

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

УДК 629.734.7.018.7

DOI: 10.34759/vst-2021-1-126-136

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ПАРАШЮТНЫХ СИСТЕМ. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Иванов П.И.^{*}, Криворотов М.М.^{}, Куринный С.М.^{***}**

*Научно-исследовательский институт аэроупругих систем,
ул. Гарнаева, 85, Феодосия, Республика Крым, 298112 Россия*

^{} e-mail: Ivanovpetr@rambler.ru*

*^{**} e-mail: Krivorotovmm@mail.ru*

*^{***} e-mail: Kurinniys@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 22.12.2020

Настоящая работа посвящена вопросам информативности (информативной содержательности) летного эксперимента в процессах летных испытаний и вопросам принятия решений по результатам испытаний парашютных систем. В работе рассматривается ряд методов разноуровневой оценки информативной содержательности результатов летного эксперимента. На самом нижнем уровне иерархии информативная содержательность эксперимента количественно оценивается коэффициентом, равным отношению объема полученной в эксперименте информации к запланированному объему. Следующий над ним, более высокий уровень в иерархической структуре информативной содержательности летного эксперимента связан с вероятностным подходом к проблеме, т.е. информативную содержательность эксперимента количественно можно также измерить вероятностью получения однозначного ответа на поставленный экспериментатором вопрос, что позволяет принять правильные решения по выбору направлений дальнейших исследований. Следующий, более высокий уровень в иерархической структуре информативной содержательности летного эксперимента связан с количественной оценкой информации так, как это делается в теории информации и кодирования, как без учета, так и с учетом влияния помех. Приведен оптимальный вариант типовой структурной схемы процесса принятия решения по результатам информативно-содержательных экспериментов.

Ключевые слова: цели и задачи летного эксперимента; летные испытания парашютных систем; информативная содержательность эксперимента; структура принятия решений.

Введение

Предварительный анализ состояния рассматриваемой в работе проблемы в России и мире, насколько стало известно авторам из доступных

открытых источников, показал отсутствие сведений, связанных с исследованием информативности эксперимента в процессах летных испытаний

парашютных систем. Этот факт отражает новизну рассматриваемой проблемы.

Актуальность рассматриваемой проблемы связана со следующим. Летные испытания парашютных систем (ЛИ ПС) являются весьма дорогостоящим видом испытаний. Кроме того, с учетом быстрого морального старения образцов авиационной техники в условиях развития современного научно-технического прогресса, ставится задача минимизации возможных сроков проведения ЛИ при их максимальной эффективности. Эффективность, в общем случае, есть отношение полезного эффекта (результата) к затратам на его получение. Эффективность летного эксперимента и минимизация возможных сроков проведения ЛИ напрямую зависят от информативной содержательности летного эксперимента, вопросам количественной оценки которой посвящена данная работа.

Методы оценки информативности летного эксперимента

В отличие от моделирования, где подобие устанавливается только по некоторым основным критериям, в натурном летном эксперименте может быть достигнуто полное подобие по всем без исключения критериям. А это уже фактически исключает вероятность пропуска аварийных комбинаций параметров, режимов и условий, которых не удалось бы обнаружить на моделях.

Таким образом, эффективность и надежность проверки ПС и планирующих парашютных систем (ППС) в натуральных условиях на макетах заключается в возможности обнаружения и своевременного устранения опасных комбинаций воздействующих факторов, приводящих к необратимым или нежелательным последствиям, вероятность появления которых существовала бы в процессе применения натурального изделия по назначению [1–3].

Летные испытания – заключительный этап создания парашютной и парапланерной техники, на котором выявляются все неточности или недостатки объекта испытаний, не выявленные на всех предыдущих этапах (при выборе концепции, компоновке, проектировании, производстве и подготовке к летным испытаниям).

Основной целью летных испытаний ПС и ППС является проверка функционирования системы объект-парашют (параплан) в натуральных или максимально приближенных к реальным (штатным) условиям ее эксплуатации [1].

Натурные условия или максимально приближенные к натурным обеспечиваются носителями ракетно-космического комплекса (РКК) или авиационными средствами доставки и обеспечения испытательных режимов (самолетами, вертолетами, аэростатами и т.д.).

Основными задачами летных испытаний ПС и ППС (далее по тексту условно ПС) являются:

1. Проверка работоспособности элементов ПС и систем парашютного десантирования (СПД); выбор оптимальных вариантов конструкции (исследовательские и сравнительные испытания).

2. Оценка качества функционирования ПС и ее эффективности как в составе с весовым макетом (ВМ), так и в составе с натурным объектом (контрольные и натурные испытания).

3. Получение характеристик ПС (динамических, аэродинамических, геометрических, летно-тактических) в процессе ее функционирования. Установление соответствия параметров ПС и СПД техническому заданию (ТЗ) или тактико-техническим требованиям (ТТТ) – определительные испытания.

4. Проверка целесообразности серийного производства ПС и СПД и применения их по прямому назначению; периодический контроль серийной продукции, в том числе и после внесения в нее конструктивных изменений (контрольные (типовые) испытания).

5. Экспериментальная проверка физических и математических моделей. Получение экспериментальных зависимостей (эмпирических, полуэмпирических); проверка и уточнение существующих, а также разработка новых методов расчета характеристик процесса функционирования системы объект-ПС (исследовательские и определительные испытания).

6. Проверка и уточнение существующих, а также разработка новых методов летных испытаний ПС (включая ускоренные или ужесточенные испытания).

Качественное, эффективное решение сформулированных выше основных задач летных испытаний ПС и ППС неизбежно требует высокого уровня информативности результатов летного эксперимента.

Основные концепции, положенные в основу ЛИ ПС, заключаются в повышении эффективности ЛИ ПС по основным локальным (безопасность (надежность), информативность, экономичность) и интегральному критериям эффективности.

Под эффективностью ЛИ ПС понимается степень приспособленности объекта, системы или структуры к выполнению поставленных задач при соблюдении всех требований и ограничений [3, 4].

Локальные критерии эффективности ЛИ выводятся исходя из целей, специфики и условий испытаний, таких, как:

- получение качественных, высокой точности результатов (информативность летного эксперимента);
- разработка оптимальных методов испытаний;
- рациональное планирование экспериментов;
- оперативный контроль и анализ результатов летных испытаний;
- сопоставление различных вариантов организации и проведения летных испытаний;
- оценка возможных исходов и степени риска;
- минимально возможные временные, материальные и финансовые затраты.

В данной работе детально рассматривается только один локальный критерий оценки эффективности эксперимента – информативность летного эксперимента.

Понятие информативности включает в себя: количество и качество результатов, информативную содержательность, достаточную для принятия грамотного (правильного) решения при определении цели дальнейших исследований, корректность методики организации (подготовки и проведения) летного эксперимента.

Под качественным результатом летного эксперимента понимается результат, с высокой степенью достоверности отражающий истинные характеристики исследуемого процесса. Основной количественной оценкой качества конкретного результата является его точность, обратно пропорциональная среднеквадратическому отклонению результатов измерений от величины математического ожидания.

Степень корректности и правильности методики организации эксперимента позволяет априори с высокой степенью достоверности сократить начальный интервал неопределенности при получении результата, достаточного для корректного ответа на поставленный в эксперименте вопрос. Некорректно выбранная методика организации и проведения летного эксперимента приводит либо к неточному результату и, как следствие, неправильным выводам, вытекающим из него, либо к правильному, но не имеющему в данный момент практической ценности, т.е. не отвечающему на поставленный перед экспериментом вопрос. Суще-

ность корректности методики организации эксперимента состоит, в частности, в точности и правильности определения минимального объема требуемых мероприятий для достижения цели эксперимента. Степень корректности методики определяется ее аттестацией и зависит от опыта, знаний и квалификации ведущих специалистов, разрабатывавших методику и выполняющих испытания. Приблизительно, косвенно может быть оценена уровнем квалификации специалиста-эксперта по рейтинговой системе (или отношением количества успешно завершенных к общему количеству проведенных им работ).

Эксперимент считается информативно содержательным, если результаты обработки его материалов позволяют получить высокого качества результат и с высокой степенью достоверности дать однозначный ответ на поставленный в эксперименте вопрос (например, выдерживает ли ПС режим по прочности, наполняемости, устойчивости и т. д.) и принять единственно правильное решение по комплексу дальнейших мероприятий (связанных с вопросами проектирования, подготовки и проведения дальнейших исследований).

Ниже рассматривается ряд методов разноуровневой оценки информативной содержательности результатов летного эксперимента.

В самом простейшем случае информативную содержательность эксперимента в первом приближении количественно можно оценить коэффициентом, равным отношению объема полученной в эксперименте информации к запланированному объему. Обработка первичной информации, полученной в эксперименте, и анализ ее результатов позволяют с определенной степенью надежности сделать вывод о характере протекания исследуемого процесса и выбрать правильные направления дальнейших исследований. Нехватка первичной информации может не дать такой возможности.

Пусть, например, исследуется закон распределения перепада давления по куполу парашюта, на поверхности которого установлено $N = 50$ датчиков перепада давления. Пусть после эксперимента установлено, что на $n = 6$ датчиках информация оказалась потерянной. Тогда статистическая оценка критерия информативности эксперимента:

$$I = \frac{N - n}{N} = \frac{50 - 6}{50} = \frac{44}{50} = 0,88. \text{ Чем больше эта величина, тем более информативно содержательным, в первом приближении, считается эксперимент. Отметим, что даже частичная потеря инфор-}$$

мации в летном эксперименте может не позволить принять правильное решение по результатам эксперимента, и потребуются проводить, как минимум, еще один, что приведет к дополнительным затратам времени и средств.

Рассмотренный выше пример и аналогичные ему — это лишь самый нижний уровень в иерархической структуре информативной содержательности летного эксперимента. Следующий над ним, более высокий уровень в иерархической структуре информативной содержательности летного эксперимента может быть связан с вероятностным подходом к проблеме.

Информативную содержательность эксперимента количественно можно также измерить вероятностью получения четкого однозначного ответа на поставленный экспериментатором вопрос, что позволяет принять единственно правильное решение по выбору направлений дальнейших исследований. Это требует применения методов теории вероятностей, математической статистически и оценки надежности.

Пусть, например, исследуется процесс функционирования трехкупольной связки ПС с целью оценки неперевышения заданного техническим заданием среднего значения посадочной скорости в конкретных условиях данного посадочного полигона. Тогда вероятность отказа $P(A)$ (превышения посадочной скорости) можно оценить по формуле полной вероятности [5—8]:

$$P(A) = P(B_1)P\left(\frac{A}{B_1}\right) + P(B_2)P\left(\frac{A}{B_2}\right) + P(B_3)P\left(\frac{A}{B_3}\right),$$

где A — отказ (превышение посадочной скорости);

B_1 — потеря несущей способности парашютов (потеря прочности);

B_2 — ненаполнение (или частичное наполнение) куполов связки;

B_3 — отказ системы по функционированию (зацепы, захваты, залипания, несрабатывание пирозлов, нерасчетка блоков и др.).

Здесь все полные $P(B_i)$ и соответствующие им

условные $P\left(\frac{A}{B_i}\right)$ вероятности берутся по данным статистики ближайших аналогов или по результатам математического статистического моделирования реального процесса.

Если расчетное значение вероятности отказа $P(A)$ превышает заранее определенное критичес-

кое значение (например, на этапе исследовательских или предварительных испытаний), то мы получаем информацию, которая позволяет априори принять правильные решения по выбору направления дальнейших исследований (конкретных доработок материальной части) с целью снижения вероятности отказа и только после этого выйти на новый летный эксперимент.

Пусть, например, по результатам математического моделирования и данным статистики ближайших аналогов удалось получить:

$$P(B_1) = 0,2; P(B_2) = 0,5; P(B_3) = 0,3;$$

$$P\left(\frac{A}{B_1}\right) = 0,8; P\left(\frac{A}{B_2}\right) = 0,3; P\left(\frac{A}{B_3}\right) = 0,5.$$

Пусть за уровень критического значения принята величина $P(A)_{кр} = 0,3$. Тогда, расчетное значение вероятности отказа $P(A)$:

$$P(A) = 0,2 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,5 = \\ = 0,16 + 0,15 + 0,15 = 0,46.$$

Здесь $P(A) > P(A)_{кр}$, что достаточно информативно, и поэтому принимается решение о необходимости конкретных доработок материальной части с целью снижения вероятности отказа. Естественно, что на этапе государственных испытаний величина $P(A)_{кр}$ должна быть выбрана существенно ниже.

Условная вероятность $P\left(\frac{B_i}{A}\right)$ того, что причиной отказа может стать один из рассмотренных случаев B_i , можно рассчитать по формуле Байеса:

$$P\left(\frac{B_i}{A}\right) = \frac{P(B_i)P\left(\frac{A}{B_i}\right)}{P(A)}.$$

Далее необходимо выбрать наибольшее из этих значений и сконцентрировать усилия в первую очередь именно на устранении недостатков, связанных с возможным появлением события B_i .

Рассчитаем эти условные вероятности для всех трех случаев:

— отказ по причине потери несущей способности парашютов (потеря прочности):

$$P\left(\frac{B_1}{A}\right) = \frac{P(B_1)P\left(\frac{A}{B_1}\right)}{P(A)} = \frac{0,2 \cdot 0,8}{0,46} \approx 0,348;$$

– отказ по причине ненаполнения (или частичного наполнения) куполов связки:

$$P\left(\frac{B_2}{A}\right) = \frac{P(B_2)P\left(\frac{A}{B_2}\right)}{P(A)} = \frac{0,5 \cdot 0,3}{0,46} \approx 0,326;$$

– отказ по функционированию:

$$P\left(\frac{B_3}{A}\right) = \frac{P(B_3)P\left(\frac{A}{B_3}\right)}{P(A)} = \frac{0,3 \cdot 0,5}{0,46} \approx 0,326.$$

Из расчетов следует, что отказ по причине потери несущей способности парашютов имеет наибольшую величину условной вероятности по Байесу, и поэтому в первую очередь необходимо сконцентрировать усилия именно на устранении недостатков, связанных с возможным появлением события B_1 .

Как видим, вероятностный подход достаточно информативен в смысле принятия решений по проведению необходимых в дальнейшем мероприятий.

Следующий, более высокий уровень в иерархической структуре информативной содержательности летного эксперимента может быть связан с количественной оценкой информации, так, как это делается в теории информации и кодирования.

Пусть, например, конструктор рассматривает N возможных вариантов несущественно отличающихся друг от друга разработанных им однотипных конструкций для решения задачи десантирования специфического объекта, с целью отбора наиболее приемлемого варианта конструкции парашюта. Тогда количество информации I в битах, которое должен получить испытатель для выбора одного из этих вариантов в самом удачном случае (при всех зачетных экспериментах), может быть оценено по формуле Хартли [9–12]:

$$I = \log_2 N.$$

На практике это можно осуществить так. Проводится первый эксперимент — десантируются сразу все N возможных вариантов разработанных конструкций с объектами данного типа из одного носителя. По данным анализа бортовой изме-

рительной аппаратуры (а также видеоаппаратуры), установленной на десантируемых объектах, данных ведомостей дефектации ПС, отбраковываются наименее перспективные (худшие по характеристикам) $n = N/2$ (при четном числе N) или $n = (N-1)/2$ (при нечетном числе N) вариантов конструкций. При этом испытатель получает информацию о качестве конструкций ПС (объектов испытаний) ровно в 1 бит. Далее изложенный выше процесс дихотомии (половинного деления) повторяется до тех пор, пока не останутся два варианта конструкций, из которых выбирается только один, наилучший.

Так, например, при $N = 8$ по формуле Хартли испытатель для ответа на вопрос о наилучшем варианте конструкции должен получить для выбора одного из восьми вариантов: $I = \log_2 8 = 3$ бита информации. То есть носитель при этом должен совершить три полета на сбрасывание объектов десантирования.

Это максимальное количество информации, которое получит испытатель при минимально возможном числе испытаний, при условии, что все эксперименты зачетные. Преимущество представленного метода еще и в том, что наилучший образец максимально участвует в эксперименте, чем дополнительно подтверждается уровень его надежности.

Правда, в рассмотренном выше случае необходимо постараться минимизировать шум ошибок летного эксперимента. В случае, если по каким-либо причинам (ошибки в подготовке, укладка, монтаж и др.) ряд экспериментов окажется незачетным, число полетов на сбрасывание возрастет, возрастут финансовые и временные издержки, а испытатель получит меньшее количество информации при выборе оптимального варианта конструкции. Здесь важно условие равновероятности при выборе одного из вариантов конструкции, т.е. если априори нельзя сразу сказать какой из предложенных конструктором вариантов будет наилучшим (оптимальным по комплексу рассматриваемых характеристик).

Формула Хартли работает в случае, когда необходимо получить количество информации в битах при выборе одного из N равновероятных вариантов.

Если априори уже известно, что предложенные варианты не равновероятны (например, конструкции разных типов: осесимметричные, планирующие однооболочковые, планирующие двухоболоч-

ковые и др.), и примерно известны вероятности исходов при выборе конструкции, то здесь для определения количества полученной информации можно использовать формулу К. Шеннона.

Формула Шеннона дает количество информации в битах при выборе одного из N неравновероятных вариантов [9–12]:

$$I = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 \frac{1}{p_i},$$

где N — число возможных исходов испытания; p_i — вероятности этих исходов.

Сравнивая формулы Хартли и Шеннона, видим, что формула Хартли дает максимальное количество информации в битах при выборе одного из N вариантов, при условии, что все они равновероятны. Формула же Шеннона дает количество информации в битах при выборе одного из N неравновероятных вариантов. Причем формула Хартли — это просто частный случай формулы Шеннона при отсутствии шума случайных ошибок.

Рассмотрим еще пример на применение формулы Шеннона.

Пусть, например, проводится летный эксперимент по оценке наполняемости купола парашюта. Возможны два исхода ($N = 2$) с различными вероятностями:

— купол наполнился (вероятность появления этого события p);

— купол не наполнился (вероятность появления этого события $(1 - p)$).

Используя формулу К. Шеннона, выясним, сколько информации (в битах) может содержаться в ответе на вопрос с двумя возможными исходами («да» или «нет»):

$$I = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = p \log_2 \frac{1}{p} + (1 - p) \log_2 \frac{1}{1 - p}. \quad (1)$$

График зависимости $I = f(p)$ имеет один максимум $I = 1$ при $p = \frac{1}{2}$, т. е. когда исходы «да» и «нет» равновероятны. Это значит, что максимум информации от эксперимента можно получить, если заранее искусственно довести купол до границы наполняемости (например, перевязкой или закруткой строп, применением конструктивной проницаемости) так, чтобы исходы «наполнился» или «не наполнился» (или до границы потери прочности: «разрушился» или «не разрушился») стали равновероятными. Максимизация инфор-

мативной содержательности каждого эксперимента позволяет минимизировать сроки и затраты на проведение испытаний по программе в целом.

Далее пусть, например, проводится летный эксперимент по оценке прочности новой конструкции парашюта на предельных эксплуатационных режимах.

Возможны $N = 3$ исходов с различными вероятностями:

— парашют полностью потерял свою несущую способность в результате разрушения ряда своих элементов (p_1);

— парашют не потерял своей несущей способности, а в элементах конструкции отсутствуют проявления видимых повреждений (p_2);

— парашют не потерял своей несущей способности, однако в элементах конструкции присутствуют видимые проявления повреждений (p_3).

Тогда количество информации, получаемой от летного эксперимента, в данном случае можно рассчитать по формуле

$$I = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = p_1 \log_2 \frac{1}{p_1} + p_2 \log_2 \frac{1}{p_2} + p_3 \log_2 \frac{1}{p_3},$$

причем $\sum_{i=1}^N p_i = 1$, так как мы имеем дело с полной группой событий.

Пусть по данным статистики ближайших аналогов: $p_1 = 0,1$; $p_2 = 0,6$; $p_3 = 0,3$. Тогда по последней формуле получим

$$\begin{aligned} I &= p_1 \log_2 \frac{1}{p_1} + p_2 \log_2 \frac{1}{p_2} + p_3 \log_2 \frac{1}{p_3} = \\ &= 0,1 \log_2 10 + 0,6 \log_2 (10 / 6) + 0,3 \log_2 (10 / 3) = \\ &= 0,1 \cdot 3,322 + 0,6 \cdot 0,737 + 0,3 \cdot 1,737 = \\ &= 0,3322 + 0,4422 + 0,5211 = 1,2957. \end{aligned}$$

То есть количество информации составляет $I = 1,2957$ бита.

Результаты расчетов позволяют выполнять сравнительный анализ информативной содержательности экспериментов с различными конструкциями парашютов. Чем больше количество информации I , полученной от предыдущего летного эксперимента, тем с большей степенью уверенности можно сделать заключение о работоспособности конструкции парашюта в данных условиях и, таким образом, априори выбрать лучшую из представленных на испытания конструкция по критерию I .

В ряде случаев информативность эксперимента априори (до эксперимента) можно измерить величиной отношения формул Шеннона и Хартли:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \log_2 \frac{1}{p_i}}{\log_2 N}.$$

Обычно $0 \leq IS \leq 1$.

Информативную содержательность эксперимента можно также определить (в соответствии со статистической теорией информации К. Шеннона) как количество информации в битах [9–12]:

$$I = \log_2 \frac{p_1}{p_0},$$

где p_0 – вероятность достижения цели до получения информации; p_1 – вероятность достижения цели после получения информации.

Чем больше отношение $\frac{p_1}{p_0}$, тем больше информации мы получаем от эксперимента. В свою очередь, вероятности p_0 и p_1 можно получить путем математического (статистического) моделирования, т.е. исследуя адекватные рассматриваемым процессам математические модели.

Пусть, например, до эксперимента $p_0 = 0,1$, а после проведения летного эксперимента и получения новой, дополнительной информации путем статистического моделирования получено значение $p_1 = 0,8$. Тогда $\frac{p_1}{p_0} = 8$ и $I = \log_2 8 = 3$ бита. То есть

за один эксперимент получено 3 бита информации, что показывает: проведенный летный эксперимент оказался достаточно информативным для принятия последующего решения.

Получение максимально возможного объема достоверной информации в летных испытаниях парашютных систем является одной из первоочередных задач при подготовке и проведении летного эксперимента, поскольку позволяет выбрать оптимальный по комплексу критериев вариант конструкции, существенно сократить финансовые, материальные и, самое главное, временные затраты на получение достоверной информации о парашютных системах в летных испытаниях систем объект-парашют.

Следующий, более высокий уровень в иерархической структуре информативной содержательности летного эксперимента, связан с количественной оценкой информации с учетом помех в канале связи.

Летный экспериментотягчен шумом случайных ошибок, – помех, обусловленных целым рядом случайных факторов, например разбросом параметров атмосферы, атмосферной турбулентностью в зоне десантирования, мощным спутным следом за летательным аппаратом-носителем, спутным следом за десантируемым объектом, нестабильностью характеристик самой аэроупругой конструкции парашюта и т.д. Все это приводит к тому, что все измеряемые и наблюдаемые характеристики и параметры в системе объект-парашют являются случайными величинами. В этой связи при передаче информации неизбежны ее потери.

Пусть на вход канала связи (системы датчиков, регистрирующих параметры системы объект-парашют в летном эксперименте) поступает случайная дискретная величина ξ , значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ которой реализуются с вероятностями $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$. Пусть на выходе, в результате воздействия помех, мы получаем случайную величину η , значения $y_1, y_2, y_3, \dots, y_M$ которой реализуются с вероятностями $q_1, q_2, q_3, \dots, q_M$. Пусть $P_i(j)$ – вероятность наблюдения на выходе значения $\eta = y_j$ при условии, что на вход подано значение $\xi = x_i$. Вероятность $P_i(j)$ определяется помехами в канале связи. В теории информации показано, что количество информации о случайной величине ξ , получаемое при наблюдении за случайной величиной η , выражается зависимостью

$$I_{\eta}(\xi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_i(j) p_i \log_2 \frac{P_i(j)}{q_j}.$$

Здесь информация I выражается через вероятности двух видов: p_i и q_j , отражающих вероятностную природу информации, которая, соответственно, подается на вход канала связи и принимается на его выходе; вероятность $P_i(j)$ отражает случайный характер помех в канале связи.

Последняя зависимость может быть положена в основу разработки перспективных статисти-

ческих математических моделей, которые могут быть использованы при анализе влияния шума ошибок на информативную содержательность летного эксперимента. Эта задача на сегодня является крайне важной и актуальной.

Отметим, что последняя формула при отсутствии помех переходит в формулу Шеннона.

Существуют различные способы борьбы с помехами в каналах связи. Конечно, прежде всего желательно максимально снижать уровень помех и максимально повышать уровень полезного сигнала в канале связи, т.е. увеличивать соотношение сигнал/шум и повышать помехоустойчивость передаваемой информации. Особое место в борьбе с помехами занимает фильтрация информации, принимаемой на выходе канала связи.

Эти вопросы важно сегодня уже исследовать и изучать для решения задач повышения информативной содержательности летного эксперимента с системой объект-парашют.

В ряде случаев ставится вопрос о ценности и важности получаемой информации для принятия правильных решений по результатам летных испытаний парашютных систем. В задачах математического моделирования процессов функционирования систем объект-парашют эта проблема решается введением экспертом так называемых весовых коэффициентов, повышающих уровень значимости и выполняющих искусственную ранжировку исследуемых параметров, образующих определенную иерархическую структуру.

На практике высокие уровни ценности и важности полученной точной и достоверной информации, позволяют существенно повысить информативную содержательность эксперимента и уменьшить общее время летных испытаний.

Получение достаточного объема достоверной информации от летного эксперимента позволяет уже непосредственно перейти к следующему важному этапу – принятию решений по результатам летных испытаний ПС.

Схема процесса принятия решений

В общем случае оптимальный вариант типовой структурной схемы процесса принятия решений по результатам информативно-содержательных экспериментов, как показала практика проведения операций летных испытаний ПС, может быть представлен в следующем виде [1, 13]:

1. Предварительная формулировка проблемы. Постановка задачи ЛИ в первом приближении.

2. Определение целей операции и выбор критериев оптимальности.

3. Выявление и формулировка условий-ограничений.

4. Составление возможно более полного списка альтернатив и их предварительный анализ с целью исключения явно неэффективных.

5. Сбор и обработка ретроспективной информации. Прогнозирование изменения параметров операции в будущем.

6. Точная формулировка проблемы. Четкая постановка задачи.

7. Разработка математической модели операции, позволяющей оценивать эффективность каждой альтернативы.

8. Анализ и выбор метода решения задачи. Разработка блок-схемы алгоритма метода решения. Синтез решения задачи.

9. Оценка оставшихся альтернатив с целью отбора наиболее эффективных.

10. Принятие решения ответственным руководителем о проведении операции и выполнение решения (проведение операции).

11. Анализ результатов операции и переход, при необходимости, к следующей реализации или итерации, улучшающей предыдущую.

Таким образом, в общем случае процесс принятия решений является сложной итеративной циклической процедурой, непрерывно улучшающейся с каждой последующей итерацией. Количество итераций к моменту достижения цели исследований может быть различным и зависит от уровня квалификации руководителя операции и его ведущих специалистов, от накопленной к этому моменту базы знаний по исследуемой проблеме. Отметим, что уровень квалификации руководителя операции в первом приближении может быть определен количественно, как величина, обратная количеству итераций к моменту достижения цели. Чем меньше количество итераций, тем выше профессиональный уровень руководителя операции и его команды.

В частных, простейших случаях анализ результатов оперативной обработки данных летных испытаний может сразу же давать ответы на поставленные вопросы и, таким образом, определять направления дальнейших исследований или мероприятий. Например, задержки в процессе наполнения купола парашюта, а также повышенное значение посадочной скорости дают непосредственно информацию о необходимости уменьшения воздухопроницаемости, а также изменений в конструктивном оформлении кромки купола, в изменении ее жесткости, изменении расположения пояса рифления и др. Частичное поврежде-

ние элементов конструкции парашюта ожогового характера дает информацию о характере взаимодействия парашюта с упаковкой при вытягивании парашюта и о направлении требуемых изменений в укладке и креплениях парашюта в упаковке. Повреждение элементов конструкции парашюта динамического характера (выбивание ткани основы купола, разрушение строп) дает информацию о характере наполнения и местах перенапряжения купола и строп, значительных импульсных динамических нагрузках при его наполнении. Это требует принятия решений либо о перераспределении силовых элементов в конструкции купола и, таким образом, уменьшении числа концентраторов напряжений, либо о дополнительном усилении конструкции в определенных ее участках, либо о необходимости использования конструктивной воздухопроницаемости в определенных зонах купола. Неудовлетворительная маятниковая устойчивость системы объект-парашют свидетельствует о необходимости увеличения воздухопроницаемости купола, а также о возможном переоформлении конструкции кромки [14—20].

Важным вопросом в процессе анализа характера разрушений парашюта при отсутствии видеосъемки, по данным ведомостей дефектации, является установление картины динамики процесса разрушения, т. е. определение местоположения точки возникновения концентратора начала, от которого пошел процесс лавинообразных разрушений, и положений конечных точек останова процесса. Это в ряде случаев дает достаточный объем информации для оценки недостатков конструкции и позволяет принять правильные решения по эффективным мерам к их устранению.

В указанных выше частных случаях принятие решений по комплексу необходимых мероприятий непосредственно вытекает из достаточного объема полученной информации.

Однако возможны ситуации, когда шум случайных ошибок маскирует полученный результат и процесс принятия окончательных решений по комплексу мероприятий, требуемых для устранения недостатка, уже не является таким простым. В этих случаях требуется проведение серии специальным образом поставленных испытаний и тщательная статистическая обработка полученных материалов и результатов испытаний. Кроме того, здесь большую помощь могут оказать результаты моделирования процессов обработки информации, т.е. использование рассмотренной выше зависимости $I_{\eta}(\xi)$.

Информативная содержательность результатов такой серии будет существенно выше, чем у одиночного эксперимента и, как правило, позволит принять правильные решения по полному, достаточному комплексу необходимых мероприятий.

Выводы

Информативность результатов летного эксперимента в летных испытаниях парашютных систем имеет принципиально важное значение для процессов принятия решений по направлениям дальнейших исследований, поскольку от нее существенно зависят как сроки, так и стоимость испытаний.

Разработка и применение вероятностных, а также математических моделей для ЛИ ПС, основанных на формулах Шеннона, может позволить так организовать испытания, чтобы получать максимальное количество информации, при минимально возможном (или заданном) числе испытаний (конечно, при условии, что все эксперименты зачетные). А это уже предъявляет повышенные требования к качеству и уровню как разрабатываемых программ, так и методик летных исследований и испытаний, т.е. и к уровню подготовки ведущих специалистов.

Получение количественных характеристик информативной содержательности летного эксперимента по оценке качества парашютных систем позволяет сравнивать различные методики, способы и правила получения информации от летных испытаний ПС с целью отбора и использования в дальнейшем лучших из них.

К сожалению, на сегодня разработка и применение вероятностных, а также математических моделей для моделирования ЛИ ПС — мало исследованная область в отрасли парашютостроения, и требуется концентрация усилий ученых и испытателей в парашютной отрасли для решения первоочередных задач.

Библиографический список

1. *Иванов П.И.* Методы летных испытаний и исследований парашютных систем и парапланерных летательных аппаратов: Дисс. ... д-ра техн. наук. — Феодосия, 2003. — 333 с.
2. *Иванов П.И.* Летные испытания парашютных систем. — Феодосия: Гранд—С, 2001. — 332 с.
3. *Миронов А.Д., Лапин А.А., Меерович Г.Ш., Зайцев Ю.И.* Задачи и структура летных испытаний самолетов и вертолетов. — М.: Машиностроение, 1982. — 144 с.
4. *Ногин В.Д., Протодьяконов И.О., Евлампиев И.И.* Основы теории оптимизации: Учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1986. — 384 с.

5. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Задачи и упражнения по теории вероятностей. — М.: Высшая школа, 2000. — 365 с.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: Учебник для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999. — 576 с.
7. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология: Учеб. пособие. — 3-е изд., стер. — М.: Дрофа, 2004. — 206 с.
8. *Шалыгин А.С., Палагин Ю.Н.* Прикладные методы статистического моделирования. — Л.: Машиностроение, 1986. — 320 с.
9. *Глушков В.М.* (отв. ред.) Энциклопедия кибернетики: В 2 т. — Киев: Укр. сов. энциклопедия, 1974. — (608 + 620) с.
10. *Тарасов Л.В.* Мир, построенный на вероятности: Книга для учащихся. — М.: Просвещение, 1984. — 201 с.
11. *Тэйлор Дж.* Введение в теорию ошибок / Пер. с англ. П.Г. Деденко. — М.: Мир, 1985. — 272 с.
12. *Игнатов В.А.* Теория информации и передачи сигналов: Учебник для вузов. — М.: Советское радио, 1979. — 279 с.
13. *Саркисян С.А., Каспин В.Я., Лисичкин В.А.* и др. Теория прогнозирования и принятия решений. — М.: Высшая школа, 1977. — 352 с.
14. *Голованов Л.В., Саркисян С.А.* Прогнозирование развития больших систем. — М.: Статистика, 1975. — 192 с.
15. *Саркисян С.А.* Современные методы научно-технического прогнозирования // Экономическая эффективность авиационной техники: Сб. статей. М.: Машиностроение, 1974. С. 3-11.
16. *Чуркин В.М.* Устойчивость и колебания парашютных систем. — М.: URSS, 2018. — 230 с.
17. *Чуркин В.М.* Динамика парашютных систем на этапе спуска. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. — 184 с.
18. *Чуркин В.М., Серничева Е.В., Силантьев В.М.* К оценке влияния аэродинамики груза на свободные колебания парашютной системы // Труды МАИ. 2003. №12. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34455>
19. *Морозов В.И., Пономарев А.Т., Животов Н.П., Морозов А.А.* Парашютно-реактивные системы. Состояние и перспективы развития // Полёт. 2000. № 11. С. 27-37.
20. *Чуркин В.М., Чуркина Т.Ю.* К анализу свободных колебаний парашютной системы с упругими стропами // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 3. С. 143-148.

EXPERIMENT INFORMATIVITY IN FLIGHT TESTS OF PARACHUTE SYSTEMS. DECISION MAKING

Ivanov P.I.* , Krivorotov M.M. , Kurinnyi S.M.*****

*Research Institute of Aeroelastic Systems,
85, Garnaeva str., Feodosia, Crimea Republic, 298112, Russia*

* e-mail: Ivanovpetr@rambler.ru

** e-mail: Krivorotovmm@mail.ru

*** e-mail: Kurinniys@yandex.ru

Abstract

The presented article deals with the quantitative assessment of the flight experiment informativity content in the course of flight tests, and the issues of decision-making by the results of parachute systems (PS) tests. It states the main goal and objectives of the PS flight tests. High-grade and effective solution of the main tasks of the PS flight tests necessarily requires high level of the flight experiment results informativity. The article considers in detail the flight experiment informativity as the local criterion for the experiment effectiveness evaluating. The concept of informativity includes the quantity and quality of results; informative content sufficient for making a competent (correct) decision when determining the purpose of further

research; the methodology correctness for organizing (preparing and conducting) a flight experiment. The authors formulated the concept of informative content of the experiment. The article considers a number of methods for various-level evaluation of the informative content of the flight experiment results. In the most simplest case, i.e. at the lowest level of the hierarchy, the informative content of the experiment is being quantified by a coefficient equal to the ratio of the volume of information obtained in the experiment to the planned volume. The next higher level in the hierarchical structure of the informative content of the flight experiment is associated with probabilistic approach to the problem. The informative content of

the experiment can also be quantified by the probability of obtaining an unequivocal answer to the question posed by the experimenter, which allows making the only correct decision on further research trends selection. The next much higher level in the hierarchy structure of the flight experiment information content is associated with the quantitative assessment of the information by the Hartley, Shannon formulas as is being done in information theory and coding, as without regard and with account for the jamming impact. Obtaining sufficient amount of reliable information from the flight experiment allows directly proceed to the next important stage, namely making a decision on the results of the PS flight tests. The article presents the optimal variant of a decision-making process typical block diagram based on the results of informative content experiments. The flight experiment results of the PS flight tests is of fundamental importance for the decision-making processes on the further research trends, since both testing terms and their cost significantly depend on it.

Keywords: flight experiment goals and objectives, parachute systems flight tests, informative meaningfulness of experiment; decision-making structure.

References

- Ivanov P.I. *Metody letnykh ispytaniy i issledovaniy parashyutnykh sistem i paraplanermykh letatel'nykh apparatov* (Methods of flight tests and studies of parachute systems and paragliding aircraft). Doctor's thesis, Feodosiya, Natsional'nyi aviatsionnyi universitet, 2003, 333 p.
- Ivanov P.I. *Letnye ispytaniya parashyutnykh sistem* (Parachute systems flight tests), Feodosiya, Grand-S, 2001, 332 p.
- Mironov A.D., Lapin A.A., Meerovich G.Sh., Zaitsev Yu.I. *Zadachi i struktura letnykh ispytaniy samoletov i vertoletov* (Flight tests problems and structure of aircraft and helicopters), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 144 p.
- Nogin V.D., Protod'yakonov I.O., Evlampiev I.I. *Osnovy teorii optimizatsii* (Fundamentals of optimization theory), Moscow, Vysshaya shkola, 1986, 384 p.
- Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Zadachi i uprazhneniya po teorii veroyatnosti* (Problems and exercises in probability theory), Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 365 p.
- Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnosti* (Probability theory), Moscow, Vysshaya shkola, 1999, 576 p.
- Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya* (Operations research: problems, principles, methodology), Moscow, Drofa, 2004, 206 p.
- Shalygin A.S., Palagin Yu.N. *Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniya* (Applied methods of statistical modeling), Leningrad, Mashinostroenie, 1986, 320 p.
- Glushkov V.M. (ed) *Entsiklopediya kibernetiki. V 2 t.* (Encyclopedia of Cybernetics. In 2 vols), Kiev, Glavnaya redaktsiya USE, 1974, (608 + 620) p.
- Tarasov L.V. *Mir, postroennyi na veroyatnosti* (World built on probability), Moscow, Prosveshchenie, 1984, 201 p.
- Taylor J.R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books. 2nd edition, 1996, 327 p.
- Sarkisyan S.A., Kaspin V.Ya., Lisichkin V.A. et al. *Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya reshenii* (Theory of forecasting and decision-making), Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 352 p.
- Golovanov L.V., Sarkisyan S.A. *Prognozirovanie razvitiya bol'shikh sistem* (Forecasting of large systems development), Moscow, Statistika, 1975, 192 p.
- Sarkisyan S.A. *Ekonomicheskaya effektivnost' aviatsionnoi tekhniki*, Moscow, Mashinostroenie, 1974, pp. 3-11.
- Churkin V.M. *Ustoichivost' i kolebaniya parashyutnykh sistem* (Stability and oscillations of parachute systems), Moscow, URSS, 2018, 230 p.
- Churkin V.M. *Dinamika parashyutnykh sistem na etape spуска* (Parachute systems dynamics at the descent stage), Moscow, MAI-PRINT, 2008, 184 p.
- Churkin V.M., Serpicheva E.V., Silantiev V.M. *Trudy MAI*, 2003, no. 12. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34455>
- Morozov V.I., Ponomarev A.T., Zhivotov N.P., Morozov A.A. *Polet*, 2000, no. 11, pp. 27-37.
- Churkin V.M., Churkina T.Yu. The Analysis of free oscillations parachute Systems with elastic line. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 143-148.