

## ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ИЕРАРХИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ОТРАБОТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

**Макаров Михаил Иванович,**  
г. Королев, Россия, info@niiks.com

**Рудаков Валерий Борисович,**  
г. Королев, Россия, info@niiks.com

**Макаров Владимир Михайлович,**  
г. Москва, Россия, makarovvm@cbr.ru

**Аннотация.** Рассмотрена трехуровневая иерархическая структура контроля сложных электронных изделий автоматических космических аппаратов (АКА) при отработочных испытаниях в статистической постановке: контроль технических параметров каждого элемента, входящего в изделие; контроль совокупности разных элементов, из которых состоит изделие; контроль технических параметров электронного изделия АКА, как более высокого иерархического уровня. Разработана формализованная постановка задачи и алгоритм оптимизации интегрированного контроля в этой иерархической структуре. Использование результатов проведенных исследований позволяет снизить экономические затраты на проведение отработочных испытаний электронных изделий АКА с одновременным выполнением заданных требований к их техническим параметрам

**Ключевые слова:** иерархия; контроль; автоматический космический аппарат; надежность; параметры; потери; риски 1 и 2 рода; требования; целевая функция; экономические затраты.

**Сведения об авторах:** Макаров М.И., д.т.н., профессор, «НИИ КС имени А.А.Максимова» - филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королёв, Московской области, Россия;  
Рудаков В.Б., д.т.н., профессор, «НИИ КС имени А.А.Максимова» - филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королёв, Московской области, Россия;  
Макаров В.М., главный инженер Главного центра связи Банка России.

---

Проведенные исследования показали, что при иерархическом контроле электронных изделий АКА в процессе отработочных испытаний имеет место следующая специфика, которую не позволяют учесть существующие методы статистического контроля.

*Для электронного элемента [1,2]:*

- на каждый технический параметр элемента, входящего в изделие, в документации заданы допуски;
- при контроле каждого параметра возникают вероятностные ошибки, в результате которых годный параметр (находящийся в пределах допуска) можно принять за дефектный (вышедший за пределы допуска), а дефектный – за годный. Эти ошибки обусловлены ограниченной точностью и погрешностями средств измерения, т.е. контроль не является абсолютно достоверным;
- при контроле определенной номенклатуры технических параметров элементов также возникают ошибки, которые относятся уже к элементу в целом (случай контроля всех параметров элемента поглощается решением задачи).

*Для совокупности разных элементов, из которых состоит изделие:*

- при контроле определенной номенклатуры электронных элементов из их совокупности (например, входной контроль совокупности на предприятии-изготовителе сложного электронного изделия)

также возникают вероятностные ошибки. Эти ошибки связаны со всеми предыдущими, а также с тем, что проводится контроль не всей совокупности элементов, а только определенной номенклатуры элементов из этой совокупности. (Случай контроля всей совокупности элементов АКА является частным случаем, когда их номенклатура (выборка) совпадает со всей совокупностью, а случай контроля партии одинаковых элементов также является частным случаем, когда совокупность состоит из одинаковых элементов).

Для сложного электронного изделия АКА [1,2]:

- на каждый технический параметр сложного электронного изделия, которое является более высоким уровнем иерархии, также в документации заданы допуски;
- при контроле каждого параметра изделия также возникают вероятностные ошибки, в результате которых годный параметр (находящийся в пределах допуска) можно принять за дефектный (вышедший за пределы допуска), а дефектный – за годный. Природа этих ошибок аналогична элементам;
- при контроле определенной номенклатуры параметров изделия также возникают ошибки, которые относятся к изделию в целом (случай контроля всех параметров изделия поглощается решением задачи).

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия вероятностных ошибок: ошибки при контроле параметров каждого элемента, ошибки при контроле определенной номенклатуры элементов из их совокупности и ошибки при контроле параметров сложного электронного изделия АКА. Вероятности этих ошибок характеризуются соответствующими безусловными рисками 1 и 2 рода,  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно.

В результате проведенных исследований на основе использования аппарата алгебры событий разработаны математические зависимости для определения этих рисков, которые имеют следующий вид.

Для элемента [1,2]:

$$\alpha_{\text{э}} = \prod_{j=1}^{N_{\text{пэ}}} \frac{\alpha_{\text{пэ}j}}{\alpha_{\text{э}j}} \left[ 1 - \prod_{j=1}^{x_{\text{пэ}}} (1 - \alpha_{\text{э}j}) \right], \dots \dots \dots (1)$$

$$\beta_{\text{э}} = \prod_{j=1}^{x_{\text{пэ}}} \left[ \frac{\alpha_{\text{пэ}j}}{\alpha_{\text{э}j}} (1 - \alpha_{\text{э}j}) + \beta_{\text{пэ}j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{\text{пэ}}} \frac{\alpha_{\text{пэ}j}}{\alpha_{\text{э}j}} \prod_{j=1}^{x_{\text{пэ}}} (1 - \alpha_{\text{э}j}), \dots \dots \dots (2)$$

Для совокупности разных элементов, из которых состоит изделие:

$$\alpha_{\text{сэ}} = \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_{\text{иэ}i}}{\alpha_{\text{э}иэi}} \left[ 1 - \prod_{i=1}^{x_{\text{сэ}}} (1 - \alpha_{\text{э}иэi}) \right], \dots \dots \dots (3)$$

$$\beta_{\text{сэ}} = \prod_{i=1}^{x_{\text{сэ}}} \left[ \frac{\alpha_{\text{иэ}i}}{\alpha_{\text{э}иэi}} (1 - \alpha_{\text{э}иэi}) + \beta_{\text{иэ}i} \right] - \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_{\text{иэ}i}}{\alpha_{\text{э}иэi}} \prod_{i=1}^{x_{\text{сэ}}} (1 - \alpha_{\text{э}иэi}), \dots \dots \dots (4)$$

Для сложного электронного изделия АКА:

$$\alpha_{\text{и}} = \prod_{j=1}^{N_{\text{ии}}} \frac{\alpha_{\text{ии}j}}{\alpha_{\text{э}ииj}} \left[ 1 - \prod_{i=1}^{x_{\text{ии}}} (1 - \alpha_{\text{э}ииi}) \right], \dots \dots \dots (5)$$

$$\beta_{\text{и}} = \prod_{j=1}^{x_{\text{ии}}} \left[ \frac{\alpha_{\text{ии}j}}{\alpha_{\text{э}ииj}} (1 - \alpha_{\text{э}ииi}) + \beta_{\text{ии}j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{\text{ии}}} \frac{\alpha_{\text{ии}j}}{\alpha_{\text{э}ииj}} \prod_{j=1}^{x_{\text{ии}}} (1 - \alpha_{\text{э}ииi}), \dots \dots \dots (6)$$

где  $\alpha_{\text{пэ}j}$ ,  $\beta_{\text{пэ}j}$ , и  $\alpha_{\text{э}пэj}$  – безусловные риски и условный риск, возникающие при контроле j-го параметра элемента (метрологические риски, которые определяются известными методами метрологии [1,2,3], исходя из заданных допусков на каждый параметр элемента и погрешностей средств их измерения);

$N_{\text{пэ}}$  и  $x_{\text{пэ}}$  – общее количество параметров элемента и номенклатура контролируемых параметров (текущее значение);

$\alpha_{\text{иэ}i}$ ,  $\beta_{\text{иэ}i}$ , и  $\alpha_{\text{э}иэi}$  – безусловные риски и условный риск, возникающие при контроле i-го элемента из совокупности (определяются с учетом выражений (1) и (2));

$S$  и  $x_{\text{сэ}}$  – размер совокупности элементов и номенклатура контролируемых элементов (текущее значение);

$\alpha_{пji}$ ,  $\beta_{пji}$ , и  $\alpha_{упji}$  - безусловные риски и условный риск, возникающие при контроле j-го параметра сложного изделия (метрологические риски, которые определяются известными методами метрологии, исходя из заданных допусков на каждый параметр изделия и погрешностей средств их измерения);

$N_{пji}$  и  $x_{пji}$  – общее количество технических параметров сложного электронного изделия и номенклатура контролируемых параметров (текущее значение).

Выражения (3) и (4) для определения рисков 1 и 2 рода, возникающих при контроле совокупности разных элементов, входящих в изделие, обоснованы впервые.

Установлено, что в зависимости от изменения переменных  $x_{пэ}$ ,  $x_{сэ}$  и  $x_{пji}$  соответствующие риски 1 и 2 рода,  $\alpha$  и  $\beta$ , изменяются в противоположных направлениях. Кроме того, показано, что, если технические объекты: электронный элемент АКА, совокупность электронных элементов или сложное электронное изделие более высокого уровня не контролируются, то есть принимаются без контроля, либо контроль уже проведен и эти технические объекты уже приняты для проведения дальнейших работ, то с рисками происходит следующее:

1. Риски 1 рода  $\alpha$  становятся равными нулю.
2. Риски 2 рода  $\beta$  совпадают с вероятностями того, что соответствующие технические объекты являются дефектными, то есть не удовлетворяют заданным требованиям.

Реализация тех или иных значений рисков при контроле связана с принятием ошибочных решений по его результатам, которые влекут за собой определенные потери. С целью уменьшения этих потерь теоретически обоснованы целевые функции для каждого уровня в трехуровневой иерархической структуре. Целевые функции включают в себя три составляющие: математические ожидания экономических потерь, связанных с рисками 1 и 2 рода, и затраты на контроль. Они имеют следующий вид.

$$\text{Для элемента: } C_э = C_{1э} \alpha_э + C_{2э} \beta_э + \sum_{j=1}^{x_{пэ}} C_{1jэ}, \dots \dots \dots (7)$$

Для совокупности разных элементов, из которых состоит изделие:

$$C_{сэ} = C_{1сэ} \alpha_{сэ} + C_{2сэ} \beta_{сэ} + \sum_{i=1}^{x_{сэ}} C_{1iэ}, \dots \dots \dots (8)$$

Для сложного электронного изделия АКА:

$$C_{и} = C_{1и} \alpha_{и} + C_{2и} \beta_{и} + \sum_{j=1}^{x_{пji}} C_{1ji}, \dots \dots \dots (9)$$

где  $C_{1э}$ ,  $C_{1сэ}$ ,  $C_{1и}$  – математические ожидания экономических потерь за счет браковки годного элемента, совокупности элементов и изделия, соответственно;

$C_{2э}$ ,  $C_{2сэ}$ ,  $C_{2и}$  – математические ожидания экономических потерь за счет приемки дефектного элемента, совокупности элементов и изделия, соответственно;

$C_{1jэ}$ ,  $C_{1iэ}$ ,  $C_{1ji}$  – математические ожидания экономических затрат на контроль j-го параметра элемента, i-го элемента совокупности и j-го параметра изделия, соответственно.

На основе проведенных исследований разработана формализованная постановка задачи оптимизации планирования иерархического контроля электронных изделий АКА при отработочных испытаниях, которая имеет следующий вид:

**найти вектор**

$$\vec{Y} = \{ \min C_э, \min C_{сэ}, \min C_{и} \} \quad (10)$$

$$(\alpha_э, \beta_э) (\alpha_{сэ}, \beta_{сэ}) (\alpha_{и}, \beta_{и})$$

где

$$C_э = C_{1э} \alpha_э + C_{2э} \beta_э + \sum_{j=1}^{x_{пэ}} C_{1jэ}$$

$$C_{сэ} = C_{1сэ} \alpha_{сэ} + C_{2сэ} \beta_{сэ} + \sum_{i=1}^{x_{сэ}} C_{1iэ},$$

$$C_{и} = C_{1и} \alpha_{и} + C_{2и} \beta_{и} + \sum_{j=1}^{x_{пш}} C_{1ji},$$

$$\alpha_{э} = \prod_{j=1}^{N_{пэ}} \frac{\alpha_{пэj}}{\alpha_{yэj}} \left[ 1 - \prod_{j=1}^{x_{пэ}} (1 - \alpha_{yэj}) \right],$$

$$\beta_{э} = \prod_{j=1}^{x_{пэ}} \left[ \frac{\alpha_{пэj}}{\alpha_{yэj}} (1 - \alpha_{yэj}) + \beta_{пэj} \right] - \prod_{j=1}^{N_{пэ}} \frac{\alpha_{пэj}}{\alpha_{yэj}} \prod_{j=1}^{x_{пэ}} (1 - \alpha_{yэj}),$$

$$\alpha_{сэ} = \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_{icэ}}{\alpha_{yicэ}} \left[ 1 - \prod_{i=1}^{x_{сэ}} (1 - \alpha_{yicэ}) \right],$$

$$\beta_{сэ} = \prod_{i=1}^{x_{сэ}} \left[ \frac{\alpha_{icэ}}{\alpha_{yicэ}} (1 - \alpha_{yicэ}) + \beta_{icэ} \right] - \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_{icэ}}{\alpha_{yicэ}} \prod_{i=1}^{x_{сэ}} (1 - \alpha_{yicэ}),$$

$$\alpha_{и} = \prod_{j=1}^{N_{пш}} \frac{\alpha_{пшj}}{\alpha_{yпшj}} \left[ 1 - \prod_{j=1}^{x_{пш}} (1 - \alpha_{yпшj}) \right],$$

$$\beta_{и} = \prod_{j=1}^{x_{пш}} \left[ \frac{\alpha_{пшj}}{\alpha_{yпшj}} (1 - \alpha_{yпшj}) + \beta_{пшj} \right] - \prod_{j=1}^{N_{пш}} \frac{\alpha_{пшj}}{\alpha_{yпшj}} \prod_{j=1}^{x_{пш}} (1 - \alpha_{yпшj}),$$

в области, определяемой следующими неравенствами

$$\beta_{э} > 0, \alpha_{э} \geq 0, \alpha_{пэ} \geq 0, \beta_{пэ} > 0, \beta_{сэ} > 0, \alpha_{сэ} \geq 0, \beta_{и} > 0, \alpha_{и} \geq 0, \alpha_{пш} \geq 0, \beta_{пш} > 0,$$

$$0 < x_{пэ} \leq N_{пэ}; 0 < x_{сэ} \leq S; 0 < x_{пш} \leq N_{пш};$$

$$j_{пэ} = \overline{1, N_{пэ}}, j_{пш} = \overline{1, N_{пш}}, i = \overline{1, S}$$
(11)

Для решения задачи в данной постановке необходимо провести исследование свойств системы целевых функций. Однако прежде следует отметить следующий важный результат, относящийся к виду разработанных математических зависимостей (1)...(6) для определения соответствующих рисков 1 и 2 рода.

Как видно, эти математические зависимости имеют один и тот же аналитический вид, отличаясь лишь конкретными характеристиками. Это позволило значительно упростить исследование свойств целевых функций, которые геометрически представляют собой решетчатые поверхности в многомерном пространстве дискретных переменных. Определены условия существования минимума целевых функций, а также условия целесообразности контроля всей совокупности элементов и условия нецелесообразности проведения ее контроля.

На основе результатов, полученных при исследовании свойств системы целевых функций, с использованием [4], предложен поэтапный алгоритм их минимизации, который позволяет найти следующие оптимальные характеристики:

- оптимальный план контроля каждого электронного элемента, то есть оптимальную номенклатуру технических параметров, подлежащих обязательному контролю их общего количества параметров элемента, и оптимальные значения рисков 1 и 2 рода;
- оптимальный план контроля совокупности элементов, то есть оптимальную номенклатуру разных элементов, подлежащих обязательному контролю из совокупности, и оптимальные значения соответствующих рисков 1 и 2 рода;
- оптимальный план контроля сложного электронного изделия, как более высокого иерархического уровня, то есть оптимальную номенклатуру технических параметров изделия, подлежащих обязательному контролю из общего количества его параметров, и оптимальные значения рисков 1 и 2 рода.

При этом взаимосвязь между уровнями иерархии выражается через взаимосвязи между *апостериорными* рисками 1 и 2 рода [5], позволяющими реализовать интегрированный иерархический контроль. Математические зависимости для определения этих рисков разработаны с использованием аппарата булевой алгебры. Показано, что практическое использование *апостериорных* рисков 1 и 2 рода позволяет последовательно учесть результаты предшествующего контроля нижних уровней в трехуровневой иерархической структуре при оптимизации планов контроля изделий более высокого уровня, несмотря на различие контролируемых технических параметров на уровне элементов и сложных электронных изделий АКА.

Даны рекомендации по определению экономических составляющих целевых функций.

Для проведения конкретных расчетов разработана Программа оптимизации интегрированного иерархического контроля электронных изделий АКА в математической среде Mathcad [6,7].

Как показали расчеты, практическое использование результатов проведенных исследований позволяет снизить экономические затраты при проведении отработочных испытаний электронных изделий АКА и одновременно выполнить заданные требования к их техническим параметрам.

### Литература

1. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем. М.: СИП РИА, 2002. 355 с.
2. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М.: Машиностроение, 2009. 400с.
3. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. М.: Воен. издат., 1993. 393с.
4. Нестеров В.Е., Рудаков В.Б., Макаров М.И. Алгоритм иерархического контроля изделий ракетно-космической техники при наземной отработке // Двойные технологии. 2013. №2. С. 63-67.
5. Макаров М.И., Рудаков В.Б. Апостериорные риски при планировании наземной отработки ракетно-космической техники // Двойные технологии. 2013. №3. С. 3-34.
6. Mathcad 6.0. Plus. Финансовые, инженерные и научные расчёты в среде Windows 95./ Перевод с англ. М.: Информационно-издательский дом «Филинь». 1996. 712 с.
7. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. СПб.: БХВ-Петербург. 2006. 528 с.

---

## HIERARCHICAL CONTROL OF AUTOMATIC SPACE VEHICLES COMPLICATED ELECTRONIC DEVICES DURING THE DEVELOPMENT TESTS

**Makarov Mikhail Ivanovich,**  
Korolev, Russia, info@niiks.com

**Rudakov Valery Borisovich,**  
Korolev, Russia, info@niiks.com

**Makarov Vladimir Mikhailovich,**  
Moscow, Russia. makarovvm@cbr.ru

**Abstract.** Paper examines the three-level hierarchical structure of automatic space vehicles (ASV) complicated electronic devices control during the development tests in a statistical scenario: every device element engineering conditions control; bulk of elements comprising the devices control; ASV electronic device as higher hierarchical level engineering conditions control. The formalized scenario and optimization algorithm of integrated control in this hierarchical structure has been developed. The use of research results allows cutting the economic expenditures on ASV electronic devices development tests along with their simultaneous specific engineering conditions requirements compliance.

**Keywords:** hierarchy, control, automatic space vehicle, reliability, engineering conditions, losses, type I and type II risks, requirements, object function, economic expenditures.

**References**

1. Volkov L.I., Rudakov V.B. Statistical control of hierarchical systems. Moscow: SIP RIA. 2002. 355 p. (In Russian).
2. Menshikov V.A., Rudakov V.B., Sychev V.N. Space vehicles quality control during the development tests and manufacturing. Moscow: Mashinostroenie. 2009. 400 p. (In Russian).
3. Sychev V.I., Khramenkov V.N., Shkitin A.D. Basics of weapons and military equipment metrology. Moscow: Voen. izdat. 1993. 393 p. (In Russian).
4. Nesterov V.E., Rudakov V.B., Makarov M.I. Algorithm of rocket and space technology products hierarchical control during the ground verification tests. Dvoynnye tekhnologii. 2013. No. 2. Pp. 63-67. (In Russian).
5. Makarov M.I., Rudakov V.B. Posterior risks in the rocket and space technology ground verification tests planning. Dvoynnye tekhnologii. 2013. No. 3. Pp. 31-34. (In Russian).
6. Mathcad 6.0. Plus. Finansovyye, ingenernyye i nauchnyye raschety v srede Windows 95. Perevod s angliyskogo. Moscow: Informatsionno-izdatelsky dom "Filin". 1996. 712 p. (In Russian).
7. Kiryanov D.V. Mathcad 13. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 2006. 528 p. (In Russian).

**Information about authors:**

Makarov M.I., Prof., Full Dr., Director of A.A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khrunichiev State Research and Production Space Center, A. A. Maksimov Space Systems Research Institute.  
Rudakov V.B., Prof., Full Dr., Principal Researcher in A.A. Maksimov Space Systems Research Institute - Branch of FSUE Khrunichiev State Research and Production Space Center, A.A. Maksimov Space Systems Research Institute.  
Makarov V.M., Head Engineer, Bank of Russia Main Communications Center.