

УДК 621.18.08, 621.311.22

О. А. Аксюта, О. А. Беляев, Г. И. Константинов, В. О. Сидорук

КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Оценку погрешностей измерений при проведении летных испытаний ракет-носителей обычно проводят путем учета помех и неопределенностей в измерительном тракте системы измерений. Формальное использование такого подхода может привести к непредсказуемым последствиям. Более надежную оценку погрешностей измерений можно получить рассматривая процесс измерений как процедуру последовательно выполняемых работ по проектированию, изготовлению, испытаниям системы измерений и ракеты в целом, включая измерения и их обработку при послеполетном анализе всей полученной информации. Частоты опроса основных контролируемых параметров обычно в три – десять раз превышают частотный диапазон их изменения. Таким образом, характеристики случайных составляющих погрешностей можно определить непосредственно из зарегистрированных данных. Основную неопределенность в оценку суммарной погрешности измерений рассматриваемого параметра вносят невыявленные систематические составляющие. В статье для оценки достоверности и точности измерений конкретного пуска предлагается уточнять априорные данные о составляющих погрешностях измерений, определяемых непосредственно в процессе подготовки и проведения пуска. Рассмотрены основные схемы построения алгоритмов оценки достоверности и точности измерений при известных математических моделях формирования измеряемых параметров и практически важный случай, когда существует статистическая взаимосвязь между измеряемыми параметрами.

Ключевые слова: летные испытания, датчик, погрешность измерений, математическая модель.

Оцінку похибок вимірювань під час проведення льотних випробувань ракет-носіїв як правило проводять шляхом врахування перешкод і невизначеностей у вимірювальному тракті системи вимірювань. Формальне використання такого підходу може призвести до непередбачуваних наслідків. Надійнішу оцінку похибок вимірювань можна одержати розглядаючи процес вимірювань як процедуру послідовно виконуваних робіт з проектування, виготовлення, випробування системи вимірювань і ракети в цілому, включаючи вимірювання та їх оброблення під час післяпольотного аналізу всієї одержаної інформації. Частоти опитування основних контрольованих параметрів як правило у три – десять разів перевищують частотний діапазон їх зміни. Отже, характеристики випадкових складових похибок можна визначити безпосередньо із зареєстрованих даних. Основну невизначеність в оцінку сумарної похибки вимірювань розглядуваного параметра вносять невыявлені систематичні складові. У статті для оцінювання достовірності і точності вимірювань конкретного пуску пропонується уточнювати априорні дані про складові похибок вимірювань, що визначаються безпосередньо у процесі підготування та проведення пуску. Розглянуто основні схеми побудови алгоритмів оцінки достовірності і точності вимірювань за відомих математичних моделей формування вимірюваних параметрів і практично важливий випадок, коли існує статистичний взаємозв'язок між вимірюваними параметрами.

Ключові слова: льотні випробування, датчик, похибка вимірювань, математична модель.

The measurement errors upon conducting flight tests for launch vehicles are evaluated by considering the interferences and uncertainties in the measurement system procedure. Formal use of this approach can lead to unpredictable consequences. More reliable evaluation of errors upon conducted measurements can be achieved if the measurement process is regarded as a procedure of successive activities for designing, manufacturing, and testing the measurement system and the rocket including measurements and their processing during the after-flight analysis of the received data. The sampling rates of the main controlled parameters are three to ten times higher than the frequency range of their changing. Therefore, it is possible to determine the characteristics of the random error components directly on the basis of registered data. The unrevealed systematic components create the basic uncertainty in the evaluation of the examined parameter's total measurement error. To evaluate the precision and measurement accuracy of a particular launch, the article suggests specifying the preliminary data on measurement error components determined during prelaunch processing and launch. Basic structures of algorithms for evaluation of precision and measurement accuracy for certain mathematical models that form the measured parameters were considered along with the practical case when static correlation existed among the measured parameters.

Keywords: flight tests, sensor, measurement error, mathematical model.

Введение

Телеметрические измерения при летных испытаниях (ЛИ) ракет-носителей (РН) проводятся путем преобразования измеряемых параметров в электрические величины (ток, напряжение и т. д.), нормирования, дискретизации потока сигналов, передачи их по каналу связи, приема переданных сигналов на наземные станции, декоммутации, дешифровки сигналов и представления зарегистрированной информации в виде физических величин для проведения анализа, определения характеристик и условий работы систем и агрегатов, систематизации и архивации информации. Общая схема преобразования сигналов при ЛИ представлена на рис. 1.

Вся полученная по результатам пуска информация должна быть представлена для анализа и оценки ее точности. Результаты конкретного пуска изменить нельзя, каждый пуск является уникальным, можно лишь принять меры по усовершенствованию системы измерений (СИ) при подготовке последующих пусков. Не важно, в каком звене преобразований сигнала появилась ошибка (сбой). По результатам анализа сбоя должны быть устранены, указаны диапазоны возможных вариаций для каждого измеренного параметра или приведена ссылка на методику их определения.

Априорную оценку точности результатов измерений можно провести с использованием паспортных данных о погрешностях преобразований каждого звена в соответствии с общей структурой построения СИ, например, по рекомендациям [1].

Апостериорная оценка точности результатов измерений должна строиться на основе полученной информации, проверке ее достоверности, априорных данных и, при необходимости, уточнении всей имеющейся информации. При этом следует иметь в виду, что «нерешенных вопросов в области оценки погрешностей результатов измерений вполне достаточно. Эти трудные и неблагоприятные задачи еще ожидают энтузиастов для их решения» [1].

Методы обеспечения достоверности и точности измерений

Основной критерий, подтверждающий достоверность и точность полученных результатов измерений, – соответствие зарегистрированных результатов измерений и их возможных вариаций, обусловленных ошибками измерений, данным, которые можно получить, исследуя реальные математические модели РН и СИ.

Отметим, что, несмотря на широкое использование термина «достоверность измерений» в научно-технической, учебной литературе и даже в нормативных документах, официального его определения не существует.

Достоверность результатов измерений будем трактовать как непротиворечивость самих измерений, отсутствие ошибок в документации, при изготовлении, проведении испытаний, в алгоритмах обработки и анализа информации, соответствие результатов испытаний принятым математическим моделям измеряемых процессов с учетом влияния на работу измерительной аппаратуры реальных условий эксплуатации.

Яркие примеры такого подхода приведены в литературе, описывающей постановку физических экспериментов [2], примеры прикладных технических задач и математики – в книгах [3, 4].

С методологической точки зрения методы обеспечения достоверности и точности измерений являются общепринятыми при организации и проведении измерений любого эксперимента, но в ракетной технике они имеют свои особенности, связанные с невозможностью их повторного воспроизведения. Имея одну реализацию зарегистрированного при пуске процесса, нельзя использовать статистические методы оценки погрешностей измерений (осреднение по множеству реализаций, сравнение с эталоном и т. д.). В таком случае для получения оценок необходим комплексный подход, включающий анализ построения СИ РН, результаты специальных наземных испытаний СИ, имеющуюся априорную и апостериорную информацию (математические модели функционирования узлов РН и СИ, характерные особенности регистрируемых

процессов, их взаимосвязи и т. д.), методы, заимствованные из теорий системного анализа, случайных процессов, метрологии, теорий оценивания и идентификации.

Работы по обеспечению достоверности и точности измерений проводятся на всех стадиях «жизненного цикла» РН и СИ и включают в себя:

- постановку задач измерений, уточнение данных об объекте измерений и условиях проведения измерений, построение математических моделей объекта и физических процессов, подлежащих измерениям, выбор комплекса измеряемых параметров;
- разработку системы измерений с выбором и размещением средств измерений, частот опроса датчиков;
- разработку электрических схем подключений, выпуск документации на СИ, техническую, технологическую и метрологическую экспертизы документации на СИ и ракету;
- изготовление РН и СИ, проведение входного контроля комплектующих СИ, лабораторные, автономные, заводские испытания, испытания РН на технической (ТП) и стартовой (СП) позициях;
- проведение измерений при ЛИ, обработку и анализ результатов испытаний, выявление недостоверных показаний и оценку точности, проверку соответствия результатов испытаний условиям работы аппаратуры, принятым математическим моделям измеряемых процессов.

Каждый из перечисленных этапов проводится на основе априорных знаний и дополняет их. Апостериорная оценка точно-

сти результатов испытаний должна подтвердить корректность их выполнения. Достоверность решений, принятых на первых двух этапах, обычно подтверждается результатами анализа нескольких пусков РН, достоверность и точность выполнения последующих этапов необходимо подтверждать индивидуально для каждой РН.

Невозможно в одной статье рассмотреть все задачи, от решения которых зависят качественные и количественные характеристики результатов измерений. В частности, не затрагиваются вопросы, связанные с построением и функционированием наземной аппаратуры СИ, весь комплекс метрологических характеристик бортовой аппаратуры. Ограничимся рассмотрением нескольких задач, без решения которых невозможно получить апостериорную оценку точности полученных измерений.

Выбор комплекса измеряемых параметров

Выбор комплекса измеряемых параметров при экспериментальном исследовании любого объекта осуществляется на основе:

- допустимых погрешностей измерений и определяемых параметров;
- теорий планирования эксперимента, оценивания, идентификации и наблюдаемости;
- характеристик измеряемых процессов и условий эксплуатации;
- обеспечения заданной избыточности, надежности контроля;
- требований заказчика, ДКИ и т. д.

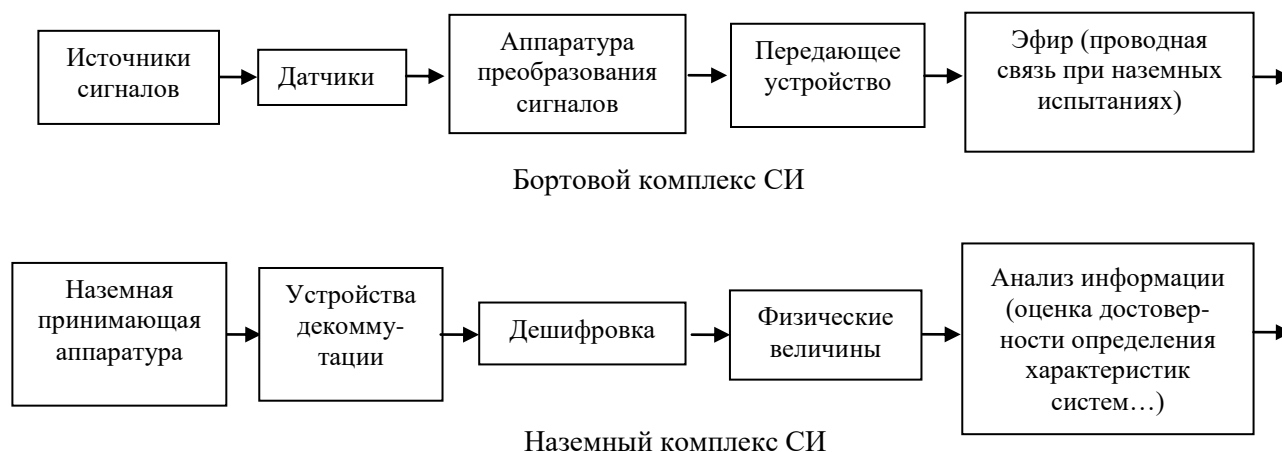


Рис. 1. Схема преобразования сигналов при ЛИ РН

Для организации измерений какого-либо процесса необходимо знать условия проведения эксперимента (температуру, давление, вибрации, параметры электромагнитного поля и т. д.), качественные и количественные характеристики измеряемых параметров (амплитудный и частотный диапазоны, переходные характеристики, временные интервалы непосредственной передачи, запоминания и т. д.). Сразу отметим, что если мы ставим перед собой задачу создания СИ, позволяющей не только провести измерения в полете, но и получить оценку точности полученных измерений, то такая СИ должна иметь некоторую избыточность.

Минимальный комплекс измеряемых параметров может быть определен следующим образом. Ракета рассматривается как совокупность систем (агрегатов), для каждой из которых известны (составляются) математические модели функционирования с учетом их взаимодействий. Достоверность моделей систем должна быть подтверждена специальными исследованиями (теоретическими, при лабораторных испытаниях и т. д.). Общим случаем описания функционирования выделенной системы являются дифференциальные уравнения. Например, вектор состояния системы (агрегата) x размерности $n \times 1$ описывается уравнением (математическая модель системы)

$$dx/dt=f(x, p)+v. \quad (1)$$

Как правило, непосредственное измерение вектора состояния системы x не представляется возможным. В системе проводятся измерения вектора выходных параметров y (математическая модель измерителей) размерности $m \times 1$

$$y=\varphi(x, p)+q. \quad (2)$$

В (1) и (2) через p обозначен вектор взаимодействия рассматриваемого агрегата с другими подсистемами; v – помехи, действующие на систему (в том числе ошибки, возникающие при вычислении вектора x с использованием ПВЭМ); q – ошибки измерений, для которых математические ожидания

$$M(v)=0; M(q)=0; M(vv')=\Psi_v(\delta(t-\tau)); \\ M(qq')=\Psi_q(\delta(t-\tau)). \quad (3)$$

При выборе комплекса измеряемых параметров системы для учета вектора взаимодействия p его также можно включить в состав вектора x , например, если $p=\text{const}$, в состав (1) включаются уравнения $dp/dt=0$.

Используя методы фильтрации для уравнений (1), (2), получим оценки для вектора состояния системы $x(t)$ [5]:

$$d\hat{x}/dt=f(\hat{x}, p)+P(\partial\varphi/\partial x)' \Psi_q^{-1} [y-\varphi(\hat{x}, p)], \\ dP/dt=\partial f/\partial x P + P(\partial f/\partial x)' - \\ - P(\partial\varphi/\partial x)' \Psi_q^{-1} (\partial\varphi/\partial x) P + \Psi_v. \quad (4)$$

Если q и v являются случайными процессами типа белого шума, то матрица $P(t)$ является ковариационной матрицей вектора. Для более общего случая уравнение для ковариационной матрицы вектора x можно записать непосредственно исходя из приведенных уравнений [6]. Вычисление текущих значений вектора состояния x и его ковариационной матрицы проводится с использованием начальных условий при $t=t_0$

$$M(x(t_0))=x_0; M(P(t_0))=P_0. \quad (5)$$

Уравнения (1) – (4) определяют функциональную зависимость между вектором состояния и его оценкой, выбранным вектором измеряемых параметров и их ковариациями. Проводя имитационное моделирование системы на возможных траекториях движения с различным составом датчиковой аппаратуры, можно выбрать минимальный комплекс измеряемых параметров, оптимизируя $\det P$ или $S_p(P)$. Этот же метод позволяет решать и ряд других задач, например оптимальное расположение измерителей на изделии, определение допустимых погрешностей измерений, и задачи с учетом отказов отдельных измерителей и т. д.

Выбранный вектор измеряемых параметров y является достаточным для наблюдения за работой агрегата, если в любой момент времени t по нему можно восстановить вектор x с заданной погрешностью.

При $m \geq n$ (избыточная система измерений) условие полной наблюдаемости системы (1), (2) выполняется, если для любой точки траектории x_i ранг матрицы Якоби

$$\text{rank}(\partial \varphi / \partial x) = n. \quad (6)$$

Следует отметить, что инженерного алгоритма, позволяющего рационально выбрать комплекс измеряемых параметров для таких сложных объектов, как РН, до сих пор не предложено. Поэтому разработчики отдельных систем РН комплекс измеряемых параметров по системам РН выбирают избыточным, что позволяет повысить достоверность и точность зарегистрированных измерений. Так, в составе большинства существующих систем управления ракет ряд наиболее важных параметров измеряется тремя датчиками, а за достоверное измерение принимается средневзвешенное значение показаний двух датчиков из трех, если показания одного из них существенно отличаются, а двух других совпадают в пределах заданных погрешностей.

Выбор датчиковой аппаратуры и частот опроса датчиков

В соответствии с выбранным комплексом измеряемых параметров подбирается аппаратура, позволяющая наиболее точно воспроизводить контролируемые физические процессы. Предпочтение отдается аппаратуре, имеющей свидетельства о метрологической аттестации (калибровке). К сожалению, даже при использовании проверенной аппаратуры в составе новой РН точность измерений необходимо подтверждать по результатам наземных и летных испытаний РН.

Для подтверждения точности важно, чтобы при наземных испытаниях отдельных узлов РН использовалась та же аппаратура, что и при летных испытаниях. Как правило, по финансовым и организационным соображениям это не всегда выполняется.

В условиях ограниченной информативности СИ РН приходится ограничивать и частоты опроса датчиков. Случай, когда высокочастотные составляющие f_e в регистрируемом процессе искажают низко-

частотные составляющие f_n полезного сигнала («мимикрия частот»), является еще одним примером необходимости оценивать погрешности с качественной и количественной сторон (значение измеренной величины, значения погрешности и ее доверительной вероятности). Этот случай подробно описан в литературе, но не всегда правильно применяется на практике из-за неучета свойств аналоговых и цифровых фильтров [7, 9].

Для анализа любых процессов стремятся использовать наиболее простые математические модели. Эти модели, как правило, описывают низкочастотные составляющие процесса f_n . Исходя из такого подхода выбирается аппаратура и необходимая частота опроса параметра. Реальный процесс может содержать и высокочастотные составляющие. Более того, он может искажаться из-за воздействия высокочастотных вибраций и электромагнитных помех. При проектировании РН мы располагаем только прогнозируемым спектром помех.

Спектр дискретизованного сигнала $X_d(f)$ в отличие от аналогового $X_a(f)$ периодичен по частоте с периодом $f_s = 1/t_s$ (t_s – интервал дискретизации по времени) и равен сумме спектров аналогового сигнала на основном интервале $(-f_s/2, f_s/2)$ и бесконечного ряда копий этого спектра

$$X_d(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s) = X(f) + \sum_{n=1}^{\infty} X(f \pm n f_s),$$

где $X(f)$ соответствует спектру аналогового сигнала.

Для случая $f_e \leq f_s/2$ копии спектров не перекрываются и при отсутствии помех возможно точное воспроизведение аналогового сигнала по его дискретной копии.

Если для верхней частоты f_e дискретизируемого аналогового сигнала выполняется неравенство $f_e > f_s/2$, то сдвинутые копии спектра накладываются друг на друга и высокочастотные составляющие сигнала, попадающие в интервалы $f_s(n \pm 1/2)$, искажают низкочастотные составляющие сигнала на основном интервале.

В [8] рассмотрены различные случаи взаимного расположения спектров полезного сигнала и помехи, для прямоугольных цифровых фильтров приведены оценки необходимых частот опроса.

Для ограничения влияния высокочастотных помех на низкочастотные составляющие полезного аналогового сигнала перед дискретизацией его необходимо пропустить через аналоговый фильтр нижних частот (ФНЧ), который часто называют противомаскировочным, или антиалиасным, и используют в качестве входного устройства аналого-цифровой преобразователь (АЦП). При этом частоту среза f_{cp} аналогового ФНЧ выбирают такой, чтобы $f_s \leq f_{cp}$. Частоту дискретизации сигнала f_s выбирают в зависимости от наклона амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) аналогового ФНЧ и необходимого ослабления эффекта наложения. Для ослабления эффекта наложения на 70 дБ и углов наклона АЧХ -48, -96, -120 дБ/окт отношения частоты дискретизации к частоте среза фильтра f_s / f_{cp} равны 3,75; 2,65; 2,5 соответственно. Для идеального нереализуемого прямоугольного фильтра получаем частоту Найквиста $f_s / f_{cp} = 2$ [9].

При наземных испытаниях невозможно воспроизвести условия полета РН. Достоверность принятых мер по ограничению частот опроса зависит от правильного учета спектров частот излучений используемой аппаратуры, агрегатов РН и вибраций в местах установки приборов СИ.

Так как спектр помех известен приближенно, проблема рационального выбора интервала дискретизации измеряемых параметров остается актуальной даже на стадии проведения летных испытаний РН.

Обеспечение точности датчиков-преобразующей аппаратуры СИ РН с длительными сроками хранения

СИ РН является штатной, поэтому практически все ее элементы устанавливают на борт в процессе изготовления ракеты на заводе. Срок изготовления и поставки необходимых комплектующих ракеты, ее сборки, проведения необходимых

испытаний, включая доставку, хранение и испытания на полигоне, обычно составляет более года. РН изготавливают с учетом интеграции ее под конкретный объект (КА и(или) разгонный блок), который необходимо вывести на орбиту. Дата запуска РН зависит от готовности разгонного блока и КА, а оптимальная календарная дата пуска существенно зависит от конкретного предназначения КА. Таким образом, с момента изготовления РН до ее запуска может пройти от 2 до 5 лет и более. При таких сроках, прошедших после изготовления и аттестации используемой на борту измерительной аппаратуры, возникают проблемы с сохранностью ее метрологических характеристик. В первую очередь это касается аналоговых датчиков и АЦП.

АЦП в СИ РН используются для группы датчиков (локальных коммутаторов). Их аттестация при наземной эксплуатации РН особой сложности не представляет, а при наличии на борту РН эталона напряжения (тока) калибровку можно провести и на этапе летного эксперимента.

Сложнее обстоит дело с аналоговыми чувствительными элементами датчиков. Прежде всего представим уравнение (2) в виде, используемом обычно для измерительной аппаратуры,

$$y_i = a_i + \varphi(x, p)b_{ii} + q_i,$$

где a_i и b_i – значения нулевого уровня и коэффициента чувствительности i -того датчика; неточность определения этих коэффициентов составляет основную часть систематической погрешности датчика.

Как правило, при длительной эксплуатации наблюдается «уход нуля» и «уход чувствительности» датчиков. Можно использовать несколько способов устранения уходов. Все они сводятся либо к заданию нескольких известных значений $\varphi(x, p)$, либо к введению эталонных сигналов в показания датчика. Для примера рассмотрим случай, когда $\varphi(x, p)$ неизвестна, а в датчике для устранения уходов схемно с помощью внешних сигналов можно осуществлять инверсию коэффициента чувствительности и изменять его на Δb , т. е. $b_i = \pm b_{ii} + \Delta b$. Тогда при $\varphi(x, p) = \text{const}$,

осредняя по времени показания датчика: y_1 (при $\Delta b=0$, $b_i = b_{li}$), y_2 (при $\Delta b \neq 0$, $b_i = b_{li}$) и y_3 (при $\Delta b=0$, $b_i = -b_{li}$),

$$y_1 = a_i + \varphi(x, p) b_{li} + q_i,$$

$$y_2 = a_i + \varphi(x, p) (b_{li} + \Delta b) + q_i,$$

$$y_3 = a_i - \varphi(x, p) b_{li} + q_i, -$$

получим

$$\varphi(x, p) = (y_2 - y_1) / \Delta b,$$

$$a_i = (y_3 + y_1) / 2, b_{li} = (y_1 - y_3) / (2\varphi(x, p)).$$

Точность определения a_i , b_{li} зависит от погрешностей задания эталонного значения Δb и используемых разрядностей бортовой и наземной аппаратуры СИ.

При проведении пневмоиспытаний РН на ТП и СП используются аттестованные наземные средства измерений. Подключая при этих испытаниях бортовые датчики давления, можно уточнить их коэффициенты a_i и b_i . Используя совместные результаты испытаний на ТП и СП, когда на датчик воздействуют две отличные друг от друга, но известные измеряемые величины, можно оценить отклонения нулевого уровня и чувствительности датчиков линейных ускорений, датчиков измерений температур и т.д. При этом потребуется, чтобы эти датчики и СИ при испытаниях на ТП и СП имели возможность «переключаться» на 16(32)-разрядные измерения при естественных ограничениях на собственные шумы используемых СИ.

Разработка электрических схем, методы борьбы с помехами

Электрические схемы (СХЭ) превращают все бортовые приборы СИ в единую бортовую систему измерений. Обеспечение достоверности и точности показаний СИ на этапе разработки СХЭ соединения приборов между собой заключается в соблюдении существующих норм, правил выполнения соединений и требований документации на приборы. В первую очередь это относится к соединению источников сигналов датчиков-преобразующей аппаратуры с системой сбора бортовой информации. Основные искажения информационных сигналов на борту РН возникают из-за наличия между цепями приборов паразит-

ных гальванических связей и(или) электромагнитных взаимодействий. Условия их возникновения физически понятны, но получить расчетным путем количественные оценки искажений сигналов с погрешностями, соизмеримыми с погрешностями СИ, невозможно из-за отсутствия корректных математических моделей процессов и неопределенности граничных условий, необходимых для решения уравнений в частных производных. Проблему борьбы с помехами в настоящее время приходится решать на основании опыта. Тем не менее ряд типовых условий возникновения помех и методов их устранения достаточно хорошо изучен и выработаны рекомендации, которых придерживаются при разработке СИ и СХЭ, в частности [10, 11]:

1. Гальваническая развязка цепей.
2. Согласование линий связи (для длинных цепей).
3. Для увеличения точности передачи каждый сигнал должен передаваться витой парой в индивидуальном экране.
4. Использование симметричного дифференциального подключения датчиков вместо однофазного.
5. Экранирование цепей. Для устранения паразитной емкостной связи и электростатических зарядов используют электростатический экран в виде проводящей трубки (чулка), охватывающей экранируемые провода, а для защиты от магнитного поля – экран из материала с высокой магнитной проницаемостью.

6. Заземление экранов сигнальных проводов со стороны источника сигнала. Если источник сигнала не заземлен (например, термопара), то заземлять экран можно с любой стороны. На высоких частотах оплетку кабеля надо заземлять не только с обеих сторон, но и в нескольких точках между ними (точки выбирают на расстоянии $1/10$ длины волны помехи одна от другой). Для качественного экранирования в широком спектре частот используют двойной экран. Внутренний экран заземляют с одной стороны, со стороны источника сигнала.

7. Сведение заземлений в общую точку, при этом аналоговую (AGND), цифровую (DGND) и силовую (GND) земли выпол-

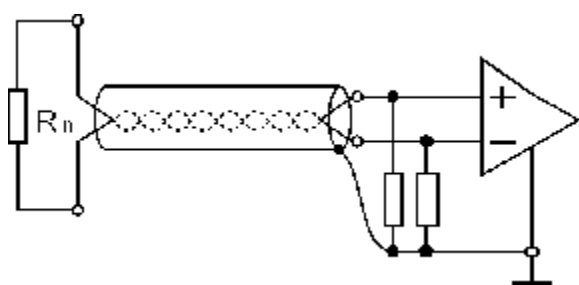
нять в виде несвязанных проводников, соединенных вместе только в одной точке.

8. Цепи заземления с большим уровнем помех должны выполняться отдельно от цепей с малым уровнем помех, а соединяться они должны только в одной общей точке.

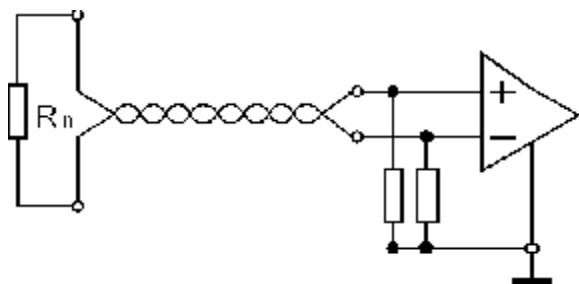
9. Точек заземления может быть несколько, если топология такой цепи не приводит к появлению участков "грязной" земли в контуре, включающем источник и приемник сигнала, а также если в цепи заземления не образуются замкнутые контуры, по которым циркулирует ток, наведенный электромагнитной помехой.

10. Особенности заземлений при высокочастотных помехах и большой длине проводников: заземление в одной точке используется на частотах до 1 МГц, свыше 10 МГц заземлять лучше в нескольких точках, в промежуточном диапазоне от 1 до 10 МГц следует использовать одноточечную схему, если наиболее длинный проводник в цепи заземления меньше $1/20$ длины волны помехи. В противном случае используется многоточечная схема.

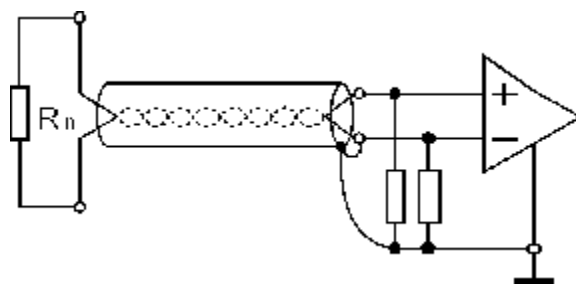
11. Применять датчики (источники сигналов), внутреннее сопротивление которых находится в диапазоне, соответствующем оптимальному для выбранного типа АЦП.



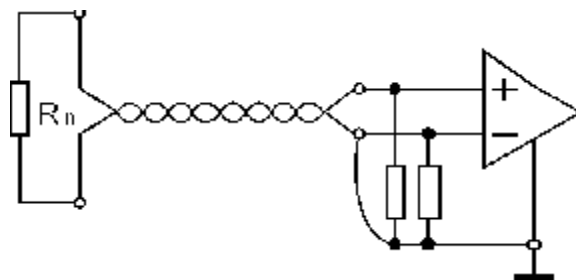
а



б



в



г

Рис. 2. Способы подключения терморезистора:
а – значение помехи 15 мкВ; б – значение помехи 61 мкВ; в – значение помехи 78 мкВ;
г – значение помехи 3584 мкВ

12. Использование на входе в АЦП аналоговых антиалиасных фильтров.

В качестве иллюстрации приведены результаты следующего эксперимента.

Сравнили различные способы подключения терморезистора с сопротивлением 20 кОм через экранированную витую пару (0,5 виток/см) длиной 3,5 м. Был использован инструментальный усилитель RL-4DA200 с системой сбора данных RL-40AI фирмы НИЛ АП. Коэффициент усиления канала усилителя был равен 390, полоса пропускания – 1кГц.

Как следует из рис. 2, отказ от экранирования усиливает помехи в 4 раза (рис. 2, б), переход к одиночному включению вместо дифференциального (рис. 2, в) усиливает помеху в 5 раз, а если еще и отказаться от экрана, то – в 230 раз (рис. 2, г). На рисунках приведены среднеквадратические значения напряжения помех в полосе частот 0,01...5 Гц, полученные на выходе приемника сигнала. Подробное описание и примеры применения способов повышения помехоустойчивости приведены в [12, 13].

Провести верификацию принятых решений по заземлению и экранированию, а также минимизировать реальные помехи в каналах измерений можно только путем

проведения специальных экспериментов в процессе автономных испытаний, изготовления и испытаний каждого собираемого узла РН (чаще всего при испытаниях первых образцов РН или внедрении новой аппаратуры в состав изделия), калибровки каждого измерительного канала СИ. Для этого следует измерить уровни помех в приемнике сигнала, датчике и соединительных кабелях и минимизировать их. Следует оценить значения случайных и систематических составляющих остаточных шумов, так как они включаются в суммарную погрешность выполненного измерения. Это связано с дополнительными затратами, но, не имея этих данных, невозможно оценить суммарную погрешность выполненного измерения.

Схемы алгоритмов оценки точности и достоверности измерений при проведении анализа результатов натурных испытаний РН

Обработка зарегистрированной при натурных испытаниях информации проводится в несколько этапов:

- проверка структуры принятой информации и формирование единого носителя;
- выделение каждого измеренного параметра из структуры кадра и преобразование его в физическую величину;
- проверка соответствия результатов обработки априорным данным;
- оценка основных характеристик систем и агрегатов РН и погрешностей измерений.

Информация, переданная с борта РН и зарегистрированная наземными станциями, содержит, помимо значений контролируемых параметров, служебную информацию: маркеры основного и локальных коммутаторов, калибровки, бортовое время, данные, внесенные регистрирующей наземной аппаратурой (индекс изделия, дата пуска, метки системы единого времени, номер станции и т. д.). В каждом кадре, помимо маркеров и калибровок, определенное место занимают незадействованные каналы основного и локальных коммутаторов; информация ряда каналов

основного коммутатора может передаваться в двухпозиционном коде, а другая часть – в четырехпозиционном коде, индивидуальные временные особенности поведения каждого параметра внутри кадра и т. д.

Таким образом, структура кадра имеет своеобразный «рисунок». Проверка соответствия между зарегистрированным «рисунком» каждого кадра и «рисунком», соответствующим документации, можно подтвердить достоверность каждого кадра и сформировать информацию, подлежащую дальнейшей обработке. В некоторых случаях удастся восстановить часть кадра, что особенно актуально при анализе аварийных ситуаций. Как бы мы ни оценили количественную сторону достоверности полученной информации в целом, важно, что другой информации у нас нет и ее дальнейшую обработку мы будем проводить убедившись, что она непротиворечива. Не останавливаясь на алгоритмах выделения каждого измеренного параметра из структуры кадра, его преобразования в физическую величину, исключения аномальных показаний [14, 15], отметим, что используемые здесь алгоритмы и исходные данные должны быть тщательно верифицированы, а отбраковка аномальных показаний логически увязана с результатами анализа всей зарегистрированной информации.

Продешифрованная информация не должна противоречить принятым математическим моделям и априорным данным (рис. 3).

Анализ графика показывает, что характер изменения параметра по времени и значения ускорений в характерных точках соответствуют заданной циклограмме полета РН и расчетным данным. Это свидетельствует о достоверности измеренного параметра. Случайные «сбои» в информации здесь легко идентифицируются и отфильтровываются как не соответствующие динамике движения РН.

Апостериорную оценку точности измерений можно получить, если в процессе вторичной обработки информации оценивается вектор состояния $x(t)$ и его допустимые отклонения.

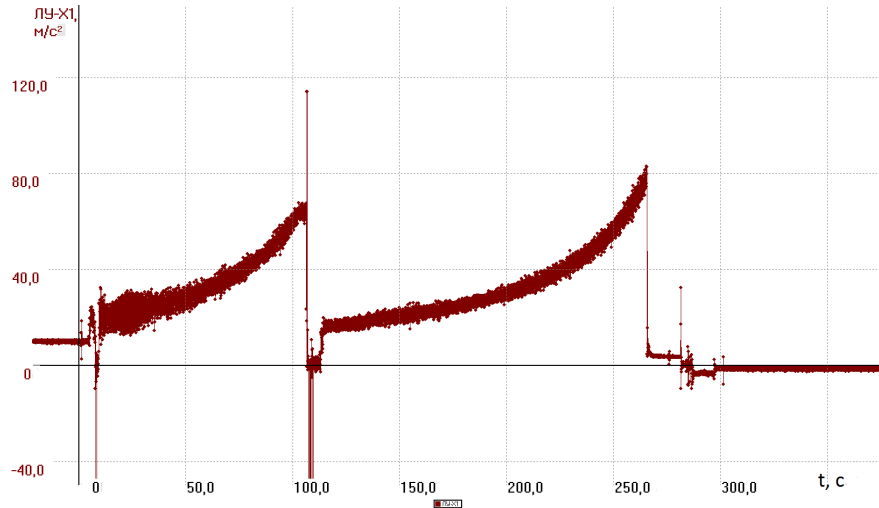


Рис. 3. График изменения по времени ускорения по продольной оси OX, зарегистрированный при испытаниях РН «Днепр-Дубайсат»

Уравнения (4) определяют лучшую оценку вектора состояния системы $x(T)$, полученную до момента времени T включительно. Лучшие оценки $x(t_i/T)$ в промежуточных точках t_i интервала регистрации, соответствующие данным, зарегистрированным на всем интервале $0 \leq t_i \leq T$, можно получить используя алгоритмы сглаживания [5, 16, 17]

$$\begin{aligned} dx(t/T) &= f(x(t/T)) + \Pi(t/T)(x(t/T) - x(t)); \\ dV_x(t/T)/dt &= [\partial f(x(t/T))/\partial x + \\ &+ \Pi(t/T)V_x(t/T) + V_x(t/T)[\partial f(x(t/T))/\partial x + \\ &+ \Pi(t/T)]' - \Psi_v; \\ \Pi(t/T) &= \Psi_v P^{-1}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

За начальные условия для уравнений (8) принимаются результаты, полученные при решении уравнений (4) на момент $t=T$:

$$x(t/T) = x(T), \quad V_x(T/T) = P(T).$$

Интегрирование уравнений (11) ведется в обратном направлении от T к 0 с использованием результатов решения уравнений (4) $x(t)$ и $P(t)$.

При отсутствии ошибок в использованных математических моделях и априорных данных о действующих помехах, выполнении условий наблюдаемости системы и сходимости вычислительного процесса матрица $V_x(t/T)$ является ковариационной матрицей вектора $x(t/T)$.

Для проверки выполнения этих условий и оценки погрешностей измерений проведем анализ остаточных ошибок наблюдений («обновляющегося процесса»)

$$\Delta y(t) = y(t) - \bar{a} - \varphi(\hat{x}(t), \hat{p})\bar{b} + q, \quad (9)$$

где \bar{a} , \bar{b} – коэффициенты датчиков, использованных при дешифровке их показаний; $\hat{x}(t) = x(t/T)$.

Примем, что в использованных математических моделях объекта и датчиков ошибки Δp , Δa , Δb векторов p , a , b имеют математические ожидания $\Delta \bar{p}$, $\Delta \bar{a}$, $\Delta \bar{b}$ и диагональные матрицы дисперсий Φ_p , Φ_a , Φ_b , а реальные ковариационные функции помех Φ_v , Φ_q отличаются от принятых в алгоритме обработки Ψ_v , Ψ_q . Тогда из (9), (10) можно записать

$$\begin{aligned} a &= \bar{a} + \Delta a; \quad b = \bar{b} + \Delta b; \quad x(t) = \hat{x}(t) + \Delta x(t); \\ p &= \bar{p} + \Delta p; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta y(t) &= y - \bar{a} - \varphi(\hat{x}(t), \hat{p})\bar{b} = \\ &= \Delta a + \partial(\varphi b)/\partial b * \Delta b + \partial(\varphi b)/\partial x * \Delta x(t) + \\ &+ \partial(\varphi b)/\partial p * \Delta p + q. \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая, что Δa , Δb не зависят от p , q и друг друга, найдем оценки для ошибок измерений вектора y (математическое ожидание $\Delta \bar{y}(t)$ и ковариационную функцию $\Phi_{\Delta y}$ для $\Delta y(t)$):

$$\begin{aligned} \Delta \bar{y}(t) &= \Delta \bar{a} + (\varphi b)\Delta \bar{b} + (\partial(\varphi b)/\partial x)\Delta \bar{x}(t) + \\ &+ (\partial(\varphi b)/\partial p)\Delta \bar{p}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta y} &= \Phi_a + (\varphi b)\Phi_b(\varphi b)^t + \\ &+ \Phi_{ax}(\partial(\varphi b)/\partial x)^t + \partial(\varphi b)/\partial x \Phi_{ax}^t + \\ &+ (\varphi b)\Phi_{bx}(\partial(\varphi b)/\partial x)^t + \\ &+ \partial(\varphi b)/\partial x \Phi_{bx}(\varphi b)^t + \\ &+ \partial(\varphi b)/\partial x \Phi_x(\partial(\varphi b)/\partial x)^t + \\ &+ \partial(\varphi b)/\partial p \Phi_{px}(\partial(\varphi b)/\partial x)^t + \\ &+ \partial(\varphi b)/\partial x \Phi_{px}^t(\varphi b)^t + \\ &+ \partial(\varphi b)/\partial p \Phi_p(\partial(\varphi b)/\partial p)^t + \\ &+ \Phi_{qx}(\partial(\varphi b)/\partial p)^t + (\partial(\varphi b)/\partial x)\Phi_{qx}^t + \Phi_q, \end{aligned} \quad (13)$$

где функция $\varphi(\hat{x}(t), \hat{p})b$ для упрощения записана как φb ; $\Phi_{\Delta y}$ – корреляционная матрица $\Delta y(t)$, определенная по реально вычисленным отклонениям в соответствии с (11); Φ_x – действительная ковариационная матрица вектора x ; $\Phi_{ax}, \Phi_{bx}, \Phi_{px}, \Phi_{qx}$ – взаимно-корреляционные функции между каждым из векторов a, b, p, q и вектором x ; они определяются путем имитационного моделирования системы либо путем составления и решения соответствующих дифференциальных уравнений моментов [6].

Из (12), (13) следует, что при $\Delta \bar{p}=0, \Delta \bar{a}=0, \Delta \bar{b}=0, \Delta \bar{y}(t) \cong 0$ и $\Phi_p = \Psi_p, \Phi_a = \Psi_a, \Phi_b = \Psi_b, \Phi_q = \Psi_q, \Phi_v = \Psi_v, \Phi_x = V_x (t/T)$ вычисленная корреляционная матрица $\Phi_{\Delta y}$ должна совпадать с правой частью выражения (13). Если (12), (13) не выполняются, то их нужно рассматривать как дополнительные уравнения для использования совместно с уравнениями (2), (4), (5), (8), (9) в итерационной процедуре уточнения a, b, p, Ψ_q, Ψ_v . Отметим, что (12), (13) определяют погрешности датчиков с учетом их систематических составляющих, зависящих от коэффициентов a, b . Если значения этих систематических составляющих меньше 1/3 случайной составляющей датчика, то ими можно пренебречь.

Методы уточнения Ψ_q, Ψ_v , в том числе параметров математических моделей, на основе уравнений (4), (5), (8) рассмотрены в [17, 18].

Контроль особо ответственных параметров на РН чаще всего осуществляется путем дублирования или троирования измерений. Для оценки достоверности и точности дублированных и троированных измерений используется метод анализа невязок парных разностей [20, 25–27].

Этот метод можно распространить на произвольное количество датчиков n и в более общем случае.

Пусть имеем показания двух датчиков i и j

$$y_i(t) = a_i + \varphi_i(\hat{x}(t), \hat{p})b_i + q_i; \tag{14}$$

$$y_j(t) = a_j + \varphi_j(\hat{x}(t), \hat{p})b_j + h_{ij}(t) + q_j,$$

где $h_{ij}(t)$ – известная функция связи между $y_i(t)$ и $y_j(t)$.

Исключим из (14) $\varphi_i(\hat{x}(t), \hat{p})$ и найдем математическое ожидание и дисперсию разности их показаний с учетом независимости параметров датчиков

$$\begin{aligned} \bar{y}_j(t) - \bar{y}_i(t) \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) &= \bar{a}_j - \bar{a}_i \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) + \bar{h}_{ij}(t) + \\ &+ \bar{q}_j - \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) \bar{q}_i; \\ D_{y_j} + \left[\left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) + D \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) \right] D_{y_i} + \bar{y}_i^2 D \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) &= \\ = D_{a_j} + \left[\left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right)^2 + D \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) \right] D_{a_i} + \\ + \bar{a}_i^2 D \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) + [D_{h_{ij}} + \bar{h}_{ij}^2] D_{b_i} + \bar{b}_j^2 D_{h_{ij}} + \\ + \left[D \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) + \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right)^2 \right] D_{q_i} + \bar{q}_i^2 D \left(\frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_i} \right) + D_{q_j}, \end{aligned} \tag{15}$$

где $D_{h_{ij}}$ – дисперсия функции $h_{ij}(t)$.

Уравнения (15) составляются для всех пар датчиков $i \neq j$ с шагом по времени $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$, выбираемого из условий

$$\Delta t_k \geq \mathcal{G}^*;$$

$$R_y(\mathcal{G}) = 0,05R_y(0),$$

где $R_y(\mathcal{G})$ – автокорреляционная функция $y_i(t)$; \mathcal{G}^* – время корреляции.

Временная и функциональная избыточность системы уравнений (15) позволяет обрабатывать информацию о регистрируемых переменных во времени параметрах для определения достоверности и точности их измерений, в итерационной процедуре уточнения измеренных параметров.

Решение системы уравнений (15) получаем методом наименьших квадратов. Аппроксимация $\bar{y}_i(t), \bar{y}_j(t)$ соответствующими функциями позволяет наиболее эффективно использовать избыточность уравнений (15) и получить наименьшие ошибки оценок определяемых параметров.

Более полная статистическая идентификация погрешностей множества рядов измерений с использованием методов дисперсионного анализа рассмотрена в [19, 21, 23, 28].

При наличии достаточно сильной корреляционной зависимости двух векторов Y и Z связь между ними определяется соотношениями [29, 31]

$$\begin{aligned}\bar{Y} &= Y - K_{YZ}K_{ZZ}^{-1}(Z - \bar{Z}); \\ K_{\bar{Y}\bar{Y}} &= K_{YY} - K_{YZ}K_{ZZ}^{-1}K_{ZY}.\end{aligned}\quad (16)$$

Здесь \bar{Y} , \bar{Z} , K_{yy} , K_{yz} , K_{zz} – математические ожидания, корреляционные и взаимно-корреляционные функции векторов Y , Z .

Физическая сущность векторов может быть различной. Оценку точности измеренного вектора Y можно получить из соотношения (16), если одновременно с Y измеряется и вектор Z , а \bar{Z} , K_{yy} , K_{yz} , K_{zz} получены, например, путем статистического моделирования рассматриваемых процессов.

Объединение результатов измерений одного параметра по нескольким пускам образует ансамбль реализаций. Ансамбль реализаций одного параметра позволяет получить информацию о динамике и «диффузности» его поведения, использовать эти данные для оценки последующих пусков. Основанием для объединения в общую совокупность измерений одного и того же параметра на разных изделиях являются: оснащение РН телеметрической аппаратурой одного и того же типа, малое отличие между собой циклограмм работы систем и агрегатов РН при полетах с различными полезными нагрузками, проведение специальных преобразований информации с целью приведения показаний датчиков на разных изделиях к одним и тем же условиям и т. д.

Если при проведении очередного испытания ракеты пуск признан «нормальным» (т. е. подтверждена достоверность принятой телеметрической информации в целом и по данным измерений все системы и агрегаты функционируют в штатном режиме), а характер поведения измеренного

параметра соответствует ансамблю его реализаций, то рассматриваемый параметр следует считать достоверным.

На рис. 4 приведены графики давлений в приборном отсеке (параметр 20ДСПО), зарегистрированные при пусках РКН «Зенит-3SL» (13 изделий).

Для сравнения на рис. 5 приведены графики давлений 20ДСПО по восьми РКН «Зенит-3SLБ», а на рис. 6, 7 – давления во всех «сухих» отсеках 1-й и 2-й ступеней РКН «Зенит-3SL» №SL20 (параметры 10ДСХО, 10ДСДО, 10ДСМО, 20ДСХО, 20ДСМО, 20ДСПО). Достоверность измерений подтверждается данными результатов зондирования атмосферы.

При обработке в показания датчиков вносили поправки на «уход нуля» и «уход коэффициента чувствительности», если их показания не совпадали со значениями давлений атмосферы при проверках РН на ТП и СП и не равнялись нулю на участке полета $t \geq 110$ с, когда высота полета изделия превышает 40 км, а расчетное давление атмосферы становится меньше 2 мм рт. ст. (величины дискретности СИ). Введенные поправки учитывают основную часть систематической составляющей погрешности измерений датчиков. На рисунках показания датчиков не приводились к стандартному давлению и потому на момент старта РН имеют естественный разброс, а также сохранены зарегистрированные локальные «выбросы» информации.

Графики изменения давлений в каждом из отсеков РН (рис. 6) имеют свои особенности, зависящие от величин [22]:

- параметров траектории полета и расположения точек отбора давления на РН;
- распределения параметров атмосферы по высоте (давления, температуры, скорости и направления ветра);
- характеристик системы дренирования каждого отсека;
- искажений, вносимых системой измерений в контролируемый параметр.

Измерения давлений в «сухих» отсеках РН «Зенит» проводились с помощью индуктивных датчиков абсолютного давления Вт222М/1000. В соответствии с техническими условиями [32] диапазон измере-

ний датчиков 10–1000 мм рт. ст., основная погрешность $\pm 2,5\%$ диапазона измерений при $\rho=0,997$, нелинейность градуировочной характеристики $\pm 5\%$, собственная частота 100 Гц, амплитудная погрешность датчика в диапазоне частот $0-20 \text{ Гц} \leq 10\%$. Для защиты от вибраций первичный преобразователь датчика смонтирован на амортизаторе. Погрешность, вносимая СИ при контроле и регистрации параметров, не превышает $0,3\%$ диапазона измерений. Учитывая, что рассматриваемые датчики и СИ подвергаются индивидуальной метрологической аттестации в процессе изготовления, осуществляется контроль их состояния при сборке РН и в процессе подготовки РН к пуску, а температурные и вибрационные режимы их эксплуатации на РН «Зенит» не превышают условий, допустимых для обеспечения работоспособности СИ РН в целом, априорную величину суммарной погрешности канала измерения давления с использованием этого датчика можно принять равной ± 28 мм рт. ст. при доверительной вероятности $\rho=0,997$.

Как видно из рис. 4 и 5, для РКН «Зенит-3SLБ» «диффузность» давлений по сравнению с РКН «Зенит-3SL» намного больше и обусловлена большей вариацией атмосферного давления при пусках РКН «Зенит-3SLБ». Поэтому выберем для оценки погрешности измерений давлений данные по РКН «Зенит-3SL». Максимальный «размах» давлений на рис. 4 соответ-

ствует интервалу времени 30–40 с полета и составляет 36,36 мм рт. ст., включающих и разброс атмосферного давления. Такому размаху соответствует с.к.о. $\sigma=11,0$ мм рт. ст. при доверительной вероятности $\approx 0,92$ [24].

Таким образом, за обобщенную верхнюю оценку погрешности измерений давлений в «сухих» отсеках РН можно принять $\pm 11,0$ мм рт. ст.

Для этой группы параметров более точную верхнюю оценку погрешности измерений давлений в «сухих» отсеках конкретного изделия можно получить, выделив участок полета, на котором наблюдаются наибольшие отклонения параметров между собой (57–60 с полета РКН «Зенит-3SL» №SL20, рис. 6, 7), и использовать метод оптимальной интерполяции, применяемый при составлении краткосрочного прогноза метеорологических параметров. Уравнения оптимальной интерполяции приведены в [30]. Интерполированное значение давления в каждой точке измерения зависит от статистических связей между измеряемыми параметрами, погрешностей измерений и конкретных значений измерений во всех «сухих» отсеках РН. Так как показания датчиков независимы, дисперсия интерполированного значения давления уменьшается пропорционально числу используемых измерений при интерполяции, т. е. примерно в пять раз.

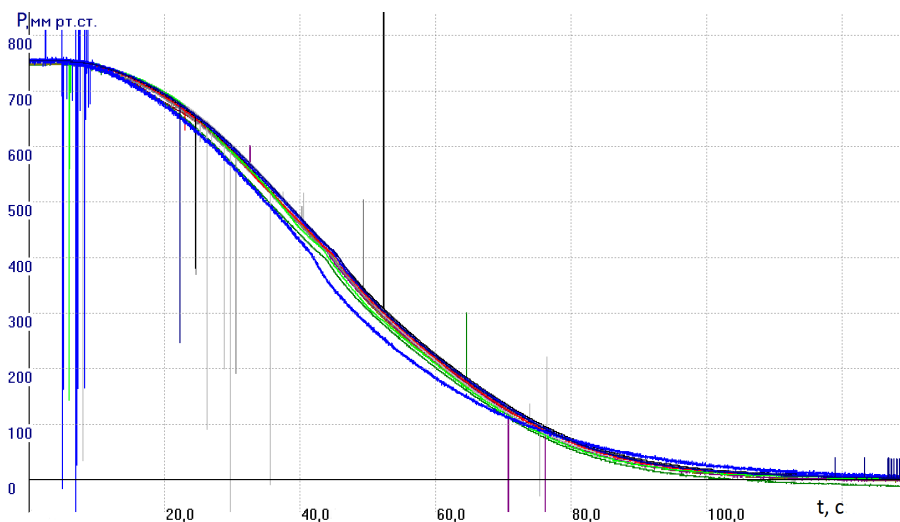


Рис. 4. Графики давлений в приборном отсеке РКН «Зенит-3SL» (параметр 20ДСПО)

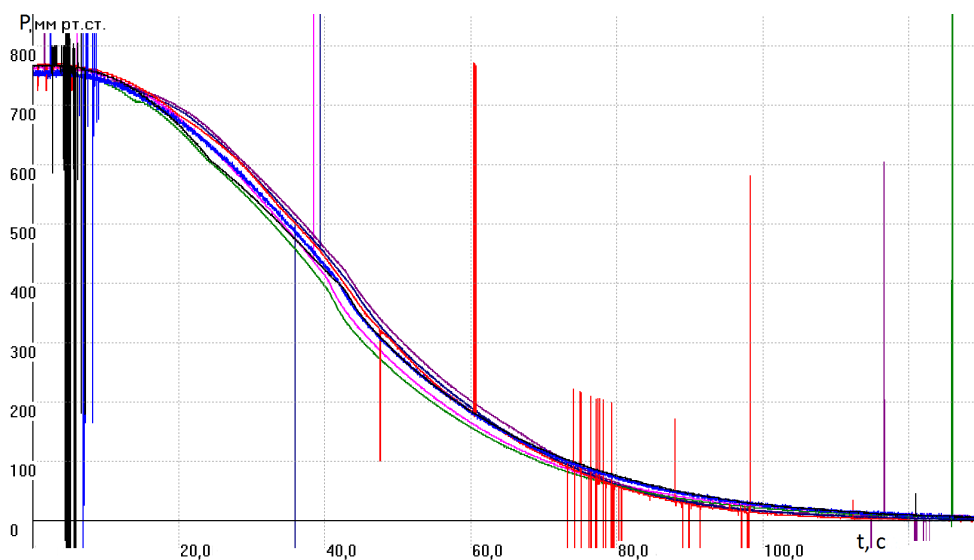


Рис. 5. Графики давлений в приборном отсеке РКН «Зенит-3SLБ» (параметр 20ДСПО)

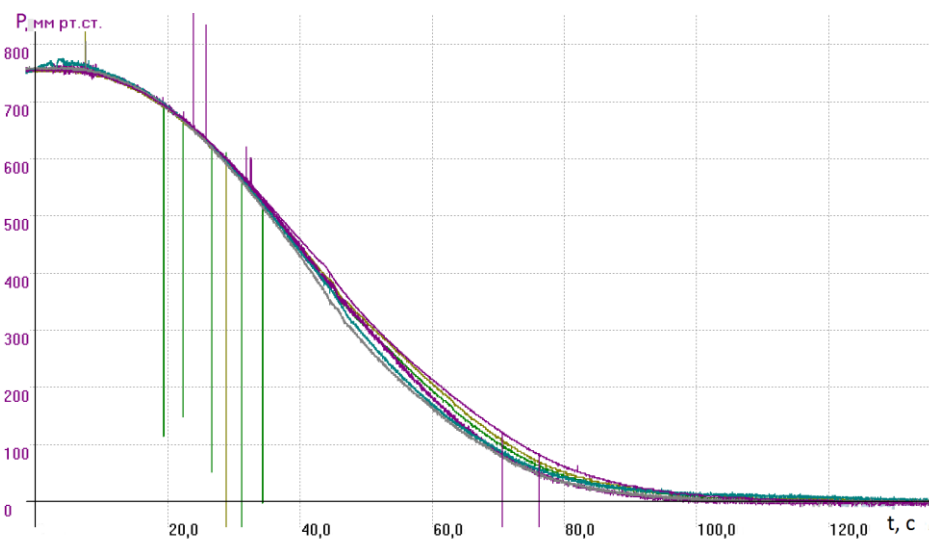


Рис. 6. Графики давлений в «сухих» отсеках РКН «Зенит-3SL» №SL20

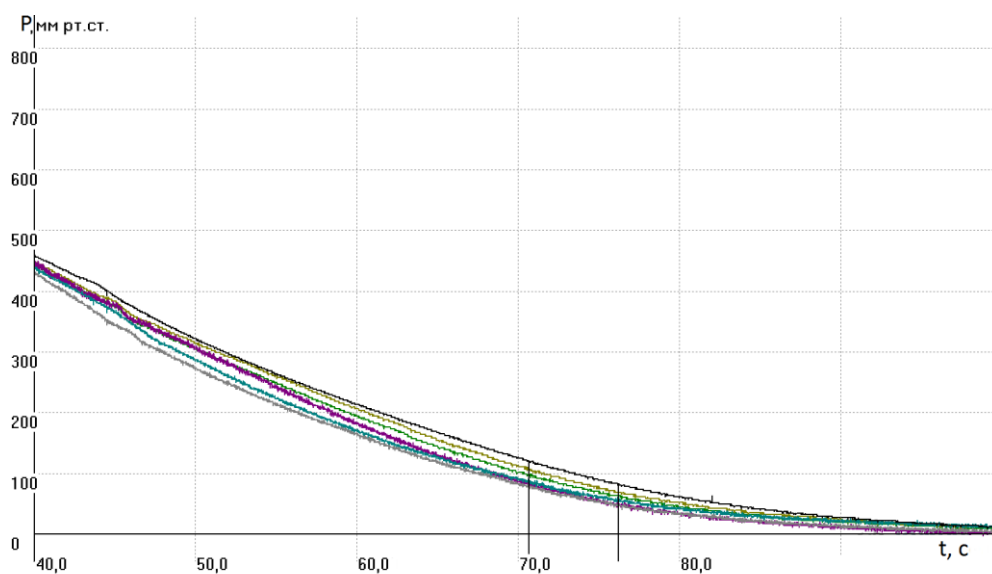


Рис. 7. Давления в «сухих» отсеках РКН «Зенит-3SL» №SL20 на участке полета 40-80 с

Выводы

1. Достоверность измерения каждого параметра должна подтверждаться как на этапах разработки и испытаний СИ и РН, так и при проведении обработки и анализа результатов испытаний.

2. Апостериорную оценку точности результатов измерений по каждой системе (агрегату) конкретного пуска можно получить, привлекая статистические данные по предыдущим испытаниям совместно с профессиональным анализом работы рассматриваемой системы (агрегата).

3. Для каждого типа измеряемого параметра должна быть разработана своя методика оценки достоверности и точности измерений.

4. Приведенные в статье методы позволяют оценить достоверность и точность измерений при использовании взаимозависимого комплекса измеряемых параметров без привлечения математических моделей объекта и СИ.

Список использованной литературы

1. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

2. Шмутцер Э. Теория относительности. Современное представление. Путь к единству физики. – М.: Мир, 1981. – 230 с.

3. Блехман И. И., Мышкис А. Д., Пановко Я. Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. – Киев: Наук. думка, 1976. – 270 с.

4. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

5. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

6. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1972. – 424 с.

7. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ Петербург, 2011. – 768 с.

8. Браславский Д. А., Петров В. В. Точность измерительных устройств. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.

9. Глинченко А. С. Цифровая обработка сигналов: курс лекций. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 242 с.

10. Гарманов А. В. Практика оптимизации соотношения сигнал/помеха при подключении АЦП в реальных условиях. – М.: L-Card, 2002. – 9 с.

11. Денисенко В. В., Халявко А. Н. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // СТА. – №1. – 2001. – С. 68–75.

12. Гарманов А. В. Подключение измерительных приборов. Решение вопросов электросовместимости и помехозащиты. – М.: L-Card, 2003. – 41 с.

13. Энциклопедия АСУ ТП// bookASUTR.ru

14. Смоляк С. А., Титаренко Б. П. Устойчивые методы оценивания. – М.: Статистика, 1980. – 208 с.

15. Фомин А. Ф. и др. Отбраковка аномальных результатов измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.

16. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

17. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

18. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах: Сб. статей / Под ред. К. Т. Леондеса. – М.: Мир, 1980. – 408 с.

19. Кринецкий Е. И. и др. Летные испытания ракет и космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 464 с.

20. Видуев Н. Г., Григоренко А. Г. Математическая обработка геодезических измерений. – Киев: Вища шк., 1978. – 376 с.

21. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.

22. Сиренко В. Н., Ильенко П. В., Семенов П. В. Использование статистических подходов при анализе газодинамических

параметров в дренируемых отсеках РН// Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Вып. 1. – Днепр: ГП «КБ «Южное». – С. 43–47.

23. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

24. Жовинский А. Н., Жовинский В. Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.

25. Анищенко В. А. Контроль достоверности дублированных измерений в условиях неопределенности // Изв. высш. учеб. зав. – Минск: Энергетика, 2010. – №2. – С. 11–18.

26. Анищенко В. А. Надежность и точность троированных измерений аналоговых технологических переменных // Изв. высш. учеб. зав. – Минск: Энергетика, 2017. – №2. – С. 108–117.

27. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

28. Бессонов А. А., Свердлов Л. З. Методы статистического анализа погрешностей устройств автоматики. – Л.: Энергия, 1974. – 144 с.

29. Пугачев В. Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. – М.: Сов. радио, 1973. – 256 с.

30. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 360 с.

31. Железнов И. Г., Семенов Г. П. Комбинированная оценка характеристик сложных систем. – М.: Машиностроение, 1976. – 52 с.

32. Датчик абсолютного давления Вт222М: ТУ Вт2.832.075ТУ. – Пенза, 1983.

Статья поступила 21.06.2018