

УДК 629.7

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

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКОЙ ВОЗВРАЩАЕМОГО РАКЕТНОГО БЛОКА МНОГОРАЗОВОЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

REUSABLE SPACE ROCKET SYSTEM RECOVERY ROCKET PACKAGE GROUND DEVELOPMENT TEST OPTIMAL PLANNING AND MANAGEMENT

Аннотация. Рассматривается иерархический контроль технических параметров возвращаемого ракетного блока (ВРБ) многоразовой ракетно-космической системы (МРКС) на этапе наземной отработки. Излагается формализованная постановка задачи, основные результаты проведенных исследований и алгоритм оптимизации иерархического контроля и управления техническими параметрами возвращаемого ракетного блока в процессе наземной отработки.

Annotation. Paper considers the hierarchical control of engineering conditions of reusable space rocket system (RSRS) recovery rocket package (RRP) during the ground development test. The formalized problem formulation, major research findings and recovery rocket package engineering conditions during the ground development test hierarchical control and management optimization algorithm are shown.

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

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

В соответствии с техническим заданием (ТЗ) испытания ВРБ, которые будут проводиться в процессе его отработки, делятся на две основные группы – наземные и летные. Для каждой из этих групп характерны свои специфические особенности организации проведения испытаний. В статье будут рассмотрены только наземные испытания. При этом одной из важнейших целей процесса отработки является контроль и обеспечение заданных требований к техническим параметрам ВРБ, которые характеризуют его способность выполнять в полном объеме требуемые функции в установленных режимах и условиях применения в течение определенного времени или наработки в наземных условиях.

Этап наземной отработки состоит из наземных

автономных испытаний изделий и систем и наземных комплексных испытаний ВРБ в целом. При этом процесс наземной отработки включает в себя большое число различного вида разнородных испытаний, занимает большую продолжительность во времени и требует значительных экономических затрат.

Наземные автономные испытания (АИ) изделий ВРБ предназначены для проверки на специальных стендах правильности принятых проектных, схемно-конструктивных, технологических решений и соответствия заданным требованиям технических параметров. При этом определяются запасы работоспособности изделий, выявляются дефекты конструкторского и производственного характера, отрабатывается конструкторско-

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, A.A. 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

технологическая документация.

Наземные автономные испытания *систем* ВРБ проводятся на основе их демонстраторов, которые представляют собой натурные масштабные и полноразмерные стенды и модели (модели для аэротермодинамических продувок, макеты для прочностных испытаний; полноразмерные модели системы управления (СУ), воздушно-реактивного двигателя (ВРД) и других систем ВРБ), предназначенные для отработки в условиях, близких к реальным.

Основным содержанием наземных комплексных испытаний ВРБ в целом является проверка соответствия технических параметров заданным требованиям при совместной работе всех систем в течение времени, близкого к продолжительности полета, выявление и устранение дефектов на стыках изделий, приборов, агрегатов и систем.

При проведении испытаний изделий, систем и ВРБ в целом в процессе наземной отработки могут выявляться несоответствия требованиям, изложенным в ТЗ, а также отказы (неисправности) как конструктивного, так и производственного характера, влияющие на применение по назначению. Из состояния несоответствия заданным требованиям изделия системы и ВРБ в целом могут быть выведены только в результате проведения технического воздействия (доработки). При возникновении потребности в техническом воздействии испытания прекращаются, осуществляется поиск причин возникновения неисправностей и отказов, определяется объем работ для восстановления соответствия параметров требованиям, заданным в ТЗ и других документах, и организуется их выполнение. После завершения технического воздействия испытания продолжаются. Очевидно, что возникновение потребности в техническом воздействии (доработке) является всегда *внеплановым* и представляет собой механизм управления техническими параметрами соответствующих технических объектов: изделий, систем и ВРБ в целом. *Механизм управления* реализуется по результатам контроля параметров при испытаниях в основном посредством проведения доработок в широком смысле этого слова.

Учитывая все изложенное, для разработки математической модели иерархического контроля и управления процессами наземной отработки ВРБ МРКС будем рассматривать трехуровневую иерархическую структуру наземной отработки: автономные испытания изделий ВРБ, автономные испытания систем ВРБ и комплексные испытания ВРБ в целом.

В работе [1] было показано, что наиболее общим

случаем, который может иметь место при наземной отработке, является контроль совокупностей разных изделий ВРБ, относящихся к определенным уровням иерархии. Частными случаями при этом являются: случай контроля партии одинаковых изделий и случай контроля конкретного изделия. Поэтому при разработке математической модели иерархического контроля и управления процессами наземной отработки ВРБ МРКС будем рассматривать наиболее общий случай, когда при автономных испытаниях изделий ВРБ и систем ВРБ проводится контроль совокупностей разных изделий, относящихся к этим уровням иерархии, а при комплексных испытаниях ВРБ в целом проводится контроль технических параметров одного ВРБ, который комплектуется из совокупностей этих изделий и систем, принятых для дальнейшего использования по результатам испытаний. При этом будем считать, что технические параметры изделий и систем ВРБ, которые подлежат проведению автономных испытаний, уже определены оптимальным образом с использованием алгоритмов, изложенных в работах [2, 3].

Приступим непосредственно к разработке математической модели. Основываясь на результатах, полученных в работе [1], можно записать следующие целевые функции средних суммарных экономических затрат на контроль и потери, связанные с принятием неправильных решений, при контроле технических параметров.

Для этапа *автономных испытаний совокупностей разных изделий ВРБ*

$$C_{СИ}^{AI} = C_{1СИ}^{AI} \alpha_{СИ}^{AI} + C_{2СИ}^{AI} \beta_{СИ}^{AI} + \sum_{d=1}^{x_{II}} C_{1du}^{AI}, \quad (1)$$

где $C_{1СИ}^{AI}$ и $C_{2СИ}^{AI}$ – средние экономические потери за счет браковки годной и приёмки дефектной совокупности изделий ВРБ данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь (рассчитываются как сумма математических ожиданий по формулам, которые приведены в работе [2];

C_{1du} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль d -го изделия совокупности, $d = \overline{1}, \overline{M_u}$ (рассчитываются как сумма математических ожиданий по формулам, которые приведены в работе [2] для каждого изделия совокупности);

M_u – размер совокупности разных изделий ВРБ;

$\alpha_{СИ}^{AI}$ и $\beta_{СИ}^{AI}$ – соответствующие риски 1-го и 2-го рода, относящиеся к контролю всей совокупности, которые определяются следующим образом [1]:

$$\alpha_{СИ}^{AI} = \prod_{d=1}^{M_u} P(A_{du}) \left[1 - \prod_{d=1}^{x_{II}} (1 - \alpha_{ydu}) \right]; \quad (2)$$

$$\beta_{C_{II}^{AI}} = \prod_{d=1}^{x_{II}} [P(A_{du}) (1 - \alpha_{y_{du}}) + \beta_{du}] - \prod_{d=1}^{M_{II}} P(A_{du}) \prod_{d=1}^{x_{II}} (1 - \alpha_{y_{du}}), \quad (3)$$

где $P(A_{du})$ – вероятность того, что d -е изделие совокупности является годным;

x_{II} – неизвестная номенклатура изделий из совокупности, подлежащих обязательному проведению испытаний и контролю их технических параметров.

Для этапа *автономных испытаний совокупностей разных систем ВРБ*

$$C_{CC}^{AI} = C_{1CC}^{AI} \alpha_{CC}^{AI} + C_{2CC}^{AI} \beta_{CC}^{AI} + \sum_{d=1}^{x_C} C_{1dc}^{AI}, \quad (4)$$

где C_{1CC}^{AI} и C_{2CC}^{AI} – средние экономические потери за счет браковки годной и приёмки дефектной совокупности систем ВРБ данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь (рассчитываются по формулам [4]);

C_{1dc} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль d -й системы совокупности, $d = \overline{1, M_C}$; (рассчитываются по формулам [4] для каждого изделия совокупности);

M_C – размер совокупности разных систем ВРБ;

α_{CC}^{AI} и β_{CC}^{AI} – соответствующие риски 1-го и 2-го рода, относящиеся к контролю всей совокупности, которые определяются [1]:

$$\alpha_{CC}^{AI} = \prod_{d=1}^{M_C} P(A_{dc}) \left[1 - \prod_{d=1}^{x_C} (1 - \alpha_{y_{dc}}) \right]; \quad (5)$$

$$\beta_{CC}^{AI} = \prod_{d=1}^{x_C} [P(A_{dc}) (1 - \alpha_{y_{dc}}) + \beta_{dc}] - \prod_{d=1}^{M_C} P(A_{dc}) \prod_{d=1}^{x_C} (1 - \alpha_{y_{dc}}); \quad (6)$$

$P(A_{dc})$ – вероятность того, что d -я система совокупности является годной;

x_C – неизвестная номенклатура систем из совокупности, подлежащих обязательному проведению испытаний и контролю их технических параметров.

Для наземных комплексных испытаний ВРБ в целом

$$C_{IIB}^{KI} = C_{1B}^{KI} \alpha_{IIB}^{KI} + C_{2B}^{KI} \beta_{IIB}^{KI} + \sum_{j=1}^{x_{IIB}} C_{1ij}, \quad (7)$$

где C_{1B}^{KI} и C_{2B}^{KI} – средние экономические потери за счет браковки годного и приемки дефектного ВРБ, т.е. математические ожидания потерь (рассчитываются по формулам [4]);

C_{1j} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль j -го технического параметра

ВРБ, (рассчитываются по формулам [4] для каждого изделия совокупности);

α_{IIB}^{KI} и β_{IIB}^{KI} – соответствующие риски 1-го и 2-го рода, относящиеся к контролю ВРБ в целом, которые определяются в работе [1]

$$\alpha_{IIB}^{KI} = \prod_{j=1}^{N_{IIB}} \frac{\alpha_{Iij}}{\alpha_{y_j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{IIB}} (1 - \alpha_{y_j}) \right] = A_B \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{IIB}} A_{3j} \right]; \quad (8)$$

$$\beta_{IIB}^{KI} = \prod_{j=1}^{x_{IIB}} \left[\frac{\alpha_{Iij}}{\alpha_{y_j}} (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{Iij} \right] - \prod_{j=1}^{N_{IIB}} \frac{\alpha_{Iij}}{\alpha_{y_j}} \prod_{j=1}^{x_{IIB}} (1 - \alpha_{y_j}) = \prod_{j=1}^{x_{IIB}} A_{1j} - A_B \prod_{j=1}^{x_{IIB}} A_{3j}, \quad (9)$$

где A_{1j} , A_B , A_{3j} – величины введены для упрощения;

N_{IIB} – общее количество независимых параметров ВРБ;

x_{IIB} – неизвестное количество технических параметров ВРБ, подлежащих обязательному контролю при комплексных испытаниях ВРБ.

Основываясь на выражениях (1)–(9), а также на результатах, полученных в работе [1], в формализованном виде постановку задачи оптимального иерархического контроля и управления техническими параметрами ВРБ с учетом того, что технические параметры изделий и систем ВРБ, которые подлежат проведению автономных испытаний, уже определены оптимальным образом с использованием процедуры, изложенной в работе [3], можно записать в следующем виде:

найти вектор

$$\vec{Y} = \{ \min_{(x_u, \alpha_{uB}^{KI}, \beta_{uB}^{KI})} C_{IIB}^{KI}, \min_{(x_C, \alpha_{CC}^{AI}, \beta_{CC}^{AI})} C_{CC}^{AI}, \min_{(x_{II}, \alpha_{CII}^{AI}, \beta_{CII}^{AI})} C_{CII}^{AI} \}, \quad (10)$$

где C_{CII}^{AI} , C_{CC}^{AI} , C_{IIB}^{KI} – определяются выражениями (1), (4) и (7);

α_{CII}^{AI} , β_{CII}^{AI} , α_{CC}^{AI} , β_{CC}^{AI} , α_{IIB}^{KI} , β_{IIB}^{KI} – определяются выражениями (2), (3), (5), (6), (8), (9); в области, определяемой следующими неравенствами:

$$\alpha_{CII}^{AI} \geq 0, \beta_{CII}^{AI} \succ 0, \alpha_{CC}^{AI} \geq 0, \beta_{CC}^{AI} \succ 0, \alpha_{IIB}^{KI} \geq 0, \beta_{IIB}^{KI} \succ 0; \quad (11)$$

$$0 < x_u \leq M_u; \quad 0 < x_C \leq M_C; \quad 0 < x_{IIB} \leq N_{IIB}; \quad (12)$$

$$j = \overline{1, N_{IIB}}. \quad (13)$$

В результате решения задачи оптимизации будут получены следующие оптимальные характеристики: оптимальный план контроля совокупности разных изделий ВРБ при автономных испытаниях, включающий в себя оптимальные значения рисков 1 и 2 рода, а также номенклатуру изделий, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры; оптимальный план контроля совокупности разных систем ВРБ

при их автономных испытаниях, включающий в себя оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода, а также номенклатуру систем, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры; оптимальный план контроля технических параметров *ВРБ в целом* при его комплексных испытаниях, то есть оптимальная номенклатура параметров ВРБ, подлежащих обязательному контролю, и оптимальные значения соответствующих рисков 1-го и 2-го рода.

Для практического использования формализованной постановки (10)–(13) и решения задачи оптимизации необходимо разработать алгоритм ее решения, основное содержание которого изложено в работе [1] и будет детализировано ниже применительно к рассматриваемой задаче.

Одним из главных признаков ВРБ, как сложной технической системы, отражающих его целостность, является наличие у него определенной иерархической структуры. Этот признак полностью определяет характер организации его отработки и контроля технических параметров при испытаниях. Отработка изделий ВРБ должна проводиться строго поэтапно и последовательно, испытывая изделия по мере возрастания иерархических уровней. После изготовления *изделий* ВРБ нижнего уровня осуществляются их автономные испытания. В процессе этих испытаний проводится оценка и контроль технических характеристик и параметров. По результатам контроля, как отмечалось выше, реализуется механизм управления, который заключается в проведении схемно-конструктивных изменений, проведении различного рода регулировок, то есть осуществлении необходимых технических воздействий (доработок). Результатом этих воздействий является соответствие технических параметров изделий заданным требованиям, после которых испытания продолжаются. После успешных АИ изделий нижнего уровня из них посредством проведения различных производственно-технологических операций изготавливается более высокий уровень – *системы* ВРБ, которые тоже проходят автономные испытания, где также реализуются механизмы контроля и управления. После успешных АИ и контроля технических параметров систем ВРБ из них изготавливается *ВРБ в целом*, при проведении комплексных испытаний которого также реализуются механизмы контроля и управления его техническими параметрами, значения которых доводятся до соответствия требованиям, заданным в ТЗ.

При такой реализации процесса наземной отработки интуитивно ясно, что результаты автономных ис-

пытаний изделий и систем ВРБ несут информацию, не только о состоянии собственных технических параметров, но и некоторую долю информации и о состоянии технических параметров ВРБ в целом. И эту информацию необходимо учитывать при планировании контроля технических параметров ВРБ в целом на этапе его комплексных испытаний. Необходимость учета такой информации обусловлена прежде всего тем, что это приведет к сокращению экономических затрат на отработку при одновременном выполнении заданных требований к техническим параметрам. Теоретические исследования, приведенные в работе [2], показали, что эту информацию можно учесть на уровне апостериорных рисков для ВРБ в целом и для совокупностей разных изделий и систем ВРБ, которые будут раскрыты ниже. Эти апостериорные риски связаны с рисками, которые определяются выражениями (2), (3), (5), (6), (8), (9). Последние входят в соответствующие целевые функции $C_{СИ}^{АИ}$, $C_{СС}^{АИ}$, $C_{ИБ}^{КИ}$ для этапов автономных испытаний совокупностей разных *изделий, систем* ВРБ и комплексных испытаний *ВРБ в целом*, то есть (1), (4) и (7). Таким образом, формализованная постановка задачи векторной оптимизации (10)–(13) содержит взаимосвязанные функционалы, что с учетом характерного свойства процесса наземной отработки, о котором говорилось выше, позволяет ее решать поэтапно. На первом этапе следует определить оптимальные планы контроля совокупностей разных *изделий* ВРБ при их автономных испытаниях, то есть оптимальную номенклатуру изделий, подлежащих обязательному проведению испытаний и контролю их технических параметров и оптимальные риски 1-го и 2-го рода. Затем необходимо провести испытания этих изделий по оптимальным планам и по результатам контроля их технических параметров осуществить функцию управления этими параметрами, как было изложено выше. Далее после успешного завершения АИ *изделий* с учетом их результатов и полученных значений апостериорных рисков следует определить оптимальные планы контроля совокупностей разных *систем* ВРБ при их АИ, провести по ним испытания и так далее до проведения комплексных испытаний и контроля технических параметров *ВРБ в целом*.

В результате задача оптимизации иерархического контроля и управления техническими параметрами ВРБ состоит в следующем: *организовать такое управление процессом наземной отработки ВРБ и входящих в него изделий, реализация которого позволяла бы учитывать результаты контроля параметров нижних уровней ВРБ при планировании контроля технических параметров более высоких уровней и обеспечивала при этом*

минимум экономических затрат на контроль и потерь, связанных с принятием ошибочных решений.

Все изложенное позволяет непосредственно перейти к разработке алгоритма оптимизации иерархического контроля и управления техническими параметрами ВРБ МРКС в процессе наземной отработки. При этом, как и прежде, будем считать, что технические параметры изделий и систем ВРБ, которые подлежат проведению автономных испытаний, уже определены оптимальным образом с использованием процедуры, изложенной в работе [3].

1. Рассматривается самый нижний уровень иерархии ВРБ, то есть совокупность разных изделий ВРБ, которые подлежат проведению автономных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, что определить оптимальный план контроля этой совокупности, а именно: оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода, а также номенклатуру изделий, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры.

Исходными данными для решения задачи оптимизации являются:

M_u – размер совокупности разных изделий ВРБ;

C_{1CI}^{AI} и C_{2CI}^{AI} – средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности изделий ВРБ данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

C_{du}^{AI} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль d_u -го изделия совокупности, $d_u = \overline{1, M_u}$ (рассчитываются по формулам [2] для каждого изделия совокупности);

α_{du}^* , β_{du}^* – оптимальные риски 1-го и 2-го рода;

$P(A_{du})$ – вероятность того, что d_u -е изделие совокупности является годным, полученные на основе использования алгоритма оптимизации контроля технических параметров изделий, разработанного в работах [2, 3] (их количественные значения рассчитываются для всех изделий $d_u = \overline{1, M_u}$);

2. По данным значениям уточняется вид целевой функции (1) с использованием выражений для рисков 1-го и 2-го рода (2) и (3)

$$C_{CI}^{AI} = C_{1CI}^{AI} \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \left[1 - \prod_{d_u=1}^{x_u} (1 - \alpha_{ydu}) \right] + C_{2CI}^{AI} \times \left\{ \prod_{d_u=1}^{x_u} [P(A_{du})(1 - \alpha_{ydu}) + \beta_{du}] - \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \prod_{d_u=1}^{x_u} (1 - \alpha_{ydu}) \right\} + \sum_{d_u=1}^{x_u} C_{1du}^{AI} \quad (14)$$

Для этой целевой функции, далее, используется выявленное свойство [1], на основании которого можно заключить следующее: чтобы функция (14) имела минимум внутри интервала $0 < x_u < M_u$, должны среди всех M_u независимых изделий совокупности существовать такие x_u изделий, для которых бы выполнялись неравенства

$$C_{cu}^{0AI} > C_{cu}^{d_uAI}, \quad \text{для всех } d_u = \overline{1, M_u} \quad (15)$$

где C_{cu}^{0AI} – значение целевой функции при $x_u \rightarrow 0$, т.е. когда ни одно изделие из совокупности M_u не контролируется;

d_u – номер контролируемого изделия из совокупности;

$C_{cu}^{d_uAI}$ – значение целевой функции при контроле только d_u -го изделия.

Физический смысл неравенств (15) заключается в следующем. Из всей совокупности изделий M_u 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 совокупности разных изделий M_u не испытывается.

То есть дальнейшая последовательность действий для оптимального выбора номенклатуры изделий, подлежащих обязательному проведению автономных испытаний, состоит в следующем.

3. Вычисляется значение целевой функции C_{Cu}^{0AI} в точке $x_u \rightarrow 0$, т.е. когда ни одно изделие из M_u изделий не контролируется, по формуле (14)

$$C_{Cu}^{0AI} = C_{2CI}^{AI} \left[1 - \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \right]. \quad (16)$$

4. Определяются значения целевой функции $C_{Cu}^{d_uAI}$ для каждого d_u -го изделия отдельно. Эти значения вычисляются для всей совокупности изделий.

5. Среди всех M_u изделий в число x_u , подлежащих обязательному проведению автономных испытаний, включаются только те изделия, для которых выполняются неравенства (15).

Полученное значение x_u будет оптимальным $x_u = x_u^*$, ему соответствуют оптимальные значения рисков α_{Cu}^{*AI} и β_{Cu}^{*AI} , которые вычисляются по формулам

$$\alpha_{Cu}^{*AI} = \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \left[1 - \prod_{d_u=1}^{x_u^*} (1 - \alpha_{ydu}) \right]; \quad (17)$$

$$\beta_{Cu}^{*AI} = \prod_{d_u=1}^{x_u^*} [P(A_{du})(1 - \alpha_{ydu}) + \beta_{du}] -$$

$$- \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \prod_{d_u=1}^{x_u^*} (1 - \alpha_{y_{du}}). \quad (18)$$

Таким образом, в результате получен оптимальный план контроля совокупности разных изделий ВРБ.

6. Проводятся автономные испытания совокупности разных изделий по оптимальному плану

$$(x_u^*, \alpha_{cu}^{*AH}, \beta_{cu}^{*AH}, c = 0).$$

В результате проведения испытаний номенклатуры изделий x_u^* из совокупности M_u возможны два исхода.

6.1. *Случай 1.* При контроле технических параметров изделий оказалось, что все параметры соответствуют требованиям, заданным в соответствующей документации (являются годными). В этом случае совокупность изделий ВРБ по результатам автономных испытаний принимается для изготовления и проведения автономных испытаний более высокого иерархического уровня – совокупности систем ВРБ.

6.2. *Случай 2.* При контроле технических параметров изделий оказалось, что хотя бы один параметр не соответствует заданным требованиям (является дефектным). В этом случае включается механизм управления: совокупность изделий бракуется, проводятся технические воздействия (схемно-конструктивные изменения, регулировки и т.д., т.е. доработки), направленные на приведение технических параметров в соответствие заданным требованиям. После реализации механизма управления определяется новый оптимальный план контроля совокупности изделий ВРБ при автономных испытаниях.

В обоих случаях 6.1 и 6.2 происходит накопление статистической информации о результатах испытаний изделий и состоянии их технических параметров. Эту информацию необходимо учитывать в первом случае при построении новых оптимальных планов испытаний совокупности изделий, во втором случае при построении новых планов испытаний после доработок изделий совокупности. После проведения доработок совокупность изделий принимается по новому оптимальному плану.

7. Для построения нового оптимального плана испытаний поступаем следующим образом: по вновь полученной информации [2, 3] уточняются значения метрологических рисков 1-го и 2-го рода α_{y_j} , β_{y_j} каждого j -го параметра; уточняются значения оптимальных рисков 1-го и 2-го рода α_{du}^* , β_{du}^* и $P(A_{du})$ – вероятности того, что d_u -е изделие совокупности является годным, полученные на основе использования процедуры оптимизации контроля технических параметров изделий, разработанной в работах [2, 3]; повторяются расчеты в соответствии с алгоритмом, приведенным выше по пп. 1–5 и определяется новый

оптимальный план контроля совокупности разных изделий ВРБ.

Проводятся автономные испытания совокупности разных изделий ВРБ и контроль их технических параметров по новому оптимальному плану. При этом реализация случая 6.1 приводит к приемке совокупности изделий ВРБ по результатам автономных испытаний для изготовления и проведения автономных испытаний более высокого иерархического уровня – совокупности систем ВРБ. Реализация случая 6.2 приводит к необходимости построения нового оптимального плана, проведению автономных испытаний совокупности разных изделий ВРБ и контролю их технических параметров по новому оптимальному плану и т.д. до приемки этой совокупности.

8. Рассматривается более высокий уровень иерархии ВРБ, то есть совокупность разных систем ВРБ, которые подлежат проведению автономных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, чтобы определить оптимальный план контроля этой совокупности с учетом результатов контроля совокупности изделий ВРБ нижнего уровня, а именно: оптимальные значения рисков 1-го и 2-го рода, а также номенклатуру систем, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры.

Прежде чем приступить к решению задачи оптимизации, определяется [2] оптимальное значение апостериорного риска, с которым принята совокупность изделий предыдущего уровня, по формуле (18)

$$\beta_{Cu}^{*AH} = \prod_{d_u=1}^{x_u^*} [P(A_{du}) (1 - \alpha_{y_{du}}) + \beta_{du}] - \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \prod_{d_u=1}^{x_u^*} (1 - \alpha_{y_{du}}).$$

С учетом этого оптимальный план определяется на основе минимизации целевой функции, относящейся к совокупности разных систем ВРБ (4)

$$C_{CC}^{AH} = C_{1CC}^{AH} \alpha_{CC}^{AH} + C_{2CC}^{AH} \beta_{CC}^{AH} + \sum_{d=1}^{x_c} C_{1dc}^{AH}.$$

Однако при решении задачи минимизации риски 1-го и 2-го рода α_{CC}^{AH} и β_{CC}^{AH} , входящие в целевую функцию и относящиеся к контролю всей совокупности систем ВРБ, определяются уже с учетом результатов предыдущего контроля совокупности изделий ВРБ нижнего уровня [2] по формулам

$$\alpha_{CC}^{AH} = \prod_{d=1}^{M_c} P(A_{dc}) \left[1 - \prod_{d=1}^{x_c} (1 - \alpha_{y_{dc}}) \right] [1 - \beta_{cu}^*]; \quad (19)$$

$$\beta_{CC}^{AH} = \left\{ \prod_{d=1}^{x_c} [P(A_{dc}) (1 - \alpha_{ydc}) + \beta_{dc}] - \prod_{d=1}^{M_c} P(A_{dc}) \prod_{d=1}^{x_c} (1 - \alpha_{ydc}) \right\} [1 - (1 - \beta_{cu}^*)], \quad (20)$$

где $P(A_{dc})$ – вероятность того, что d -я система совокупности является годной;

x_c – неизвестная номенклатура систем из совокупности, подлежащих обязательному проведению испытаний и контролю их технических параметров.

Перейдем непосредственно к решению задачи оптимизации.

Исходными данными для ее решения являются:

C_{1cc}^{AH} и C_{2cc}^{AH} – средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности систем ВРБ данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь (рассчитываются по формулам [2]);

C_{1dc}^{AH} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль d -й системы совокупности, $d = 1, M_c$, (рассчитываются по формулам [2]) для каждого изделия совокупности);

M_c – размер совокупности разных систем ВРБ;

$\alpha_{dc}^*, \beta_{dc}^*$ – оптимальные риски 1-го и 2-го рода;

$P(A_{dc})$ – вероятность того, что d -я система совокупности является годной, полученные на основе использования алгоритма оптимизации контроля технических параметров систем, разработанного в работах [2, 3] (их количественные значения рассчитываются для всех систем $d_c = 1, M_c$).

9. По данным значениям уточняется вид целевой функции (4) с учетом выражений для рисков 1-го и 2-го рода (19) и (20)

$$\begin{aligned} C_{CC}^{AH} = & C_{1cc}^{AH} \prod_{d_c=1}^{M_c} P(A_{dc}) \left[1 - \prod_{d_c=1}^{x_c} (1 - \alpha_{ydc}) \right] [1 - \beta_{cu}^*] + \\ & + C_{2cc}^{AH} \left\{ \prod_{d_c=1}^{x_c} [P(A_{dc}) (1 - \alpha_{ydc}) + \beta_{dc}] - \prod_{d_c=1}^{M_c} P(A_{dc}) \prod_{d_c=1}^{x_c} (1 - \alpha_{ydc}) \right\} [1 - (1 - \beta_{cu}^*)] + \\ & + \sum_{d_c=1}^{x_c} C_{1dc}^{AH}. \end{aligned} \quad (21)$$

Далее расчет ведется в соответствии с пп. 2–5 аналогичным образом, как и для совокупности разных изделий ВРБ нижнего уровня иерархии.

В результате получаем оптимальную номенклатуру

систем ВРБ $x_c = x_c^*$, подлежащую обязательному проведению автономных испытаний из совокупности, и соответствующие оптимальные значения рисков α_{cu}^{*AH} и β_{cu}^{*AH}

$$\alpha_{cc}^{*AH} = \prod_{d_c=1}^{M_c} P(A_{dc}) \left[1 - \prod_{d_c=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{ydc}) \right] [1 - \beta_{cu}^*]; \quad (22)$$

$$\beta_{cc}^{*AH} = \left\{ \prod_{d_c=1}^{x_c^*} [P(A_{dc}) (1 - \alpha_{ydc}) + \beta_{dc}] - \prod_{d_c=1}^{M_c} P(A_{dc}) \prod_{d_c=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{ydc}) \right\} [1 - (1 - \beta_{cu}^*)]. \quad (23)$$

То есть, получен оптимальный план контроля ($x_c^*, \alpha_{cc}^{*AH}, \beta_{cc}^{*AH}, c = 0$) совокупности разных систем ВРБ с учетом результатов предшествующего контроля (автономных испытаний) совокупности изделий ВРБ нижнего уровня иерархии.

Далее при контроле по оптимальному плану могут также иметь место случаи 6.1 и 6.2. Эти случаи достаточно подробно рассмотрены в пп. 6 и 7 данного алгоритма и порядок действий остается прежним до приемки совокупности систем ВРБ по результатам автономных испытаний для изготовления и проведения комплексных испытаний более высокого иерархического уровня – ВРБ в целом.

10. Рассматривается самый высокий уровень иерархии, то есть ВРБ в целом, который подлежит проведению комплексных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, чтобы определить оптимальный план контроля технических параметров ВРБ, а именно: оптимальное количество и номенклатуру параметров ВРБ, подлежащих обязательному контролю, и оптимальные значения соответствующих рисков 1-го и 2-го рода с учетом результатов предшествующих автономных испытаний совокупностей изделий и систем ВРБ.

Прежде, чем приступить к решению задачи оптимизации, рассмотрим два случая, которые могут иметь место в практике.

10.1. *Случай А.* Поскольку ВРБ является вновь разрабатываемой сложной технической системой, головной разработчик может принять решение контролировать при комплексных испытаниях ВРБ всю совокупность $N_{ПВ}$ технических параметров ВРБ $j = 1, N_{ПВ}$. Этот случай не требует решения задачи оптимизации, поскольку план контроля технических параметров будет ($N_{ПВ}, \alpha_{ПВ}^{KH}, \beta_{ПВ}^{KH}, c = 0$), где риски 1-го и 2-го рода определяются на основе (8), (9) при условии $x_{ПВ} = N_{ПВ}$, но с

учетом результатов предшествующих автономных испытаний совокупности систем ВРБ на основе выражений

$$\alpha_{IB}^{KH} = \prod_{j=1}^{N_{IB}} \frac{\alpha_{n_j}}{\alpha_{y_j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{N_{IB}} (1 - \alpha_{y_j}) \right] (1 - \beta_{CC}^*) =$$

$$= A_B \left[1 - \prod_{j=1}^{N_{IB}} A_{3j} \right] (1 - \beta_{CC}^{*AH}); \quad (24)$$

$$\beta_{IB}^{KH} = \left\{ \prod_{j=1}^{N_{IB}} \left[\frac{\alpha_{n_j}}{\alpha_{y_j}} (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{n_j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{IB}} \frac{\alpha_{n_j}}{\alpha_{y_j}} \prod_{j=1}^{N_{IB}} (1 - \alpha_{y_j}) \right\} [1 - (1 - \beta_{CC}^{*AH})] =$$

$$= \left\{ \prod_{j=1}^{N_{IB}} A_{1j} - A_B \prod_{j=1}^{N_{IB}} A_{3j} \right\} [1 - (1 - \beta_{CC}^{*AH})], \quad (25)$$

где величины A_{1j} , A_0 , A_{3j} введены для упрощения.

При таком плане контроля технических параметров ВРБ в целом при комплексных испытаниях также могут иметь место случаи, описанные в пп.6.1 и 6.2. и рассмотренные в пп. 6 и 7 данного алгоритма. Порядок действий, в том числе и механизм управления техническими параметрами остается прежним до приемки ВРБ в целом по результатам комплексных испытаний.

10.2. *Случай В.* Этот случай соответствует необходимости решения задачи оптимизации, а именно: определению оптимальной номенклатуры параметров ВРБ в целом, подлежащих обязательному контролю при комплексных испытаниях, и оптимальных значений соответствующих рисков 1-го и 2-го рода с учетом результатов предшествующих автономных испытаний совокупностей изделий и систем ВРБ. Такой случай может иметь место, например, тогда, когда ВРБ МРКС через определенный промежуток времени перестанет быть вновь разрабатываемой системой, появятся серийные образцы. Либо, когда конструктор осуществляет совместное проектирование ВРБ и системы контроля его технических параметров, а также в ряде других случаев.

Прежде чем приступить к решению задачи оптимизации, определяется оптимальное значение *априорного риска*, с которым приняты совокупности изделий и систем предыдущих уровней при их автономных испытаниях, на основе формулы (23) с учетом реализованного механизма управления техническими параметрами

$$\beta_{CC}^{*AH} = \left\{ \prod_{d_c=1}^{x_c^*} [P(A_{dc}) (1 - \alpha_{ydc}) + \beta_{dc}] - \prod_{d_c=1}^{M_c} P(A_{dc}) \prod_{d_c=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{ydc}) \right\} [1 - (1 - \beta_{cu}^*)].$$

Далее определяется оптимальный план контроля технических параметров ВРБ в целом при комплексных испытаниях на основе минимизации целевой функции, относящейся к ВРБ в целом (7)

$$C_{IB}^{KH} = C_{1B}^{KH} \alpha_{IB}^{KH} + C_{2B}^{KH} \beta_{IB}^{KH} + \sum_{j=1}^{x_{IB}} C_{1j}.$$

Однако при решении задачи минимизации риски 1-го и 2-го рода α_{IB}^{KH} и β_{IB}^{KH} , входящие в целевую функцию и относящиеся к контролю технических параметров ВРБ в целом, определяются уже с учетом результатов предшествующего контроля совокупностей изделий и систем ВРБ нижних уровней на основе (24) и (25), по формулам

$$\alpha_{IB}^{KH} = \prod_{j=1}^{x_{IB}} \frac{\alpha_{n_j}}{\alpha_{y_j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{IB}} (1 - \alpha_{y_j}) \right] (1 - \beta_{CC}^*) =$$

$$= A_B \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{IB}} A_{3j} \right] (1 - \beta_{CC}^{*AH}); \quad (26)$$

$$\beta_{IB}^{KH} = \left\{ \prod_{j=1}^{x_{IB}} \left[\frac{\alpha_{n_j}}{\alpha_{y_j}} (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{n_j} \right] - \prod_{j=1}^{x_{IB}} \frac{\alpha_{n_j}}{\alpha_{y_j}} \prod_{j=1}^{x_{IB}} (1 - \alpha_{y_j}) \right\} [1 - (1 - \beta_{CC}^{*AH})] =$$

$$= \left\{ \prod_{j=1}^{x_{IB}} A_{1j} - A_B \prod_{j=1}^{x_{IB}} A_{3j} \right\} [1 - (1 - \beta_{CC}^{*AH})], \quad (27)$$

где x_{IB} уже играет роль неизвестной номенклатуры технических параметров ВРБ, оптимальное значение которой необходимо определить.

Для решения задачи минимизации уточняется вид целевой функции (7) с учетом выражений (26) и (27). Далее используется процедура оптимизации технических параметров, изложенная в работе [1].

В результате использования этой процедуры получаем оптимальную номенклатуру технических параметров ВРБ в целом $x_{IB} = x_{IB}^*$, подлежащую обязательному контролю при проведении комплексных испытаний, и соответствующие оптимальные значения рисков α_{IB}^{*KH} и β_{IB}^{*KH}

$$\alpha_{IB}^{*KI} = \prod_{j=1}^{N_{IB}} \frac{\alpha_{II_j}}{\alpha_{y_j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{IB}^*} (1 - \alpha_{y_j}) \right] (1 - \beta_{CC}^*) =$$

$$= A_B \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{IB}^*} A_{3j} \right] (1 - \beta_{CC}^{*AH}); \quad (28)$$

$$\beta_{IB}^{*KI} = \left\{ \prod_{j=1}^{x_{IB}^*} \left[\frac{\alpha_{II_j}}{\alpha_{y_j}} (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{II_j} \right] - \right.$$

$$\left. - \prod_{j=1}^{N_{IB}} \frac{\alpha_{II_j}}{\alpha_{y_j}} \prod_{j=1}^{x_{IB}^*} (1 - \alpha_{y_j}) \right\} [1 - (1 - \beta_{CC}^{*AH})] =$$

$$= \left\{ \prod_{j=1}^{x_{IB}^*} A_{1j} - A_B \prod_{j=1}^{x_{IB}^*} A_{3j} \right\} [1 - (1 - \beta_{CC}^{*AH})], \quad (29)$$

которые учитывают результаты предшествующего контроля технических параметров совокупностей изделий и систем ВРБ, принятых по оптимальным планам.

Таким образом, реализация алгоритма оптимизации иерархического контроля и управления техническими параметрами ВРБ обеспечивает такое управление процессом наземной отработки ВРБ и входящих в него изделий, которое учитывает результаты контроля параметров нижних уровней ВРБ при планировании контроля технических параметров более высоких уровней и обеспечивает минимум экономических затрат на контроль и потери, связанные с рисками принятия ошибочных решений.

Литература

1. Нестеров В.Е., Рудаков В.Б., Макаров М.И. Алгоритм иерархического контроля изделий ракетно-космической техники при наземной отработке // Двойные технологии № 2, 2013, с. 63–67.
2. Нестеров В.Е., Рудаков В.Б., Макаров М.И. Апостериорные риски при планировании наземной отработки ракетно-космической техники // Двойные технологии № 3, 2013.
3. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Комплексная оптимизация глубины и достоверности контроля изделий космических аппаратов // Полет № 12, 2009, с. 3–8.
4. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. Оптимизация и управление рисками. – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2009.

Материал поступил в редакцию 19. 04. 2013 г.