

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ И КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО И ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ИХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

Василевский Анатолий Вячеславович,
к.т.н., заместитель начальника научно-технического
центра-4 Центрального научно-исследовательского института
машиностроения, г. Москва, Россия,
VasilevskiyAV@tsniimash.ru

Ермакова Юлия Сергеевна,
младший научный сотрудник отдела
4141 Центрального научно-исследовательского
института машиностроения,
г. Москва, Россия,
4212ermakova@bk.ru

Озеров Дмитрий Алексеевич,
младший научный сотрудник отдела
4141 Центрального научно-исследовательского инсти-
тута машиностроения,
г. Москва, Россия,
dimaazz@gmail.com

Комаров Иван Демьянович,
начальник отдела
4141 Центрального научно-исследовательского
института машиностроения,
г. Москва, Россия,
info416@tsniimash.ru

Тюрина Дарья Дмитриевна,
заместитель начальника отдела научно-технического
центра-4 Центрального научно-исследовательского инсти-
тута машиностроения,
г. Москва, Россия,
TyurinaDD@tsniimash.ru

Тютюлин Юрий Александрович,
и.о. начальника лаборатории отдела
4141 Центрального научно-исследовательского инсти-
тута машиностроения,
г. Москва, Россия,
p361@list.ru

Харченко Александр Петрович,
начальник научно-технического центра-4
Центрального научно-исследовательского
института машиностроения,
г. Москва, Россия,
NTC4@tsniimash.ru

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются задачи планирования и комплексирования испытаний космических аппаратов и их бортовых систем на этапах наземной отработки и летных испытаний, направленные на обеспечение выполнения требований в части надежности и ресурса изделий космических аппаратов, обоснования снижения затрат ресурсов и времени на отработку и контроль опытных изделий.

Ключевые слова: комплексирование испытаний; надежность; система отработки; снижение затрат; контроль опытных изделий.

Для цитирования: *Василевский А.В., Ермакова Ю.С., Комаров И.Д., Озеров Д.А., Тюрина Д.Д., Тютюлин Ю.А., Харченко А.П.* Методика планирования и комплексирования испытаний при экспериментальной отработке космических аппаратов военного и двойного назначения и их бортовых систем // I-methods. 2018. Т. 10. №. 2. С. 05-17.

Введение

Сравнительный анализ надежности отечественных и зарубежных средств выведения автоматических космических аппаратов (АКА) показывает, что интегральный показатель аварийности отечественных средств выведения находится на уровне сопоставленном с уровнем зарубежных средств выведения. Такое состояние достигнуто, в т. ч., благодаря установлению единого порядка задания требований надежности, обеспечения безопасности, оценки, контроля, наземной отработки и испытаний на основе ГОСТ 1410-001 и Положения РК-11-КТ (РК-98-КТ).

В то же время срок активного существования (САС) отечественных АКА различного целевого назначения в настоящее время составляет в среднем порядка 7 лет, что значительно уступает зарубежным аналогам КА. Такое значение САС обуславливается преждевременными отказами, являющихся следствием, в основном, конструктивных и производственных дефектов, невыявленных и неустранённых в процессе наземной отработки и испытаний. Как показывают результаты мониторинга технического состояния и надёжности КА различного целевого назначения и их бортовых систем, проводимого ФГУП ЦНИИмаш, пропуск дефектов приводит к значительному увеличению затрат времени и ресурсов, прежде всего, финансовых средств, на этапе их испытаний, что связано с нерациональностью объёмов наземной отработки и испытаний. Нерациональность проводимых испытаний, в свою очередь, связана с тем, что действующее нормативное и методическое обеспечение планов испытаний и экспериментальной отработки техники не учитывает в полной мере особенности испытаний и экспериментальной отработки конкретных АКА и их бортовых систем. К этим особенностям относятся, в частности комплексирование испытаний бортовых систем, узлов и агрегатов АКА. Для обеспечения возможности учёта указанных особенностей необходима общая методика планирования и комплексирования испытаний при экспериментальной отработке АКА и его бортовых систем.

Объёмы наземной экспериментальной отработки и испытаний, в итоге, определяют уровень надежности создаваемых КА и его бортовых систем, а также основные затраты времени и ресурсов на этапе их испытаний. Затраты на лабораторно - стендовую отработку КА весьма значительны. Так, для некоторых типов АКА они составляют порядка 80% от стоимости ОКР головного разработчика по созданию модуля целевой аппаратуры и ее адаптации к унифицированной космической платформе военного и двойного назначения.

Поэтому задача разработки общей методики планирования и комплексирования испытаний АКА и их бортовых систем при экспериментальной отработке является актуальной, и обуславливает необходимость целесообразности совершенствования методов экспериментальной отработки АКА.

Разработка данной методики представляет собой сложную научно-техническую задачу по следующим причинам:

- сложность многопараметрической многофакторной задачи планирования испытаний АКА, их бортовых систем, узлов и агрегатов;
- повышение требований к программам и условиям функционирования современных АКА длительными САС (10 лет и более), их целевых и обеспечивающих систем;
- высокий уровень требований к показателям назначения, качества, надежности, ресурса, безопасности современных АКА и их бортовых систем;
- широкая кооперация организаций - разработчиков и организаций - производителей АКА и их бортовых систем;
- разнообразие различных видов и программ испытаний АКА на надежность и безопасности их бортовых систем;
- повышение стоимости разработки, производства и испытаний КА и их бортовых систем;
- необходимость развития и совершенствования общей теории испытаний сложных технических систем.

Комплексирование испытаний космических аппаратов в части образцов космической техники военного, двойного, научного и социального - экономического назначения. Основные положения, понятия, термины и определения. Классификация видов испытаний и типов комплексирования.

Комплексирование испытаний АКА

- планирование системы испытаний АКА и их бортовых систем на этапах наземной отработки и летных испытаний, направленное на обеспечение выполнения требований в части надежности, работоспособности и ресурса АКА, обоснование снижения затрат ресурсов и времени на их отработку и контроль опытных изделий.

При экспериментальной отработке АКА и их бортовых систем целесообразно использовать следующие **типы комплексирования испытаний (табл.№ 1)**:

- комплексирование испытаний (КОИ-1) - на основе использования результатов испытаний и моделирования;

Таблица № 1

Тип комплексирования	Основной фактор компенсации	Виды испытаний, при проведении которых используется тип комплексирования	Влияние комплексирования на объем испытаний	Область применения
КОИ-1	Использование моделей	Функциональные испытания агрегатов, систем, КА Испытания на надежность	Сокращение числа образцов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ,СЭС,ДУ и т.д.
КОИ-2	Информация об аналогах	Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность Ресурсные испытания	Сокращение числа образцов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ,СЭС,ДУ и т.д.
КОИ-3	Унификация стендового оборудования	Функциональные испытания Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность Ресурсные испытания и т.д.	Сокращение числа образцов Сокращение испытательных стендов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ,СЭС,ДУ и т.д. Целевая аппаратура
КОИ-4	Совмещение отработочных и контрольных испытаний	Функциональные испытания Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность	Сокращение числа образцов Сокращение испытательных стендов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ,СЭС,ДУ и т.д. Целевая аппаратура
КОИ-5	Совмещение испытаний на одной материальной составной части КА согласно схемы деления (конструктивно, функционально)	Функциональные испытания Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность	Сокращение числа образцов Сокращение испытательных стендов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ,СЭС,ДУ и т.д. Целевая аппаратура
КОИ-6	Сочетание сплошного и выборочного контроля на этапе опытного и серийного производства	Функциональные испытания Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность	Сокращение числа образцов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ,СЭС,ДУ и т.д. Целевая аппаратура

окончание таблицы 1

Тип комплексирования	Основной фактор компенсации	Виды испытаний, при проведении которых используется тип комплексирования	Влияние комплексирования на объем испытаний	Область применения
КОИ-7	Оптимальное планирование испытаний (экспериментов)	Функциональные испытания Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность	Сокращение числа образцов Сокращение времени испытаний	Обеспечивающие системы КА: СУ, СЭС, ДУ и т.д. Целевая аппаратура
КОИ-8	Эффективность наземной отработки	Функциональные испытания Испытания на стойкость к ВВФ Испытания на надежность Ресурсные испытания и т.д.	Сокращение числа образцов Сокращение времени испытаний	Испытания узлов, агрегатов, систем КА и АКА в целом

- комплексирование испытаний (КОИ-2) - на основе использования результатов эксплуатации изделий и систем аналогов;
- комплексирование испытаний (КОИ-3) - на основе реализации унификации технологических процессов испытаний и универсализации стендового испытательного оборудования;
- комплексирование испытаний (КОИ-4) - на основе совмещения результатов отработочных и контрольных испытаний;
- комплексирование испытаний (КОИ-5) - на основе совмещения различных видов испытаний на одной составной части;
- комплексирование испытаний (КОИ-6) - на основе результатов сочетания сплошного и выборочного контроля на этапе опытного и серийного производства;
- комплексирование испытаний (КОИ-7) - на основе использования методов оптимального планирования эксперимента;
- комплексирование испытаний (КОИ-8) - на основе сочетания эффективных наземных испытаний и сокращенных демонстрационных летных испытаний.

Рассмотрим более подробно два важных типа комплексирования испытаний - КОИ-1 и КОИ-2.

Комплексирование испытаний (КОИ-1) - планирование испытаний АКА и бортовых систем, при проведении которых обоснованное снижение затрат средств и времени на их отработку и контроль обеспечивается на основе использования результатов наземных, летных испытаний и моделирования.

Данный тип комплексирования испытаний, позволяет существенно сократить затраты средств и времени при экспериментальной отработке АКА и их бортовых систем.

Для реализации КОИ-1 необходимо проводить испытания с использованием различных видов моделей (математических, физических, имитационных и др.).

Виды испытаний, в которых используется комплексирование испытаний на основе совмещения результатов испытаний и моделирования:

- функциональные испытания агрегатов, узлов и приборов, входящих в состав бортовых систем космических аппаратов АКА;
- функциональные испытания бортовых систем АКА (автономные, комплексные);
- функциональные испытания АКА (комплексные, межведомственные);
- механические, испытания на прочность, испытания на устойчивость, климатические, термические, радиационные, электрические, электромагнитные испытания АКА и их бортовых систем;
- испытания на надежность АКА и их бортовых систем;
- испытания на безопасность АКА и их систем;

- ресурсные испытания агрегатов, узлов, приборов и бортовых систем АКА;
- испытания на транспортабельность КА и его бортовых систем.

Комплексирование испытаний (КОИ-2) - планирование испытаний АКА и бортовых систем, при проведении которых обоснованное существенное снижение затрат, средств и времени для оценки и прогноза их работоспособности и ресурса обеспечивается на основе использования результатов эксплуатации изделий и систем аналогов.

Виды испытаний, в которых проводится комплексирование испытаний на основе использования результатов эксплуатации изделий и систем аналогов:

- испытания на надежность агрегатов, узлов, приборов и бортовых систем АКА;
- ресурсные испытания агрегатов, узлов, приборов и бортовых систем АКА;
- испытания на стойкость к ВВФ бортовых систем АКА (в частности, на стойкость к ионизирующему излучению);
- функциональные испытания агрегатов, узлов, приборов, бортовых систем АКА.

Комплексирование испытаний АКА на основе сочетания сплошного и выборочного контроля

Рассмотрим виды испытаний, при проведении которых используется тип комплексирования испытаний КОИ-6.

Комплексирование испытаний АКА и их бортовых систем на этапе опытного и серийного производства проводится на основе сочетания сплошного и выборочного контроля для следующих видов испытаний:

- входной контроль материалов, полуфабрикатов, ЭРИ, бортовых изделий (приборов, агрегатов и систем), электронной компонентной базы (ЭКБ);
- контроль стабильности и устойчивости технологических процессов;
- контроль качества выполнения технологических операций;
- периодические испытания и т.д.

Основные положения общей методики планирования и комплексирования испытаний при экспериментальной отработке АКА и их бортовых систем заключается в следующих методологических аспектах. Анализ данных применения по назначению КА и их бортовых систем свидетельствует о наличии большого количества несоответствий их надёжности заданным требованиям. Эти несоответствия являются следствием ошибок при принятии решений, допущенных при использовании традиционных методов статистического выборочного контроля надёжности, составляющих методическую основу организации существующего процесса экспериментальной отработки.

Этим методам присущ ряд недостатков:

при определении доли дефектных изделий в выборке предполагается, что контроль каждого изделия выборки абсолютно достоверен. Такой контроль легко спланировать, организовать и реализовать. Однако этот контроль сопровождается грубыми ошибками и большими рисками при приёмке партии изделий, что подтверждается практикой создания образцов-аналогов КА;

при контроле изделий по выборке технических параметров, характеризующих надёжность изделия, предполагается, что контроль этой выборки абсолютно достоверен. При таком контроле возникают ошибки и связанные с ними риски, которые обусловлены ограниченными как номенклатурой контролируемых параметров изделия, так и точностью средств их измерений. Несмотря на то, что при таком контроле параметров существенно повышается точность измерений, однако не учитываются методические ошибки традиционных методов выборочного контроля, обусловленные следующим принятым условием: номенклатура контролируемых параметров изделия считается определённой абсолютно правильно. Это приводит к грубым ошибкам и большим рискам, возникающим при таком контроле, что также подтверждается на практике;

не приспособлены для оценки и минимизации рисков при поэтапном контроле технических параметров КА по иерархическим уровням его изделий.

Экспериментальная отработка (ЭО) надёжности КА и его изделий осуществляется, в соответствии с комплексными программами экспериментальной отработки и программами лётных испытаний (ПЛИ) и включает в себя два основных этапа.

I – этап наземной отработки (автономные, комплексные, межведомственные испытания), по завершению которого принимается решение о допуске к лётным испытаниям;

II – этап лётной отработки (лётные испытания и специальные испытания), по завершению которого принимается решение о начале серийного производства КА.

Основу модели составляют следующие целевые функции суммарных средних стоимостных затрат на контроль и стоимостные потерь, связанные с принятием ошибочных решений, при контроле технических параметров [1,2].

Стоимостные затраты на контроль и стоимостные потерь для этапа АИ совокупностей разных КА и их бортовых систем определяются на основе следующих формул:

$$C_{СИ}^{АИ} = C_{1СИ}^{АИ} \alpha_{СИ}^{АИ} + C_{2СИ}^{АИ} \beta_{СИ}^{АИ} + \sum_{du=1}^{x_n} C_{1k du}^{АИ}, \quad (1)$$

$$\alpha_{СИ}^{АИ} = \prod_{du=1}^{M_u} P(A_{du}) [1 - \prod_{du=1}^{x_u} (1 - \alpha_{ydu}^{АИ})]; \quad (2)$$

$$\beta_{СИ}^{АИ} = \prod_{du=1}^{x_u} [P(A_{du})(1 - \alpha_{ydu}^{АИ}) + \beta_{du}^{АИ}] - \prod_{du=1}^{M_u} P(A_{du}) \prod_{du=1}^{x_u} (1 - \alpha_{ydu}^{АИ}), \quad (3)$$

где $\alpha_{СИ}^{АИ}$ и $\beta_{СИ}^{АИ}$ - соответствующие риски 1 и 2 рода, относящиеся к контролю всей совокупности;

$C_{1СИ}^{АИ}$ и $C_{2СИ}^{АИ}$ - средние стоимостные потери за счёт браковки годной и приёмки дефектной совокупности КА и их бортовых систем данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

C_{1du} - средние стоимостные затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль du -го изделия совокупности, $du=1, \overline{M_u}$;

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

M_u – размер совокупности разных КА и их бортовых систем;

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

Средние стоимостные затраты на контроль C_{1kj} определяются на основе следующих формул:

при неразрушающем контроле $C_{1kj} = \overline{C}_{1kjTK} + \overline{C}_{1kjOK}, \quad (4)$

при разрушающем контроле $C_{1kjKP} = \overline{C}_{1И} + \overline{C}_{1kjOK}, \quad (5)$

Составляющая C_1 , входящая в стоимостные потери, находится следующих в пределах:

$$\overline{C}_{1TK} \leq C_1 \leq \overline{C}_{1И}. \quad (6)$$

Величина C_2 зависит от того, на каком этапе обнаружены дефектные изделия:

при изготовлении изделия более сложного уровня;

при вводе в эксплуатацию готовых систем и при их эксплуатации.

При использовании изделий ℓ -го уровня для изготовления изделия более сложного $(\ell+1)$ -го уровня стоимостные потери C_2 определяются стоимостью устранения дефектов (отказов), пропущенных контролем с ℓ -го на $(\ell+1)$ -й уровень:

$$C_2 = (N_D)^{-1} \sum_{j=1}^k m_j \overline{C}_{yDj}, \quad (7)$$

Если контроль изделий $(\ell+1)$ -го уровня является разрушающим, то

$$C_2 = C_u^*, \quad (8)$$

Соотношение (8) обусловлено тем, что отказ изделия ℓ -го уровня на $(\ell+1)$ -м уровне приводит к потере изделия $(\ell+1)$ -го уровня.

Полученные выражения (7), (8) позволяют определить стоимостную составляющую потерь C_2 , входящую в целевую функцию, на этапе использования изделий ℓ -го уровня для изготовления изделий более сложного $(\ell+1)$ -го уровня.

Для изделий, поступающих в эксплуатацию,

$$\bar{C}_{y\partial j} = \bar{C}_{y\partial j}^{\partial} + \bar{C}_{y\partial j}^{ko} \quad (9)$$

Потери $\bar{C}_{y\partial j}^{ko}$ должны определяться исходя из специфики КА и их бортовых систем. Для КА и их бортовых систем стоимость затрат на дополнительное резервирование на уровне изделия в целом, можно рассматривать в качестве потерь $\bar{C}_{y\partial j}^{ko}$. В этом случае $\bar{C}_{y\partial j}^{ko}$ определяется как:

$$\bar{C}_{y\partial j}^{ko} = (\delta_j - 1)\bar{C}_{\partial j} \quad (10)$$

Здесь \bar{C}_{1jTK} - математическое ожидание стоимостных затрат на технический контроль A_j -го параметра изделия;

\bar{C}_{1jOK} - математическое ожидание затрат, связанных с организацией проведения контроля A_j -го параметра изделия;

\bar{C}_{1II} - математическое ожидание стоимости изделия ℓ -го уровня;

\bar{C}_{1TK} - математическое ожидание потерь на проведение повторного технического контроля ошибочно забракованного годного изделия; m_i - число обнаруженных дефектных A_j - х параметров;

$\bar{C}_{y\partial j}$ - стоимость устранения дефекта A_j - го параметра;

k - число типов дефектов j -го параметра;

N_d - число дефектных изделий ℓ -го уровня, обнаруженных на $(\ell+1)$ -го уровне;

C_u - стоимость изделия $(\ell+1)$ -го уровня;

δ_j - кратность резервирования;

$\bar{C}_{\partial j}$ - математическое ожидание стоимостных затрат, связанных с испытаниями дополнительного количества резервных изделий.

Стоимостные затраты на контроль и потери для этапа АИ совокупностей разных систем КА определяются на основе следующих формул:

$$C_{cc}^{AI} = C_{1cc}^{AI} \alpha_{cc}^{AI} + C_{2cc}^{AI} \beta_{cc}^{AI} + \sum_{dc=1}^{x_c} C_{1kdc}^{AI} \quad (11)$$

$$\alpha_{cc}^{AI} = \prod_{dc=1}^{Mc} P(A_{dc}) [1 - \prod_{dc=1}^{x_c} (1 - \alpha_{ydc}^{AI})], \quad (12)$$

$$\beta_{cc}^{AI} = \prod_{dc=1}^{x_c} [P(A_{dc})(1 - \alpha_{ydc}^{AI}) + \beta_{dc}^{AI}] - \prod_{dc=1}^{Mc} P(A_{dc}) \prod_{dc=1}^{x_c} (1 - \alpha_{ydc}^{AI}). \quad (13)$$

где α_{cc}^{AI} и β_{cc}^{AI} - соответствующие риски 1 и 2 рода, относящиеся к контролю всей совокупности,

C_{1cc}^{AI} и C_{2cc}^{AI} - средние стоимостные потери за счёт браковки годной и приёмки дефектной совокупности систем КА данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

C_{1dc} - средние стоимостные затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль dc -й системы совокупности, $dc=1, \overline{Mc}$;

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

M_c – размер совокупности разных систем КА;

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

Стоимостные затраты на контроль и стоимостные потери для наземных комплексных испытаний КА в целом определяются на основе следующей формулы:

$$C_{KA}^{KI} = C_{1KA}^{KI} \alpha_{KA}^{KI} + C_{2KA}^{KI} \beta_{KA}^{KI} + \sum_{j=1}^{x_{nKA}} C_{1kj}^{KI}, \quad (14)$$

$$\alpha_{KA}^{KI} = \prod_{j=1}^{N_{PKA}} P(A_j) [1 - \prod_{j=1}^{x_{PKA}} (1 - \alpha_{yj}^{KI})], \quad (15)$$

$$\beta_{KA}^{KI} = \prod_{j=1}^{x_{PKA}} [P(A_j)(1 - \alpha_{yj}^{KI}) + \beta_{Pj}^{KI}] - \prod_{j=1}^{N_{PKA}} P(A_j) \prod_{j=1}^{x_{PKA}} (1 - \alpha_{yj}^{KI}), \quad (16)$$

где - C_{1KA}^{KI} и C_{2KA}^{KI} - средние экономические потери за счёт браковки годного и приёмки дефектного КА, т.е. математические ожидания потерь;

C_{ij} - средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль A_j -го технического параметра КА;

α_{PKA}^{KI} и β_{PKA}^{KI} - соответствующие риски 1 и 2 рода, относящиеся к контролю КА в целом;

$P(A_j)$ – вероятность того, что A_j –й технический параметр совокупности $j=1, \overline{N_{nKA}}$ является годным;

N_{PKA} – общее количество технических параметров КА;

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

С учётом выражений (11) - (16) формализованная постановка задачи имеет вид: найти минимальные объёмы АИ совокупностей разных изделий и систем КА, наземных комплексных испытаний КА в целом и соответствующие им риски, затраты и потери, при которых удовлетворяются требования к надёжности создаваемой КА

$$\vec{Y} = \{ \min_{\{x_u, \alpha_{nKA}, \beta_{nKA}\}} C_{KA}^{KI}, \min_{\{x_c, \alpha_{cc}, \beta_{cc}\}} C_{CC}^{AI}, \min_{\{x_u, \alpha_{cu}, \beta_{cu}\}} C_{CI}^{AI} \} \quad (17)$$

в области, определяемой следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} P(A_{du}) &\geq P_{mpu}, \quad \forall du = \overline{1, x_u}; \\ P(A_{dc}) &\geq P_{mpc}, \quad \forall dc = \overline{1, x_c}; \\ P(A_j) &\geq P_{mpj}, \quad \forall j = \overline{1, x_n}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{CI}^{AI} &\geq 0, \beta_{CI}^{AI} > 0, \quad 0 < x_u \leq M_u; \\ \alpha_{CC}^{AI} &\geq 0, \beta_{CC}^{AI} > 0, \quad 0 < x_c \leq M_c; \\ \alpha_{KA}^{KI} &\geq 0, \beta_{KA}^{KI} > 0, \quad 0 < x_{nKA} \leq N_{nKA}; \end{aligned} \quad (19)$$

где C_{CI}^{AI} , C_{CC}^{AI} , C_{KA}^{KI} - определяются выражениями (1), (11) и (14);

α_{CI}^{AI} , β_{CI}^{AI} , α_{CC}^{AI} , β_{CC}^{AI} , α_{KA}^{KI} , β_{KA}^{KI} - определяются выражениями (2), (3), (12), (13), (15), (16).

Решение поставленной задачи (17) - (19) достигается поэтапно в соответствии с изложенным ниже алгоритмом.

1. Формируются следующие исходные данные для решения задачи минимизации:

M_u , α_{du}^* , β_{du}^* (вычисляются на основе формул (2) и (3); $P(A_{du})$, C_{1CH}^{AI} , C_{2CH}^{AI} , C_{1kdu}^{AI} (рассчитываются с использованием формул (4) - (10));

2. С использованием этих данных и формул (2), (3) исследуется функция (1) для формирования номенклатуры контролируемых изделий x_u ($0 < x_u < M_u$). Для этого среди всех M_u изделий совокупности находятся такие изделия, для которых выполняются неравенства [3,4]:

$$V_{CH}^{0AI} = (1 - C_{CH}^{duAI} / C_{CH}^{0AI}) > 0, P_{CH}^{duAI}(A_{du}) \geq P_{cu_{TP}}, \text{ для всех } du = \overline{1, M_u}, \quad (20)$$

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

d_u – номер контролируемого изделия;

C_{CH}^{duAI} - значение целевой функции при контроле только du -го изделия на этапе АИ.

Из всей совокупности изделий M_u в число изделий, подлежащих обязательному контролю (проведению соответствующих испытаний), включаются только те изделия, для которых выполняются неравенства (20). Такой порядок отбора обеспечивает нахождение минимума функции C_{CH}^{AI} (1) на интервале $0 < x_u \leq M_u$, которому соответствует оптимальный план контроля совокупности разных КА и их бортовых систем.

3. Проводятся автономные испытания совокупности разных изделий по этому оптимальному плану (x_u^* , α_{cu}^{*AI} , β_{cu}^{*AI} , $c=0$). В результате проведения испытаний номенклатуры изделий X_u^* из совокупности M_u возможны два исхода.

Исход 3.1. При контроле технических параметров изделий оказалось, что все параметры соответствуют заданным требованиям (являются годными). В этом случае совокупность КА и их бортовых систем по результатам АИ принимается для изготовления и проведения АИ более высокого иерархического уровня – совокупности систем КА.

Исход 3.2. 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 надёжности в соответствие заданным требованиям. После реализации механизма управления повторяются расчёты в соответствии с п. 2 алгоритма для определения нового оптимального плана контроля совокупности разных КА и их бортовых систем при АИ.

Проводятся АИ совокупности разных КА и их бортовых систем и контроль их технических параметров по новому оптимальному плану. При этом реализация случая 3.1 приводит к приёме совокупности КА и их бортовых систем по результатам АИ для изготовления и проведения АИ более высокого иерархического уровня – совокупности систем КА. Реализация случая 3.2 приводит к необходимости построения нового оптимального плана, проведению АИ совокупности разных КА и их бортовых систем и контролю их технических параметров по новому оптимальному плану и т.д. до приёмки этой совокупности.

4. Рассматривается более высокий уровень иерархии КА, то есть совокупность разных систем КА, которые подлежат проведению АИ. На этом этапе задача состоит в том, чтобы с учётом результатов контроля совокупности КА и их бортовых систем нижнего уровня определить оптимальный план контроля этой совокупности систем, а именно: минимальные значения рисков 1 и 2 рода, а также минимальную номенклатуру систем, которые необходимо поставить на испытания.

До начала решения задачи минимизации рисков принятия ошибочных решений по результатам контроля технических параметров совокупности систем КА, определяется минимальное зна-

чение апостериорного риска, с которым принята совокупность изделий предыдущего уровня, по следующей формуле:

$$\beta_{СИ}^{*AI} = \prod_{d_u=1}^{x_u^*} [P(A_{du})(1 - \alpha_{ydu}^{AI}) + \beta_{du}^{AI}] - \prod_{d_u=1}^{M_u} P(A_{du}) \prod_{d_u=1}^{x_u^*} (1 - \alpha_{ydu}^{AI}). \quad (21)$$

Оптимальный план определяется на основе минимизации функции (11), рисков α_{CC}^{AI} (12) и β_{CC}^{AI} (13) с учётом $\beta_{СИ}^{*AI}$ (21), т.е. результатов предшествующего контроля совокупности КА и их бортовых систем нижнего уровня. Дальнейшая последовательность действий при решении задачи минимизации рисков иерархического контроля технических параметров совокупности систем КА состоит в следующем.

Исходные данные: M_c , α_{du}^* , β_{du}^* , $P(A_{dc})$, $C_{1СИ}^{AI}$, $C_{2СИ}^{AI}$, C_{1dc}^{AI} , $d=1, \overline{M_c}$, (рассчитываются с использованием формул (4) - (10)).

Далее расчёт ведётся в соответствии с пп. 2-4 аналогичным образом, как и для совокупности разных КА и их бортовых систем нижнего уровня иерархии. В результате получаем минимальную номенклатуру систем КА $x_c = x_c^*$, подлежащую обязательному проведению АИ из совокупности, и соответствующие минимальные значения рисков α_{cc}^{*AI} , β_{cc}^{*AI} . То есть, получен оптимальный план контроля x_c^* , α_{cc}^{*AI} , β_{cc}^{*AI} , $c=0$ совокупности разных систем КА с учётом результатов предшествующего контроля (АИ) совокупности КА и их бортовых систем нижнего уровня иерархии.

Далее, при контроле по оптимальному плану могут также иметь место исходы 3.1 и 3.2. Эти исходы рассмотрены в п. 3 данного алгоритма и порядок действий остаётся прежним до приёмки совокупности систем КА по результатам АИ для изготовления и проведения комплексных испытаний более высокого иерархического уровня – КА в целом.

5. Рассматривается самый высокий уровень иерархии, то есть КА в целом, который подлежит проведению комплексных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, чтобы определить оптимальный план контроля технических параметров КА, а именно: минимальное количество и номенклатуру параметров КА, подлежащих обязательному контролю, и минимальные значения соответствующих рисков 1 и 2 рода с учётом результатов предшествующих АИ совокупностей изделий и систем КА.

Рассмотрены два исхода, которые могут иметь место в практике.

Исход 5.1. Поскольку перспективный КА является вновь разрабатываемой сложной технической системой, головной разработчик может принять решение контролировать при КИ КА всю совокупность $N_{ПКА}$ технических параметров КА.

Этот случай не требует решения задачи минимизации рисков иерархического контроля технических параметров КА в целом, поскольку план контроля технических параметров будет иметь следующий вид: $(N_{ПКА}, \alpha_{КА}^{КИ}, \beta_{КА}^{КИ}, c=0)$, где риски 1 и 2 рода определяются на основе формул (15), (16) при условии $x_{ПКА} = N_{ПКА}$, но с учётом результатов предшествующих АИ совокупности систем КА на основе выражений (15), (16):

$$\alpha_{КА}^{КИ} = \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} P(A_j) [1 - \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} (1 - \alpha_{y_j})], \quad (22)$$

$$\beta_{КА}^{КИ} = \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} [P(A_j)(1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{Пj}] - \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} P(A_j) \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} (1 - \alpha_{y_j}). \quad (23)$$

При таком плане контроля технических параметров КА в целом при КИ также могут иметь место случаи 3.1 и 3.2, описанные в п.3 данного алгоритма. Порядок действий, в том числе и механизм управления надёжностью остаётся прежним до приёмки КА в целом по результатам КИ.

Исход 5.2. Этот случай соответствует необходимости определения минимальной номенклатуры параметров КА в целом, подлежащих обязательному контролю при КИ, и минимальных значений соответствующих рисков 1 и 2 рода с учётом результатов предшествующих АИ совокупностей изделий и систем КА.

Определяется минимальное значение апостериорного риска, с которым приняты совокупности изделий и систем предыдущих уровней при их АИ, с учётом реализованного механизма управления надёжностью на основе формулы:

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

Далее определяется оптимальный план контроля технических параметров КА в целом на основе формулы:

$$C_{КА}^{КИ} = C_{1КА}^{КИ} \alpha_{КА}^{КИ} + C_{2КА}^{КИ} \beta_{КА}^{КИ} + \sum_{j=1}^{x_{ПКА}} C_{1kj}^{КИ}. \quad (25)$$

При решении задачи минимизации риски 1 и 2 рода $\alpha_{КА}^{КИ}$ и $\beta_{КА}^{КИ}$, входящие в функцию (25) и относящиеся к контролю технических параметров КА в целом, определяются с учётом результатов предшествующего контроля совокупностей изделий и систем КА нижних уровней на основе формул:

$$\alpha_{КА}^{КИ} = \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} P(A_j) [1 - \prod_{j=1}^{x_{ПКА}} (1 - \alpha_{yj}^{КИ})], \quad (26)$$

$$\beta_{КА}^{КИ} = \prod_{j=1}^{x_{ПКА}} [P(A_j)(1 - \alpha_{yj}^{КИ}) + \beta_{пj}^{КИ}] - \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} P(A_j) \prod_{j=1}^{x_{ПКА}} (1 - \alpha_{yj}^{КИ}). \quad (27)$$

Далее используется процедура минимизации, изложенная в п. 3. данного алгоритма.

В результате использования этой процедуры определяется минимальная номенклатура технических параметров КА в целом $x_{ПКА}^* = x_{ПКА}^*$, подлежащая обязательному контролю при проведении КИ и соответствующие минимальные значения рисков:

$$\alpha_{КА}^{КИ} = \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} P(A_j) [1 - \prod_{j=1}^{x_{ПКА}^*} (1 - \alpha_{yj}^{КИ})], \quad (28)$$

$$\beta_{КА}^{КИ} = \prod_{j=1}^{x_{ПКА}^*} [P(A_j)(1 - \alpha_{yj}^{КИ}) + \beta_{пj}^{КИ}] - \prod_{j=1}^{N_{ПКА}} P(A_j) \prod_{j=1}^{x_{ПКА}^*} (1 - \alpha_{yj}^{КИ}). \quad (29)$$

которые учитывают результаты предшествующего контроля совокупностей изделий и систем КА, принятых по оптимальным планам.

При таком плане контроля ($x_{нКА}^*$, $\alpha_{КА}^{КИ*}$, $\beta_{КА}^{КИ*}$, $c = 0$) технических параметров КА в целом при КИ также могут иметь место случаи 3.1 и 3.2, описанные в п. 3 данного алгоритма. Порядок действий, в том числе и механизм управления надёжностью, остаётся прежним до приёмки КА в целом по результатам комплексных испытаний.

Таким образом, реализация алгоритма минимизации рисков принятия ошибочных решений при контроле изделий по этапам испытаний КА и их бортовых систем позволяет осуществлять управление рисками и надёжностью на различных этапах с учётом результатов контроля параметров нижних уровней КА при планировании контроля технических параметров более высоких уровней, что обеспечивает минимум стоимостных затрат на контроль и потерь, связанных с принятием ошибочных решений.

В целом реализация общей методики планирования и комплексирования испытаний при экспериментальной отработке космических аппаратов и их бортовых систем, основанного на комплексировании испытаний и минимизации рисков иерархического контроля технических параметров при выработке управляющих воздействий по доведению значений надёжности до заданных уровней, позволит реализовать механизм управления рисками принятия ошибочных решений в процессе ЭО КА.

Технико-экономический эффект комплексирования испытаний КА

Наиболее значимый технико-экономический эффект можно получить при использовании следующих типов комплексирования на основе:

- использования результатов испытаний и моделирования;
- использования результатов эксплуатации изделий и систем аналогов;
- совмещения отработочных и контрольных испытаний;
- сочетания сплошного и выборочного контроля на этапах экспериментальной отработки и производства;
- сочетания эффективных наземных испытаний и сокращённых демонстрационных летных испытаний.

Заключение

Рассмотрены основные положения, понятия, термины и определения в области комплексирования испытаний космических аппаратов.

Представлены классификации видов испытаний, типов комплексирования при экспериментальной отработке космических аппаратов и их бортовых систем.

Основные положения общей методики планирования и комплексирования испытаний при экспериментальной отработке космических аппаратов и их бортовых систем разработаны с учетом передового отечественного и зарубежного опыта их разработки и производства.

Литература

1. Кузьмин Ф. И. Задачи и методы оптимизации показателей надёжности. М.: Сов. радио, 1972. 223 с.
2. Беляев Ю.К. Вероятностные методы выборочного контроля. М.: Наука, 1975. 406 с.
3. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. М.: Физматгиз, 1972. 424 с.
4. Меньшиков В. А., Рудаков В. Б., Сычев В. Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.

METHODS OF PLANNING AND INTEGRATION OF TESTING IN THE EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF SPACE VEHICLES OF MILITARY AND DVOINOGO PURPOSE AND THEIR ON-BOARD SYSTEMS

Anatoly V. Vasilevsky,
Moscow, Russia,
VasilevskiyAV@tsniimash.ru

Darya D. Tyurina,
Moscow, Russia,
TyurinaDD@tsniimash.ru

Ivan D. Komarov,
Moscow, Russia,
info416@tsniimash.ru

Julia S. Ermakova,
Moscow, Russia
4212ermakova@bk.ru

Yuri A. Tyutyulin,
Moscow, Russia,
p361@list.ru

Alexander P. Kharchenko,
Moscow, Russia,
NTC4@tsniimash.ru

Dmitry A. Ozerov,
Moscow, Russia,
dimaazz@gmail.com

ABSTRACT

Work deals with the problems of planning and complexing tests of spacecraft and their onboard systems at the stages of ground testing and flight tests, aimed at ensuring compliance with the requirements in terms of reliability and life of SPACECRAFT products, the rationale for reducing the cost of resources and time for testing and control of experimental products.

Keywords: integration testing, reliability, system testing, cost reduction; control of pilot products.

Reference

1. Kuzmin F. I. *Zadachi i metody` optimizacii pokazatelej nadyozhnosti* [Problems and methods of reliability optimization]. Moscow: Sovetskoe radio, 1972. 223 p. (In Russian)
2. Belyaev Yu. K. *Veroyatnostny`e metody` vy`borochnogo kontrolya* [Probabilistic methods of sampling control]. Moscow: Science, 1975. 406 p. (In Russian)
3. Evlanov L. G. *Kontrol` dinamicheskix sistem* [Control of dynamic systems]. Moscow: Fizmatgiz, 1972. 424 p. (In Russian)
4. Menshikov V. A., Rudakov V. B., Sychev V. N. *Kontrol` kachestva kosmicheskix apparatov pri otrabotke i proizvodstve* [Quality control of spacecraft during development and production]. Moscow: Masinostroenie, 2009. 400 p. (In Russian)

Information about authors:

Vasilevsky A.V., PhD, Deputy head of NTC-4 of the Central research Institute of mechanical engineering;
Ermakova Yu.S., Research Assitent of the Department 4141 of the Central research Institute of mechanical engineering;
Komarov I.D., Department Chair 4141 of the Central research Institute of mechanical engineering;
Ozerov D.A., Research Assitent of the Department 4141 of the Central research Institute of mechanical engineering;
Tyurina D.D., Head of the Department of SEC-4 of the Central research Institute of mechanical engineering»
Tyutyulin Yu. A., Research Assitent of the laboratory of the Department 4141 of the Central research Institute of mechanical engineering;
Kharchenko A.P. Department Chair of NTC-4 of the Central research Institute of mechanical engineering.

For citation: Vasilevsky A. V., Ermakova Yu. S., Komarov I. D., Ozerov D. A., Tyurin D. D., Tutulan Yu. A. Methods of planning and integration of testing in the experimental development of space vehicles of military and dvoynogo purpose and their on-board systems. *I-methods*. 2018. Vol.10. No. 2. Pp. 05-17. (In Russian)