала всю числовую ось от минус до плюс бесконечности. Принятая же «физическая» область определения включает в себя значения $C_\Sigma \geq 0$. Когда значение C_Σ в стационарной точке $C_\Sigma = C_\Sigma^{(C)} \geq 0$, то минимум имеется. Признаком существования минимума у функции $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$ служит выполнение условия

$$\left.\frac{dR_\Sigma^*(C_\Sigma^*)}{dC_\Sigma^*}\right|_{C_\Sigma^* = 0} \leq 1. \qquad (34)$$

При выполнении (34) строгая монотонность функций $R_\Sigma^*(C_\Sigma^*)$,$C_\Sigma^*(C_\Sigma^*)$ гарантирует, что этот минимум будет единственным. Если среди значений $R_j^{(0)}$ имеется одно наибольшее, то условия (34), (14) равносильны.

Стационарная точка , если она существует, для которой, естественно,

$$\frac{dS_\Sigma(C_\Sigma^{(C)})}{dC_\Sigma} = 0, \qquad (35)$$

разделяет основную зависимость на две части: нисходящую – с областью определения $0 < C_\Sigma < C_\Sigma^{(C)}$ – и восходящую – с областью определения $C_\Sigma > C_\Sigma^{(C)}$. В зависимости от того, какой части принадлежит C_Σ, функция $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$ убывает, или возрастает.

При известных опорных точках $(C_\Sigma^{(q)}, S_\Sigma^{(q)})$ основной зависимости координаты $C_\Sigma^{(C)}, S_\Sigma^{(C)}$ стационарной точки вычисляются путем решения одного из двух уравнений (35), для чего используется формула (33) для шагов, подозреваемых в наличии на них минимума функции $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$. Подозреваемые шаги находятся при помощи сопоставления ординат соседних опорных точек.

Для зависимости $S_\Sigma = S_\Sigma(C_\Sigma)$ не существует обратной функции $C_\Sigma = C_\Sigma(S_\Sigma)$. Однако разделение этой основной зависимости на нисходящую и восходящую части со своими непересекающимися областями определения, охватывающими всю область $C_\Sigma \geq 0$, позволяет получить требующиеся обратные функции отдельно для каждой из обеих частей. Это напоминает интегрирова-ние по частям и может быть выполнено без особого труда с использованием полученных в результате анализа соотношений.

Формулировка остальных частных задач общей задачи исследований производится на основе методики, приведенной в работе [6], и настоящей статьи.

Заключение

Заманчивая идея использовать риск ущерба (произведение вероятности аварии системы и математического ожидания ущерба от этой аварии) как числовую характеристику некого не вполне определенного до последнего времени случайного явления при количественной оценке и управлении безопасностью технической системы давно, что называется, витает в воздухе [1, 2, 3]. Главным тормозом при реализации этой идеи является отсутствие надежных исходных данных для расчета, в том числе упомянутых вероятностей и матожиданий по каждому типу аварии системы. Среди других проблем современной концепции [7] приемлемых рисков ущерба от аварий эксплуатируемых систем имеются проблемы методического характера, также ждущие своего решения. Они связаны, в частности, с принципом равенства рисков ущерба.

Представленные методические материалы развивают и обобщают результаты инженерного, связанного с техникой применения принципа равенства рисков ущерба от различных типов аварии технической системы, учитывая и распределяя по типам аварии дополнительные затраты на безаварийность. Эти результаты исследований вводят новый, удобный для задач безопасности класс случайных явлений, каждое из которых – случайная реализация случайной величины [4]; формулируют принцип равенства рисков ущерба и определяют условия, диктуемые принятым принципом при снижении общего для системы риска ущерба [5]; находят сбалансированные значения показателей безопасности, когда дополнительными затратами на безаварийность системы можно пренебречь [6].

Настоящие методические материалы предназначены для количественной оценки и целенаправленного изменения показателей безопасности ракетного комплекса или другой интересующей технической системы, когда дополнительные затраты на безаварийность сопоставимы с общим риском ущерба от аварии. И приходится либо отыскивать минимум суммы этих двух величин, если он существует, или довольствоваться ее наименьшим значением.

Решение задачи в новой оптимизационной постановке повышает точность решения задачи и расширяет номенклатуру технических систем, для которых при наличии необходимых исходных данных возможно осуществлять эффективное снижение суммы общего риска ущерба и дополнительных затрат.

Литература

1. Волков Л.И. Безопасность ракетных и ракетно-космических комплексов. – М.: Изд-во СИП РИА, 2002. – 136с.

2. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 156 с.

3. Климов Г.П. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Изд-во Московского университета, 1983. – 328 с.

4. Цыплаков Ю.В., Шлеёв С.К., Горин В.С. Определение потенциального ущерба от аварии технической системы // Двойные технологии. – 2001. – № 1 – с. 17.

5. Цыплаков Ю.В., Бабенков Д.А., Принцип равенства рисков ущерба от различных типов аварии технической системы в задаче определения сбалансированных показателей безопасности // Двойные технологии. – 2004. – № 1 – с. 35.

6. Цыплаков Ю.В., Ульянов С.В., Арцивенко В.В., Методика определения сбалансированных по рискам ущерба от различных типов аварии показателей безопасности технической системы // Двойные технологии. – 2006. – № 2 – с. 28.

7. Цыплаков Ю.В., Ульянов С.В., Арцивенко В.В., Несмачный С.В., Проблемы приемлемых рисков ущерба от аварий технических систем // Двойные технологии. – 2008. – № 3 – с. 56.

Материал поступил в редакцию 26. 06. 2010 г.