

УДК 629.7

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

АЛГОРИТМ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО–КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ

ALGORITHM OF HIERARCHICAL CHECKING OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS IN THE GROUND TESTS

Аннотация. Рассматривается параметрический контроль сложных изделий ракетно-космической техники (РКТ) на этапе наземной отработки. Излагаются основные результаты проведенных исследований и алгоритм определения иерархических планов контроля конкретного изделия и совокупности разных изделий, оптимальных с точки зрения минимума целевой функции затрат на контроль и потери, связанных с рисками принятия ошибочных решений. Оптимальный план контроля совокупности разных изделий РКТ содержит номенклатуру изделий (выборку из совокупности), подлежащих обязательному проведению испытаний при наземной отработке.

Annotation. Paper considers the parametric checking of complex rocket and space technology products at the stage of ground tests. Major research findings are shown, as well as the hierarchical checking plans appointment algorithm for specific product and various products population, optimal from the point of view of checking expenses object function minimum and making a wrong decisions risks related losses. Various rocket and space technology products population checking optimal plan comprises the lineup of products (sample) subject to indispensable checking in the ground tests.

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

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

Перспективы развития РКТ показывают, что методическое обеспечение всех этапов их создания и эксплуатации нуждается в постоянном совершенствовании. Особенно это касается такого важного этапа как экспериментальная отработка, который традиционно требует больших экономических затрат для проведения широкого многообразия различных видов испытаний изделий РКТ (автономных, комплексных и др.). Отказ от проведения каких-либо видов испытаний с целью экономии денежных средств вызывает опасения, связанные с возможным нарушением работоспособности этих изделий, возникновением их отказов в космическом пространстве, аварий в полете и т.д. В современных условиях финан-

совых ограничений совершенствование методического обеспечения должно заключаться в том, что при проведении испытаний и контроля изделий РКТ, с одной стороны, необходимо подтвердить заданные в технических заданиях (ТЗ) характеристики, а с другой стороны, постоянно учитывать финансовые средства, которые можно израсходовать на их подтверждение.

Известно, что отработку изделий РКТ проводят строго поэтапно и последовательно, испытывая изделия по мере возрастания иерархических уровней. После успешных автономных испытаний и контроля низших иерархических уровней переходят к автономным испытаниям и контролю подсистем, систем, а после них проводят

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», тел. (495)780-07-81;

Макаров Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор, заместитель Генерального директора ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева-директор «НИИ КС им. А.А. Максимова» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева».

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

Rudakov Valeriy – Prof., Full Dr., Principal Research Scientist, A.A. Maksimov Space Systems Research Institute - Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Phone: +7 (495) 780 0781;

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.

комплексные испытания и контроль изделий самого высшего иерархического уровня. При этом на каждом уровне контролируется работоспособность, проводится оценка и контроль технических параметров и принимаются меры по доведению их значений до уровня требований ТЗ.

При отработке РКТ реализуются принципы выборочного контроля изделий и их технических параметров. Поэтому совершенствование методического обеспечения этих этапов должно идти и в направлении дальнейшего развития моделей и алгоритмов планирования и проведения выборочного контроля изделий и их технических параметров. Тем более, что традиционные методы выборочного контроля не позволяют учесть иерархию сложных изделий РКТ, последствия принятия ошибочных решений при отработке, накопленный опыт отработки изделий-аналогов. Они ориентированы на значительные объемы статистических данных, рассматривают партии и выборки только *одинаковых* изделий, в то время как при отработке реально присутствуют совокупности *разных* изделий РКТ.

Рассмотрим этот наиболее общий случай, когда на контроль поступают *совокупности* разных изделий. Как правило, такие совокупности состоят из разных изделий одного уровня иерархии, в частности, совокупности разных приборов, подсистем, систем, агрегатов и др. Если совокупность состоит из изделий разных уровней иерархии, то в ней можно выделить совокупность изделий, относящихся к одному уровню иерархии. При этом если проводить все виды испытаний каждого изделия совокупности и контролировать все их технические параметры, то это может потребовать больших экономических затрат. Поэтому для изделий РКТ возникают следующие важные и актуальные вопросы: во-первых, проводить или не проводить рекомендованные виды испытаний, которые в ряде случаев требуют значительных экономических затрат, а во-вторых, сколько изделий и какие изделия РКТ (номенклатура) должны проходить соответствующие испытания, в процессе которых контролируются их технические параметры. Полученные в работе [1] результаты являются основой, развивая которую можно решить поставленные задачи.

В работе [1] был проведен анализ и установлено, что специфика контроля параметров изделий РКТ заключается в следующем:

1. Совокупность N_{Π} всех независимых параметров конкретного изделия и допуски на них определены разработчиком и закреплены в документации.

При этом *годным* считается параметр, находящийся в пределах заданного допуска; *дефектным* – па-

раметр, вышедший за пределы допуска; годным считается изделие, у которого годны (находятся в пределах заданных допусков) все параметры, и соответственно дефектным – изделие, у которого дефектен хотя бы один параметр.

2. 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 определенными вероятностями или рисками 1-го рода $\alpha_{\Pi j}$ и 2-го рода $\beta_{\Pi j}$, относящимися к каждому j -му параметру (метрологические риски).

3. При контроле выборки n_{Π} параметров каждого изделия из общей совокупности N_{Π} возникают ошибки 1-го и 2-го рода, которые уже относятся к изделию в целом. Эти ошибки зависят от общего количества параметров изделия N_{Π} , объема контролируемой выборки n_{Π} и от ошибок 1-го и 2-го рода (рисков $\alpha_{\Pi j}, \beta_{\Pi j}$), возникающих при контроле каждого параметра.

4. При контроле выборки n изделий от партии N также возникают ошибки 1-го и 2-го рода (риски α и β), которые связаны со всеми предыдущими, а также с тем, что проводится контроль не всей партии, а только выборки. При этом партия считается *годной*, если годны все изделия партии, и *дефектной*, если дефектно хотя бы одно изделие партии.

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия ошибок 1-го и 2-го рода или рисков: риски при контроле каждого параметра изделия, риски при контроле изделия в целом и риски при контроле выборки изделий от партии.

Далее решается задача: на основе минимизации целевой функции потерь и затрат на контроль найти одновременно следующие оптимальные характеристики: оптимальный план контроля партии изделий $(n^*, \alpha^*, \beta^*, c=0)$; оптимальный план контроля каждого изделия выборки $(n_{\Pi}^*, \alpha_{\Pi}^*, \beta_{\Pi}^*, c=0)$. Эта совокупность представляет собой оптимальную систему взаимосвязанных планов контроля изделия и партии одинаковых изделий РКТ. При этом объем контролируемой выборки изделий от партии рассматривается как глубина контроля партии; количество контролируемых параметров конкретного изделия как глубина контроля изделия; риски 1-го и 2-го рода α, β и $\alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}$ как характеристики достоверности контроля партии и изделия. Формализованная постановка этой задачи имеет вид

найти

$$\min_{n, \alpha, \beta, n_{\Pi}, \alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}} c_{\Sigma} = \min_{n, \alpha, \beta, n_{\Pi}, \alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}} \left[c_{1a} N \alpha + c_{1\beta} N \beta + n \sum_{j=1}^{n_{\Pi}} c_{ij} \right]; \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha\{ (N, n; \alpha_n(N, n, \alpha_{np}, \beta_{nj}); \beta_n(N, n, \alpha_{np}, \beta_{nj}) \}; \quad (2)$$

$$\beta = \beta\{ (N, n; \alpha_n(N, n, \alpha_{np}, \beta_{nj}); \beta_n(N, n, \alpha_{np}, \beta_{nj}) \}; \quad (3)$$

$$\beta > 0; \quad \alpha \geq 0; \quad \beta_u > 0; \quad \alpha_u \geq 0; \quad \alpha_{np} \geq 0; \quad (4)$$

$$\beta_{nj} > 0; \quad 0 < n \leq N; \quad 0 < n_{п} \leq N_{п}; \quad j = \overline{1, N_{п}},$$

где $C_{1\alpha}, C_{1\beta}$ – средние потери (математические ожидания) от ошибочной браковки годных и приемки дефектных изделий РКТ, соответственно, приходящиеся на одно изделие;

C_{ij} – средние затраты (математическое ожидание) на контроль j -го параметра изделия.

Для решения этой задачи на основе использования аппарата алгебры событий в работах [1,2] были получены соотношения для определения рисков 1-го и 2-го рода в виде:

- для конкретного изделия

$$\alpha_n = \prod_{j=1}^{N_{п}} \frac{\alpha_{nj}}{\alpha_{y_j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{n_{п}} (1 - \alpha_{y_j}) \right]; \quad (5)$$

$$\beta_n = \prod_{j=1}^{n_{п}} \left[\frac{\alpha_{nj}}{\alpha_{y_j}} (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{nj} \right] - \prod_{j=1}^{N_{п}} \frac{\alpha_{nj}}{\alpha_{y_j}} \prod_{j=1}^{n_{п}} (1 - \alpha_{y_j}), \quad (6)$$

где $\alpha_{nj} = P(A_j) \alpha_{y_j} \quad (7)$
 $\beta_{nj} = P(A_j) \beta_{y_j} \quad (8)$

$P(A_j) = 1 - P(\bar{A}_j)$ – вероятность того, что j -й параметр годный (находится в пределах допуска);

α_{y_j} и β_{y_j} – условные (метрологические) риски;
 $0 < n_{п} \leq N_{п}$;

- для партии одинаковых изделий

$$\alpha = \left\{ \prod_{j=1}^{N_{п}} \frac{\alpha_{nj}}{\alpha_{y_j}} \right\}^N \left\{ 1 - \left[\prod_{j=1}^{n_{п}} (1 - \alpha_{y_j}) \right]^n \right\}; \quad (9)$$

$$\beta = \left[\prod_{j=1}^{n_{п}} \frac{\alpha_{nj}}{\alpha_{y_j}} (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{nj} \right]^n - \left\{ \prod_{j=1}^{N_{п}} \frac{\alpha_{nj}}{\alpha_{y_j}} \right\}^N \left[\prod_{j=1}^{n_{п}} (1 - \alpha_{y_j}) \right]^n. \quad (10)$$

Показано, что характеристики достоверности $\alpha_{np}, \beta_{np}, \alpha$ и β при увеличении объема $n_{п}$ контролируемых параметров изделия и объема контролируемой выборки n изделий от партии монотонно изменяются в противоположных направлениях: риски 1-го рода возрастают, а риски 2-го рода убывают. Это свидетельствует о том, что целевая функция имеет минимум, которому соответствуют оптимальные характеристики планов контроля изделия ($n_{п}^*, \alpha_{п}^*, \beta_{п}^*, c=0$) и партии одинаковых изделий ($n^*, \alpha^*, \beta^*, c=0$). При этом равенство нулю приемочных чисел пла-

нов контроля ($c=0$) связано, с одной стороны, с высокими требованиями, предъявляемыми к изделиям РКТ в соответствующих ТЗ, а с другой стороны, с уникальностью (или мелкосерийностью) производства этих изделий (или их составляющих). В случае рассмотрения одного изделия РКТ, т.е., когда $n=N=1$, целевая функция (1) совпадает с целевой функцией, относящейся к одному изделию.

В результате проведенных исследований были выявлены характерные свойства целевой функции (1), которые позволили решить задачу оптимизации поэтапно. На первом этапе определяются характеристики глубины и достоверности контроля конкретного изделия $n_{п}^*, \alpha_{п}^*, \beta_{п}^*$, т.е. при $n=N=1$. На втором этапе при конкретных фиксированных $n_{п}^*, \alpha_{п}^*, \beta_{п}^*$ определяются характеристики глубины и достоверности контроля партии изделий n^*, α^*, β^* по целевой функции (1). На этих свойствах был построен алгоритм поэтапной минимизации целевой функции (решения задачи в постановке (1)–(4).

Изложенные результаты свидетельствуют о том, что в работах [1, 2] рассматривалась партия *одинаковых* изделий. В то же время поставленная выше задача определения номенклатуры изделий, подлежащих обязательному проведению испытаний, требует рассмотрения совокупности *разных* изделий, что реально имеет место в практике наземной отработки РКТ. Для использования приведенных результатов при решении поставленной задачи проведем следующие рассуждения. Выделим изделия, относящиеся к одному иерархическому уровню (например, уровень комплектующих элементов, уровень подсистем, систем и т.д.). Предположим, что данный уровень содержит совокупность M *разных* изделий. Из этой совокупности отбирается некоторая неизвестная номенклатура $x \leq M$ изделий для проведения соответствующих испытаний, при которых контролируются требования к их техническим параметрам. В результате контроля совокупность либо принимается, либо бракуется. При такой схеме выборочного контроля по аналогии с работами [1, 2], введем следующие обозначения:

α_c – риск 1-го рода, относящийся ко всей совокупности изделий;

β_c – риск 2-го рода, относящийся ко всей совокупности изделий.

Тогда по определению рисков 1-го и 2-го рода [1] можно записать

$$\alpha_c = P(A_c) P(\bar{B}/A_c); \quad (11)$$

$$\beta_c = P(\bar{A}_c) P(B/\bar{A}_c), \quad (12)$$

где $P(A_c)$ – вероятность того, что рассматриваемая совокупность изделий годная;

$P(\bar{A}_c)$ – вероятность того, что рассматриваемая сово-

купность изделий дефектная;

$P(\bar{B}/A_c)$ – вероятность забраковать совокупность изделий при условии, что она годная;

$P(B/\bar{A}_c)$ – вероятность принять совокупность изделий при условии, что она дефектная (понятия «годная» и «дефектная» аналогичны введенным выше для партии изделий).

Для раскрытия соотношений (11) и (12) через характеристики изделий вновь обратимся к результатам работ [1, 2] и, используя их, проведем некоторые важные аналогии. В работах [1, 2] необходимыми условиями при решении задачи оптимизации параметрического контроля конкретного изделия являлись следующие: изделие содержит N_p различных параметров, и эти параметры являются независимыми. Для рассматриваемой совокупности M изделий соблюдаются аналогичные условия: совокупность содержит M разных изделий, и изделия в совокупности являются независимыми. В результате получается, что роль изделия при рассмотрении совокупности играет сама совокупность, а роль независимых параметров в изделии играют сами изделия совокупности. Эти аналогии позволяют использовать для определения рисков α_c и β_c (11) и (12), относящихся к выборочному контролю совокупности M разных изделий, аналитические соотношения (5) и (6), полученные в работах [1, 2], заменив в них характеристики параметров на характеристики изделий, входящих в совокупность, т.е.

$$\alpha_c = \prod_{d=1}^M P(A_d) \left[1 - \prod_{d=1}^x (1 - \alpha_{yd}) \right]; \quad (13)$$

$$\beta_c = \prod_{d=1}^x [P(A_d) (1 - \alpha_{yd}) + \beta_d] - \prod_{d=1}^M P(A_d) \prod_{d=1}^x (1 - \alpha_{yd}), \quad (14)$$

где $P(A_d)$ – вероятность того, что d -е изделие совокупности является годным, $d = \overline{1, M}$;

α_{yd} – условный риск 1-го рода, возникающий при контроле d -го изделия совокупности;

β_d – риск 2-го рода, возникающий при контроле d -го изделия совокупности;

x – неизвестная номенклатура изделий совокупности, подлежащих обязательному контролю.

Далее, используя выражения (13) и (14) по аналогии с материалами работ [1, 2], можно построить целевую функцию для оптимального выбора номенклатуры изделий, подлежащих обязательному контролю из всей совокупности изделий. Целевая функция, которая проистекает из самой статистической структуры контроля, будет иметь следующий вид:

$$C_c = C_{1c} \alpha_c + C_{2c} \beta_c + \sum_{d=1}^x C_{1d}, \quad (15)$$

где C_{1c} и C_{2c} представляют собой средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности изделий РКТ;

C_{1d} – средние затраты, приходящиеся на контроль d -го изделия совокупности. Эти величины определяются на основе выражений, приведенных в работе [2].

Таким образом, выражение (15) совместно с (13) и (14), представляет собой математическую модель для оптимального выбора номенклатуры изделий из совокупности разных изделий, подлежащих обязательному проведению испытаний при наземной отработке. Теперь задачу можно сформулировать так: найти такую номенклатуру изделий x и соответствующие значения рисков α_c и β_c , которые доставляют минимум целевой функции (15). В формализованном виде постановку задачи можно записать следующим образом:

найти

$$\min_{x, \alpha_c, \beta_c} C_c = \min_{x, \alpha_c, \beta_c} [C_{1c} \alpha_c + C_{2c} \beta_c + \sum_{d=1}^x C_{1d}] \quad (16)$$

в области, определяемой следующими неравенствами:

$$\beta_c > 0, \alpha_c \geq 0; \quad (17)$$

$$0 < x \leq M, \quad d = \overline{1, M}, \quad (18)$$

где α_c и β_c определяются выражениями (13) и (14).

Отметим, что случай $\alpha_c = 0$ соответствует приёму совокупности изделий без проведения соответствующих испытаний. При этом риск 2-го рода β_c совпадает с вероятностью того, что рассматриваемая совокупность изделий является дефектной. В этом случае целевая функция (16) принимает вид

$$C_c^0 = C_{2c} [1 - \prod_{d=1}^M P(A_d)]. \quad (19)$$

Полученные в результате решения задачи (16)–(18) значения x^* , α_c^* и β_c^* и будут являться оптимальными характеристиками плана контроля совокупности разных изделий РКТ при наземной отработке.

Если сравнить целевую функцию (1) для оптимизации параметрического контроля изделия при $N=n=1$ с целевой функцией (15), то можно увидеть, что эти функции имеют одинаковый вид. Разница заключается лишь в том, что в (15) присутствуют характеристики контроля изделий рассматриваемой совокупности и совокупности в целом, а целевая функция (1) при $N=n=1$ содержит характеристики контроля каждого технического параметра конкретного изделия и изделия в целом. Одинаковый вид целевых функций позволяет сделать важный вывод о том, что все свойства целевой функции (1), которые были выявлены при ее исследовании в работах [1, 2], од-

нозначно распространяются и на целевую функцию (15), которая содержит одно неизвестное x . Это, в свою очередь, позволяет на основе использования выявленных свойств и разработанного в работе [1, 2] алгоритма оптимизации контроля технических параметров изделий разработать алгоритм оптимального выбора номенклатуры изделий РКТ, подлежащих обязательному проведению соответствующих испытаний. Содержание этого алгоритма заключается в следующем.

1. Исходными данными для решения задачи являются: M – размер совокупности изделий одного иерархического уровня; α_d^* , β_d^* – оптимальные риски 1-го и 2-го рода и $P(A_d)$ – вероятность того, что d -е изделие совокупности является годным, полученные на основе использования алгоритма оптимизации контроля технических параметров изделий, разработанного в работах [1, 2].

2. По данным значениям уточняется вид целевой функции (15).

Для этой целевой функции используется выявленное свойство [1, 2], на основании которого можно заключить: чтобы функция (15) имела минимум внутри интервала $0 < x < M$, должны среди всех M независимых изделий совокупности существовать такие x изделий, для которых бы выполнялись неравенства

$$C_c^0 > C_c^d \text{ для всех } d = \overline{1, M}, \quad (20)$$

где C_c^0 – значение целевой функции при $x \rightarrow 0$, т.е., когда ни одно изделие из совокупности M не контролируется;

d – номер контролируемого изделия из совокупности;

C_c^d – значение целевой функции при контроле d -го

изделия.

Физический смысл неравенств (20) заключается в следующем. Из всей совокупности изделий M в число изделий, подлежащих обязательному контролю (проведению соответствующих испытаний), включаются только те изделия, испытания которых приводят к уменьшению значений целевой функции потерь, по сравнению с ее начальным значением, когда ни одно изделие из M не испытывается.

3. Вычисляется значение целевой функции C_c^0 в точке $x \rightarrow 0$, т.е., когда ни одно изделие из совокупности изделий не контролируется, по формуле (19).

4. Определяются значения целевой функции C_c^d для каждого d -го изделия отдельно. Эти значения C_c^d вычисляются для всей совокупности изделий.

5. Среди всех M разных изделий совокупности в число x , подлежащих обязательному проведению соответствующих испытаний, включаются только те изделия, для которых выполняются неравенства (20).

Полученное значение $x = x^*$ будет оптимальным, ему соответствуют оптимальные значения рисков α_c^* и β_c^* , которые вычисляются на основе формул (13) и (14).

Изложенный алгоритм и разработанная в математической среде Math CAD программа [3] позволяют определить взаимосвязанные планы параметрического контроля конкретного изделия РКТ и совокупности разных изделий, относящихся к одному иерархическому уровню, оптимальные с точки зрения минимума целевой функции затрат на контроль и потерь, связанных с рисками принятия ошибочных решений.

Литература

1. Меньшиков ВА, Рудаков ВБ, Сычев ВН. Комплексная оптимизация глубины и достоверности контроля изделий космических аппаратов // Полет. – 2009. – № 12. – С. 3–8.
2. Меньшиков ВА, Рудаков ВБ, Сычев ВН. Контроль качества космических аппаратов. – М.: Машиностроение-Полет, 2009. – 400 с.
3. Программа оптимизации выборочного контроля изделий КА при их квалификации и обработке. – М.: НИИ КС им. АА. Максимова, 2011. – 11 с.

Материал поступил в редакцию 19. 04. 2013 г.