

УДК 629.7

© Нестеров В.Е., Рудаков В.Б., Макаров М.И.
Nesterov V., Rudakov V., Makarov M.

АПОСТЕРИОРНЫЕ РИСКИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS GROUND DEVELOPMENT TEST PLANNING POSTERIOR RISKS

Аннотация. Рассматривается задача иерархического контроля технических параметров ракетно-космической техники (РКТ) на этапе наземной отработки. Разрабатываются математические зависимости для определения апостериорных рисков, которые отражают взаимосвязь рисков между уровнями иерархии обрабатываемых изделий РКТ. Эти зависимости впервые позволяют учесть результаты предшествующего контроля технических параметров изделий низших уровней, входящих в состав РКТ, при планировании контроля параметров изделий более высоких уровней, несмотря на различие совокупностей контролируемых технических параметров на каждом уровне.

Annotation. Paper considers the problem of rocket and space technology (RST) products engineering conditions hierarchical control during the ground development test. The functions for the posterior risks determination are being developed that reflects interdependency of risks with hierarchy levels of tested RST products. These functions for the first time give the possibility to account for the lower level products, components of RST, engineering conditions preceding control results while higher level products engineering conditions control planning, despite the difference between packages of engineering conditions controlled at each level.

Ключевые слова. Иерархия, контроль, оптимизация, параметры, планирование, потери, риски 1 и 2 рода, требования, целевая функция, экономические затраты.

Key words. Hierarchy, control, optimization, conditions, planning, losses, 1st and 2nd Class risks, requirements, object function, economic expenditures.

В работе [1] были получены результаты исследования свойств целевой функции потерь для оптимизации контроля технических параметров изделий РКТ, которые позволяют перейти к решению другой задачи – установлению аналитических взаимосвязей между рисками 1-го и 2-го рода, возникающих при контроле изделий РКТ в рамках иерархического контроля их параметров при наземной отработке. Определение этих взаимосвязей имеет большое значение, так как позволит учесть результаты контроля параметров изделий РКТ низших уровней при планировании контроля параметров изделий более высоких уровней. Это, в свою очередь, приведет к сокраще-

нию объемов испытаний сложных изделий РКТ, снижению экономических затрат на их проведение и потерь, связанных с принятием ошибочных решений по результатам наземной отработки. Для того, чтобы пояснить существо рассматриваемой задачи, напомним некоторые основные понятия, введенные в работе [1].

Как и ранее, условимся под *годным* понимать технический параметр изделия, находящийся в пределах заданного допуска, под *дефектным* – параметр, вышедший за пределы допуска.

Годным будем считать изделие, у которого годны (находятся в пределах допусков) все параметры и, соот-

Нестеров Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»;

Рудаков Валерий Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, «НИИ КС им. А.А. Максимова» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»;

Макаров Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора ФГУП «ГКНПЦ им. В. Хруничева» – директор «НИИ КС им. А.А. Максимова» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», тел. 8-495-755-58-93.

Nesterov Vladimir – Ph.D, First Deputy Director General, FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center;

Rudakov Valeriy – prof, full dr, principal research scientist, AA. Maksimov Space Systems Research Institute - Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center;

Makarov Mikhail – prof, full dr, Deputy Director General of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Director of A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, tel.(495) 755 58 93.

ответственно, *дефектным (отказавшим)* – изделие, у которого дефектен хотя бы один параметр.

Рассмотрим наиболее общий случай. Предположим, что изделие РКТ ($l+1$)-го уровня состоит из k независимых изделий l -го уровня. Показатель качества изделия ($l+1$)-го уровня полностью определяется совокупностью N_{Π} независимых между собой параметров (физических или определяющих) $\{x_{ij}\}$, $j=1, \dots, N_{\Pi}$, а показатель качества r -го изделия l -го уровня – совокупностью $\{x_{ir}\}$ параметров, $i=1, \dots, N_{\Pi}$; $r = \overline{1, k}$.

При принятых определениях и допущениях общая схема контроля технических параметров двухуровневой иерархической структуры (изделий РКТ l -го уровня и изделия РКТ ($l+1$)-го уровня) заключается в следующем.

В каждом r -м изделии l -го уровня проводится контроль некоторой неизвестной выборки $x_{ir} \leq N_{\Pi}$ наиболее важных параметров из общей совокупности N_{Π} параметров, определенных документацией на изготовление (как было показано в работе [1], случай $x_{ir} = N_{\Pi}$ является частным случаем). После проведения контроля соответствующих параметров k независимых изделий l -го уровня эти изделия принимаются и из них изготавливается изделие ($l+1$)-го уровня.

Далее проводится контроль технических параметров изделия ($l+1$)-го уровня, т.е. в изделии проводится контроль некоторой выборки $x_{\Pi} \leq N_{\Pi}$ наиболее важных параметров этого изделия из общей совокупности параметров N_{Π} .

Все изложенное определяет специфику иерархического контроля параметров изделий РКТ и по аналогии с работой [1] дает возможность сформулировать ряд исходных положений:

1. Совокупность всех параметров конкретных изделий рассматриваемых уровней и допуски на них определены и закреплены в соответствующей документации.

2. Поскольку контроль не является абсолютно достоверным, при контроле каждого параметра возникают ошибки 1-го и 2-го рода, в результате которых годный параметр можно принять за дефектный, а дефектный – за годный. Эти ошибки характеризуются метрологическими рисками 1-го рода α_{ij} и 2-го рода β_{ij} , относящимися к каждому i -му или j -му параметру для изделий РКТ соответствующих уровней, например, $\alpha_{ij} = P(A_j)P(\overline{B}_i/A_j) = P(A_j)\alpha_{ij}$; $\beta_{ij} = P(\overline{A}_i)P(B_j/\overline{A}_i) = P(\overline{A}_i)\beta_{ij}$, где $P(A_j) = 1 - P(\overline{A}_j)$ – вероятность того, что j -й параметр годный (событие A_j);

$\alpha_{ij} = P(\overline{B}_i/A_j)$ – условная вероятность того, что по результатам контроля j -й параметр признан дефектным (событие \overline{B}_i), хотя на самом деле он является годным

(событие A_j);

$\beta_{ij} = P(B_j/\overline{A}_i)$ – условная вероятность того, что по результатам контроля j -й параметр признан годным (событие B_j), хотя на самом деле он является дефектным (событие \overline{A}_i).

3. При контроле выборки x_{Π} наиболее важных параметров каждого изделия рассматриваемых уровней из общей совокупности параметров N_{Π} возникают ошибки 1-го и 2-го рода, которые уже относятся к изделию в целом (l -го и ($l+1$)-го уровня) и характеризуются рисками 1-го и 2-го рода. Эти риски, очевидно, зависят от общего количества параметров изделия N_{Π} , объема контролируемой выборки наиболее важных параметров x_{Π} и от рисков 1-го и 2-го рода (например, α_{Π} , β_{Π}), возникающих при контроле каждого параметра. То есть для каждого изделия РКТ l -го и ($l+1$)-го уровня по аналогии с работой [1] можно записать следующие функционалы:

для r -го изделия РКТ l -го уровня

$$\alpha_{ir} = \alpha_{ir}(N_{\Pi}, x_{ir}, \alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi});$$

$$\beta_{ir} = \beta_{ir}(N_{\Pi}, x_{ir}, \alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}), \quad r = \overline{1, k}; \quad i = \overline{1, N_{\Pi}}; \quad (2)$$

для изделия РКТ ($l+1$)-го уровня

$$\alpha_{\Pi} = \alpha_{\Pi}(N_{\Pi}, x_{\Pi}, \alpha_{ir}, \beta_{ir}, \alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi});$$

$$\beta_{\Pi} = \beta_{\Pi}(N_{\Pi}, x_{\Pi}, \alpha_{ir}, \beta_{ir}, \alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}); \quad j = \overline{1, N_{\Pi}}. \quad (3)$$

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия рисков 1-го и 2-го рода: риски при контроле каждого параметра изделий РКТ l -го и ($l+1$)-го уровней и риски при контроле изделий в целом l -го и ($l+1$)-го уровней.

Поскольку контроль изделий РКТ низшего l -го уровня иерархии предшествует контролю изделия более высокого ($l+1$)-го уровня, то результаты контроля изделий этого уровня несут информацию не только о состоянии технических параметров данного l -го уровня, но и определенную долю информации о состоянии изделия РКТ более высокого ($l+1$)-го уровня. Поэтому результаты контроля изделий низшего уровня необходимо учитывать при планировании контроля изделий более высокого уровня. Таким образом, риски, возникающие при контроле различных уровней должны быть взаимосвязаны. Чтобы определить эти взаимосвязи, проведем следующие рассуждения.

Предположим, что осуществлен контроль всех изделий РКТ l -го уровня иерархии. При этом какие-то изделия возвращались поставщикам на доработку, повторный контроль, замену дефектных изделий и т.д. Но в конечном итоге для изготовления изделия РКТ более высокого ($l+1$)-го уровня имеется k принятых ($r = \overline{1, k}$) изделий l -го уровня, из которых комплектуется изделие более

высокого $(l+1)$ -го уровня.

Поскольку для изделий l -го уровня проводился контроль их технических параметров и изделия приняты, то они будут приняты с определенными рисками. При этом риски 1-го рода α_r , $r = \overline{1, k}$, будут равны нулю $\alpha_r = 0$, [1], а риски 2-го рода β_r , $r = \overline{1, k}$, совпадают с вероятностями того, что принятые изделия являются дефектными $\beta_r = P(\overline{A}_r)$, $r = \overline{1, k}$. То есть, наличие $\beta_r = P(\overline{A}_r)$ для всех изделий РКТ l -го уровня свидетельствует о том, что контроль не является абсолютно достоверным.

Учитывая этот результат, риски 1-го и 2-го рода α и β для планирования контроля изделия $(l+1)$ -го уровня оказываются связанными с рисками β_r , с которыми приняты изделия РКТ l -го уровня. Поэтому при планировании контроля совокупности технических параметров изделий высшего уровня, т.е. $(l+1)$ -го уровня, имеем следующие функционалы:

для изделия $(l+1)$ -го уровня

$$\alpha_n = \alpha_n(N_n, x_n, \beta_r, \alpha_{np}, \beta_{np}); \quad (5)$$

$$\beta_n = \beta_n(N_n, x_n, \beta_r, \alpha_{np}, \beta_{np}), \quad (6)$$

то есть риски α_n и β_n , возникающие при контроле параметров изделия $(l+1)$ -го уровня, уже являются функциями только рисков β_r , с которыми приняты изделия РКТ l -го уровня.

В выражениях (5), (6) по-прежнему: N_n и x_n – общая совокупность технических параметров изделия РКТ $(l+1)$ -го уровня и их выборка; β_r – риски 2-го рода, с которыми приняты r -е изделия РКТ l -го уровня, $r = \overline{1, k}$; α_{np} , β_{np} – метрологические риски 1-го и 2-го рода, возникающие при контроле совокупности технических параметров изделия РКТ $(l+1)$ -го уровня $\{x_n\}$.

Проведенный анализ позволяет непосредственно перейти к разработке математических зависимостей для определения апостериорных рисков, связанных с принятием ошибочных решений по результатам иерархического контроля изделий РКТ. Получим эти зависимости в условиях рассматриваемой задачи.

Конкретизируем задачу. Пусть по-прежнему проводится выборочный контроль параметров каждого изделия l -го уровня, т.е. в каждом изделии контролируется $x_{nr} \leq N_{nr}$ параметров $r = \overline{1, k}$. При этом, как отмечалось, некоторые изделия возвращаются поставщику на доработку, повторный контроль и т.д. Но в конечном итоге для изготовления изделия $(l+1)$ -го уровня имеются k принятых изделий нижнего уровня, из которых комплектуется изделие высшего уровня.

Поскольку для изделий проводился контроль параметров и изделия приняты (риски $\alpha_r = 0$, $r = \overline{1, k}$), то они будут приняты с определенными рисками 2-го рода

β_r , $r = \overline{1, k}$. Возникает вопрос: каким образом риски α и β для изделия РКТ $(l+1)$ -го уровня связаны с рисками β_r , с которыми приняты изделия РКТ l -го уровня? Для решения этого вопроса введем обозначения для следующих случайных событий: A – изделие $(l+1)$ -го уровня является годным; \overline{A} – противоположное событие; B – изделие $(l+1)$ -го уровня по результатам контроля будет принято; \overline{B} – противоположное событие; A_r – r -е изделие l -го уровня является годным; \overline{A}_r – противоположное событие; B_r – r -е изделие l -го уровня по результатам контроля принято; \overline{B}_r – противоположное событие.

Среди введенных событий по условию задачи событие B_r является достоверным и вероятность этого события $P(B_r) = 1$, а событие \overline{B}_r является невозможным событием, поэтому $P(\overline{B}_r) = 0$.

Обратимся вновь к изделию $(l+1)$ -го уровня, которое состоит из k независимых изделий l -го уровня. Учитывая определения годных и дефектных изделий, справедливо следующее утверждение: изделие $(l+1)$ -го уровня является годным, если годны все k изделий l -го уровня. И наоборот, изделие $(l+1)$ -го уровня является дефектным, если дефектно хотя бы одно изделие l -го уровня. По этой причине для события A имеем [2]:

$$A = \bigcap_{r=1}^k A_r \quad (7)$$

Определим риск 1-го рода для изделия $(l+1)$ -го уровня. По определению

$$\alpha = P(\overline{A}B) = P(A)P(\overline{B}/A).$$

Запишем соответственно риски 1-го и 2-го рода для r -го изделия l -го уровня:

$$\alpha_r = P(A_r)P(\overline{B}_r/A_r); \quad \beta_r = P(\overline{A}_r)P(B_r/\overline{A}_r)$$

Но так как r -е изделие l -го уровня принято, то $P(B_r/\overline{A}_r) = 0$ и $P(B_r/A_r) = 1$, то есть $\alpha_r = 0$ и $\beta_r = P(\overline{A}_r)$.

Далее, поскольку изделия l -го уровня независимы, в соответствии с (7)

$$P(A) = \prod_{r=1}^k P(A_r) = \prod_{r=1}^k [1 - P(\overline{A}_r)] = \prod_{r=1}^k P(1 - \beta_r).$$

Подставляя это выражение в выражение для риска 1-го рода α , относящемуся к изделию РКТ $(l+1)$ -го уровня получаем

$$\alpha = P(\overline{B}/A) \prod_{r=1}^k (1 - \beta_r). \quad (8)$$

Для риска 2-го рода справедливы аналогичные рассуждения

$$\begin{aligned} \beta &= P(\overline{A}B) = P(\overline{A})P(B/\overline{A}) = [1 - P(A)]P(B/\overline{A}) \\ \text{или } \beta &= P(B/\overline{A})[1 - \prod_{r=1}^k (1 - \beta_r)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку изделия РКТ l -го уровня по условию задачи уже приняты, что свидетельствует о реализации

определенных значений β_r , то, учитывая (8) и (9), можно сделать важный вывод: в случае, если изделие РКТ ($l+1$)-го уровня состоит из k независимых изделий l -го уровня, проведение предшествующего контроля технических параметров этих изделий уменьшает риски 1-го и 2-го рода для изделия ($l+1$)-го уровня. Причем можно показать, что этот вывод справедлив также в тех случаях, когда не все изделия низшего уровня, из которых состоит изделие более высокого уровня, проходят контроль параметров, предшествующий контролю *технических параметров* изделия более высокого уровня при наземной отработке.

Чтобы конкретизировать выражения (8) и (9) для определения рисков, связанных с принятием ошибочных решений по результатам иерархического контроля изделий РКТ, рассмотрим последовательно, как изменятся эти выражения в *апостериорном* случае, то есть тогда, когда контроль технических параметров r -го изделия уже проведен и все k изделий l -го уровня приняты по результатам контроля. При этом будем считать, что контроль проведен по оптимальным планам в смысле постановки задачи оптимизации параметрического контроля изделий РКТ [1].

Поскольку контроль уже проведен и изделия на l -м уровне приняты, то

$$P(\bar{B}_r/A_r)=0, P(\bar{B}/\bar{A}_r)=0, \text{ а } P(B_r/\bar{A}_r)=1 \text{ и } P(B_r/A_r)=1.$$

С учетом этого получаем для r -го изделия риск $\alpha_{nr}=0$ по определению, а оптимальный риск 2-го рода (численное значение) с учетом [1] будет

$$\beta_{nr}^* = \prod_{j=1}^{x_{lr}} [P(A_j)(1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{n_j}] - \prod_{j=1}^{N_{lr}} P(A_j) \prod_{j=1}^{x_{lr}^*} (1 - \alpha_{y_j}), \quad r = \overline{1, k}, \quad (10)$$

Литература

1. Нестеров ВЕ., Рудаков ВБ., Макаров МИ. Алгоритм иерархического контроля изделий ракетно-космической техники при наземной отработке // Двойные технологии. – 2013. – № 2. – С. 63–67.
2. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – М.: Мир, 1984. – Т. 1, 2.

Материал поступил в редакцию 19. 04. 2013 г.

где x_{lr}^* – оптимальное количество и номенклатура параметров r -го изделия l -го уровня, подлежащих обязательному контролю.

Учитывая формулы (8) и (9), также [1] выражения для оптимального планирования параметрического контроля (априорного) изделия РКТ ($l+1$)-го уровня с учетом предшествующего контроля входящих в него изделий l -го уровня имеют следующий вид:

$$\alpha_n = \prod_{j=1}^{N_{ll}} P(A_j) \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{ll}} (1 - \alpha_{y_j}) \right] \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{lr}^*); \quad (11)$$

$$\beta_n = \left\{ \prod_{j=1}^{N_{ll}} [P(A_j)(1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{n_j}] - \prod_{j=1}^{N_{ll}} P(A_j) \prod_{j=1}^{x_{ll}} (1 - \alpha_{y_j}) \right\} \left[1 - \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{lr}^*) \right], \quad (12)$$

где величина β_{lr}^* определяется по формуле (10) в случае предшествующего контроля изделий РКТ l -го уровня по оптимальным планам.

Таким образом, на основе использования аппарата булевой алгебры разработаны математические зависимости для определения апостериорных рисков, связанных с принятием ошибочных решений по результатам иерархического контроля технических параметров сложных изделий РКТ при наземной отработке. Эти зависимости отражают взаимосвязь рисков между уровнями, что впервые позволяет учесть результаты предшествующего контроля технических параметров изделий РКТ низших уровней, при планировании контроля параметров изделий более высокого уровня, несмотря на различие совокупностей контролируемых технических параметров на каждом уровне.