

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.396 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.4.36.46

Некоторые аспекты предобработки данных телеизмерений на телеметрируемом объекте

В. Л. Воронцов, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Представленные результаты исследования являются результатами развития предыдущих работ автора, касающихся построения рациональных систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения (СИТО_{СВ}). Проанализированы возможности купирования риска потерь телеметрической информации при возникновении полетной аварии, приводящей к метрологическим отказам датчикообразующей аппаратуры и элементов бортовой радиотелеметрической системы (БРТС), причем исследованы возможности обеспечения преимуществ представления данных телеизмерений, связанных с циклическим опросом датчиков. Исследованный ранее (в других работах автора) подход, заключающийся в применении повышенной (учитывающей динамику развития аварийной ситуации) частоты опроса датчиков и в последующем безусловном сжатии полученных данных телеизмерений традиционными методами, имеет недостатки, связанные с необходимостью формирования адресных данных существенных данных телеизмерений, обозначающих их местоположение в блоке данных, а также с влиянием дестабилизирующих факторов разной природы, делающим уровни первичных сигналов «размытыми», все это существенно ухудшает возможности сжатия данных. Разработанный алгоритм предобработки данных телеизмерений позволяет представить данные телеизмерений относительно компактно и в таком же виде, как и в существующих отечественных БРТС, исключив необходимость формирования вышеупомянутых адресных данных и повысив (фильтрацией/сглаживанием данных) точность измерений. Описанные нюансы, связанные с представленными практическими примерами проявления метрологических отказов, актуальны при решении практических задач развития СИТО_{СВ}.

Ключевые слова: бортовая информационно-телеметрическая система, бортовая радиотелеметрическая система, данные телеизмерений, телеметрируемый объект, телеметрируемый параметр, телеметрическая информация

Some Aspects of Preprocessing of Data Telemetry at the Telemetry Object

V.L. Vorontsov, *Cand. Sci. (Engineering)*, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Abstract. The presented results of the study are the results of development of the author’s previous works concerning the construction of rational systems of information and telemetry support of the development of launch vehicles (SITO_{LV}). The possibilities of telemetry information of loss risk reduction in case of a flight accident, which leads to metrological failures of transducers and elements of the onboard radio telemetry system (ORTS), were analyzed, and the possibilities of providing the advantages of telemetry data presentation associated with cyclic sensor interrogation were investigated. The approach studied earlier (in other works of the author) consists in application of the raised (considering dynamics of development of an emergency situation) frequency of interrogation of sensors and in the subsequent unconditional compression of the received telemetry data by traditional methods has lacks connected with necessity of formation of the address data of the essential telemetry data designating their location in the data block, and also with the influence of destabilizing factors of different nature making levels of primary signals “blurred”. All this essentially influences on the data accuracy. The developed algorithm of data preprocessing allows one to present the telemetry data relatively compactly and in the same form, as in existing domestic ORTSs eliminating the need to form the above-mentioned address data and increase (by filtering/smoothing the data) the accuracy of measurements. The described nuances related to the presented practical examples of metrological failures manifestation are relevant in solving practical tasks of development of SITO_{LV}.

Keywords: onboard information and telemetry system, onboard radio telemetry system, telemetry data, telemetry object, telemetry parameter and telemetry information

Исследованные в настоящей работе аспекты предобработки касаются управления избыточностью данных телеизмерений с целью построения рациональных систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения (СИТО_{СВ}) [1], функционирующих в условиях неопределенного поведения телеметрируемых параметров (ТМП) и метрологических отказов средств измерений, размещенных на телеметрируемом объекте [2].

Рассмотрены [1] потери телеметрической информации (ТМИ) на телеметрируемом объекте [2] вследствие метрологического отказа.

Метрологический отказ — это отказ средства измерений, состоящий в потере его метрологической исправности [3, 4]. Под метрологической исправностью понимается состояние средства измерений, определяемое соответствием его нормируемых метрологических характеристик установленным требованиям [3, 4].

В случае метрологического отказа датчикопреобразующей аппаратуры и/или элементов бортовой радиотелеметрической системы (БРТС) [2], относящихся к отдельному (*i*-му) ТМП, эта аппаратура и/или эти элементы находятся в состоянии метрологической непригодности [1, 3, 4]. Это означает, что данные телеизмерений *i*-го ТМП недостоверны, их нельзя использовать по целевому назначению, имеют место потери ТМИ [1]. Признаком метрологической непригодности является аномальное (т. е. отличающееся от обычного поведения, от ожидаемого) поведение ТМП (практические примеры представлены на рис. 1–5). По продолжительности состояние метрологической непригодности может быть кратковременным (сбой; см. рис. 1), перемежающимся (то возникает, то исчезает; см. рис. 2) и устойчивым (см. рис. 3–5).

Аномальное поведение ТМП обычно является следствием следующих причин:

- полетная авария телеметрируемого объекта [2] (в том числе с разрушением его конструкции) и потери ТМИ вследствие недостаточной частоты опроса датчика (рис. 6) [1];
- случайные отказы датчикопреобразующей аппаратуры (см. рис. 4) и элементов БРТС (см. рис. 1, 3), проявляющиеся в произвольные моменты

времени при безаварийном функционировании телеметрируемого объекта [2];

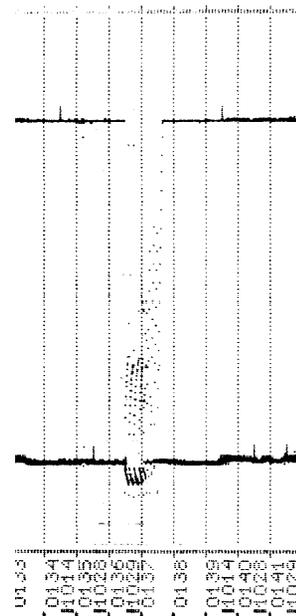


Рис. 1. График, иллюстрирующий сбой работы локального коммутатора (ЛК) (кратковременное — менее 1 секунды — одинаковое скачкообразное изменение уровней всех ТМП ЛК)

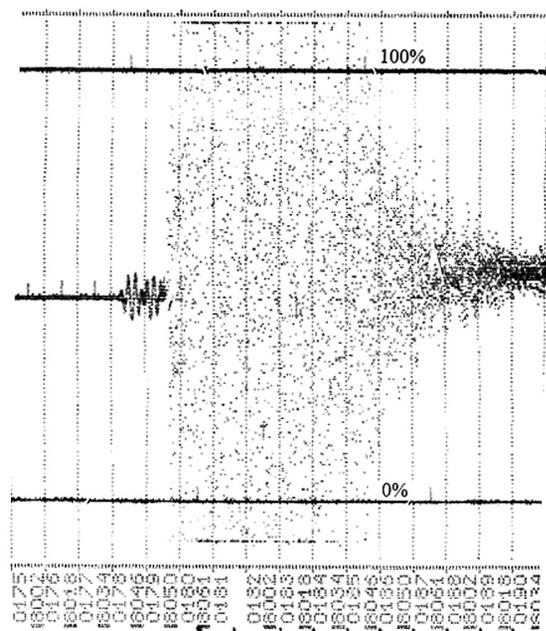


Рис. 2. Типичный случай выхода значений телеметрируемого параметра за границы ожидаемого диапазона измерений (РН «Протон-М» от 7.04.2001, параметр осевых перегрузок)

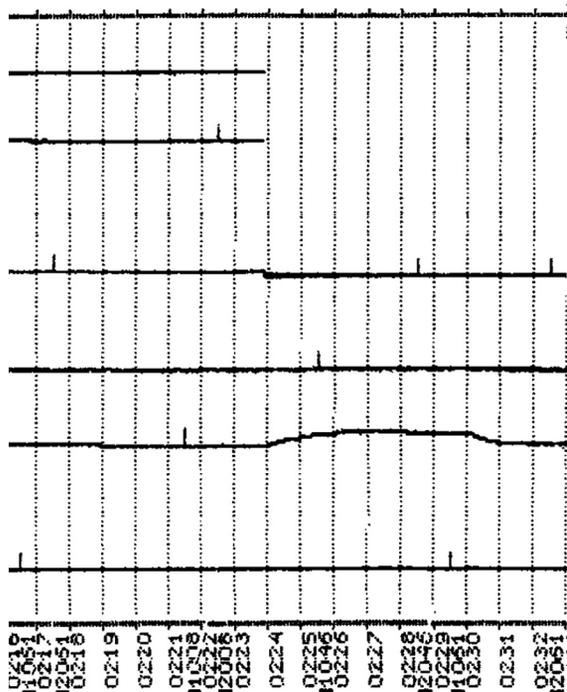


Рис. 3. График, иллюстрирующий отказ локального коммутатора (падение уровней всех ТМП этого ЛК ниже уровня 0% шкалы измерений, другой ЛК функционирует нормально)

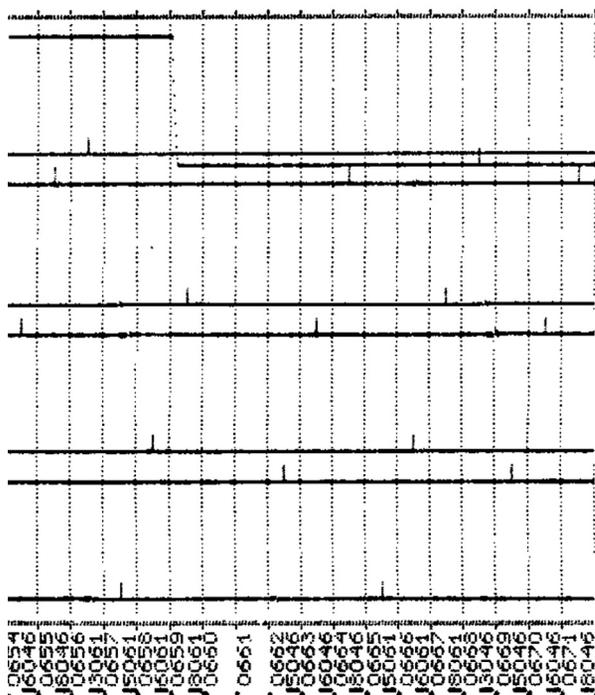


Рис. 4. График, иллюстрирующий отказ датчика уровня 100% шкалы измерений локального коммутатора

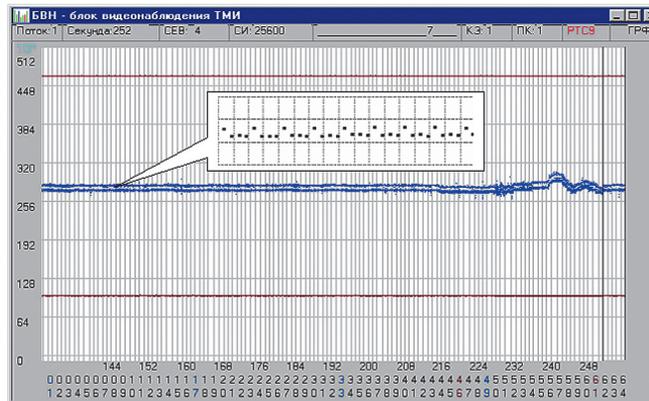


Рис. 5. График значений параметра T1 (тангаж) в виде двойной линии, отображающий результат anomального функционирования устройства согласования 17-го канала ЛК₇ (РН «Союз» от 01.10.2005, ЛК₇, каналы ЛК₇ 1, 17, 33, 49). При увеличении масштаба обнаруживается отклонение от нормы каждой четвертой точки графика (измерения 17-го канала)

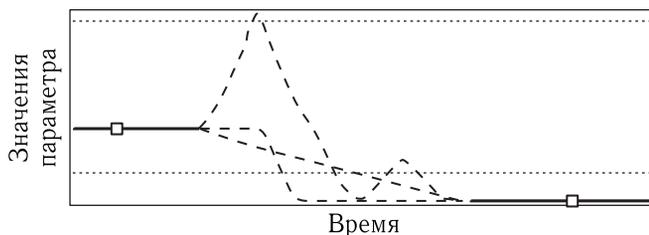


Рис. 6. Графики, иллюстрирующие потери ТМИ из-за недостаточной частоты опроса датчика (тонкие пунктирные линии — верхний и нижний пределы измерений, толстые пунктирные — некоторые варианты возможных переходов, сплошные линии с квадратными маркерами — значения параметра до и после аварии, причем левый маркер соответствует моменту опроса датчика до, а правый — после аварии)

– ошибки в выборе ожидаемого диапазона измерений ТМП (сигнал с выхода датчика, или *первичный сигнал* [2], или находится на уровне шума, или выходит за уровни 0% и 100% шкалы измерений ТМП; см. рис. 2);

– условия эксплуатации датчика (физические перегрузки, температура окружающей среды и т. д.), не соответствующие предъявляемым требованиям к применяемой датчикопреобразующей аппаратуре и БРТС; при этом возможно физическое повреждение датчикопреобразующей аппаратуры и элементов БРТС (возможны обрывы или короткие замыкания);

– ошибки при подготовке датчикообразующей аппаратуры и БРТС к применению (на рис. 5 показан частный случай, связанный с неправильной настройкой канала локального коммутатора).

Следует заметить, что потери ТМИ вследствие ошибок в выборе ожидаемого диапазона измерений ТМП и вследствие недостаточной частоты опроса датчика связаны с неопределенным поведением ТМП.

Чтобы уменьшить эти потери, делают поправку на вышеупомянутую неопределенность, что, в свою очередь, порождает избыточность данных телеизмерений [1], которая оказывается чрезмерной (до 95 % от общего количества телеизмерений избыточны [5]).

С увеличением количества ТМП пропорционально увеличивается количество комплектов БРТС и лавинообразно (из-за необходимости разнесенного приема ТМИ) — количество наземных программно-технических средств (ПТС) в составе телеметрического комплекса космодрома (ТК), прежде всего приемно-регистрирующих станций (ПРС) [1]. Вследствие разнотипности ракет космического назначения (РКН) (и, соответственно, значительных отличий по количеству ТМП) велик разброс количества ПРС, задействуемых по их пускам [1]. При этом значительная часть ПТС ТК зачастую оказывается избыточной [обычно пуски ракет-носителей (РН) типа «Союз» с относительно малым количеством ТМП осуществляют значительно чаще, чем РН типа «Энергия» с существенно большим количеством ТМП] [1].

Обосновано [1], что сокращение потерь ТМИ путем дальнейшего традиционного увеличения избыточности данных телеизмерений не годится, т. к. при его осуществлении недопустимо разрастется ТК и, соответственно, возрастет избыточность ПТС в его составе, а необходимое сокращение потерь не будет обеспечено. Ситуация, касающаяся сокращения потерь ТМИ и увеличения избыточности данных телеизмерений, такова, что существующая отечественная телеметрия является телеметрией нормального пуска, в то время как ТМИ наиболее ценна в случае нештатных и аварийных ситуаций [1].

Чтобы получать необходимую информацию об аварийных ситуациях в условиях жестких огра-

ничений материальных ресурсов на решение задач информационно-телеметрического обеспечения (ИТО), разработаны [1] стратегии управления избыточностью данных телеизмерений, реализующие возможности существенного замедления роста суммарной скорости передачи данных телеизмерений по каналам «борт–Земля» и сокращения количества каналов разнесения при увеличении количества телеметрируемых параметров. При их осуществлении в части существенного сокращения потерь ТМИ вследствие ошибок в выборе ожидаемого диапазона измерений ТМП и вследствие недостаточной частоты опроса датчика на *телеметрируемом объекте* [2] создается повышенная, по сравнению с существующей, избыточность данных телеизмерений, обеспечивающая существенное сокращение потерь ТМИ в случае аварийных ситуаций и устранимая в дальнейшем [1].

В этой связи исследована [1] природа метрологических отказов, являющихся следствием полетной аварии, и сформулированы рекомендации по беззатратному накоплению ТМИ в бортовой информационно-телеметрической системе (БИТС) [2]. Экспериментально доказано [1], что датчики, размещенные в эпицентре аварии (на j -й ступени РН), приходят в состояние метрологических отказов за единицы миллисекунд, а элементы БРТС, размещенные на последующих ступенях (на $(j + 1)$ -й или $(j + 2)$ -й) могут оставаться исправными десятки и даже сотни секунд. Интересен следующий факт, характеризующий спасательные возможности накопленных в БИТС данных телеизмерений: при взрыве двигательной установки первой ступени РН «Зенит» до отрыва РКН от Земли, с разрушением стартовых конструкций (пуск от 04.10.1990) элементы БРТС второй ступени оставались исправными около 6 секунд [1].

Способы существенного сокращения потерь ТМИ вследствие ошибок в выборе ожидаемого диапазона измерений ТМП достаточно полно описаны [1, 6, 7]. Что касается потерь ТМИ вследствие недостаточной частоты опроса датчика (см. рис. 6), то предложенный [1] подход по их существенному уменьшению связан со значительным увеличением частоты опроса датчиков, создающим значительную избыточность данных телеизмерений, и с последующим ее уменьшением (например, рекомендуемыми

для практического применения методами сжатия данных [8, 9]).

Актуальны пояснения некоторых аспектов этого подхода, касающихся следующих нюансов.

Во-первых, метрологическая непригодность датчикопреобразующей аппаратуры и элементов БРТС, их физические повреждения могут возникать как в случае аварийной ситуации, так и при безаварийном функционировании *телеметрируемого объекта* [2] (см. рис. 1–4). Однако в первом случае пользователям ТМИ по ее целевому назначению (т.е. анализаторам) важно знать поведение ТМП в процессе развития аварийной ситуации и для этого необходимо соответствующее увеличение частоты опроса датчиков, а во втором случае возможностей существующей телеметрии достаточно (увеличения частоты опроса датчиков не требуется). Во-вторых, в случае полетной аварии с разрушением конструкции *телеметрируемого объекта* [2] некоторая датчикопреобразующая аппаратура и элементы БРТС, расположенные относительно далеко от эпицентра аварии, функционируют нормально единицы, десятки, а порой и сотни секунд [1]. Увеличения частоты опроса соответствующих датчиков не требуется. В-третьих, *первичный сигнал* [2], кроме полезной составляющей, зачастую содержит шум вследствие влияния дестабилизирующих факторов разной природы, действующих на *телеметрируемом объекте* [2] (рис. 7), что значительно ухудшает возможности сжатия данных телеизмерений. Актуальны меры по купированию этого влияния. В-четвертых, обычно при устранении избыточности существующими методами сжатия данных приходится вводить искусственную избыточность (например, для обозначения номера существенного измерения [5], т.е. вводить адресные данные), что значительно ухудшает возможности компактного представления сжатых

данных телеизмерений (см. результаты экспериментального исследования [1]). В этой ситуации проявляется преимущество циклического опроса датчиков без последующего сжатия данных телеизмерений (без привнесения вышеупомянутой искусственной избыточности), если при относительно низкой частоте опроса обеспечивается требуемая точность измерений ТМП.

Задача заключается в предобработке данных телеизмерений на *телеметрируемом объекте*, обеспечивающей компактное представление данных телеизмерений путем применения пониженной частоты циклического опроса датчика, соответствующей степени динамичности телеметрируемого параметра, а также повышение точности измерений за счет фильтрации (сглаживания) первичного сигнала перед применением вышеупомянутой пониженной частоты опроса датчика.

При решении задачи осуществляется идентификация [1] степени динамичности отдельного (i -го) ТМП:

$$s_{нд_i} = \{s_{стак_i}, s_{нестак_i}, s_{ав_i}\}, \quad (1)$$

где $s_{стак_i}$ — телеметрируемый процесс, близкий к стационарному; $s_{нестак_i}$ — нестационарный процесс; $s_{ав_i}$ — аварийная ситуация.

Соответственно устанавливается частота опроса i -го датчика:

$$f_{опр_стак_i} \ll f_{опр_нестак_i} \ll f_{опр_ав_i}. \quad (2)$$

При этом обычно

$$\Delta T_{стак_i} \gg \Delta T_{нестак_i} \gg \Delta T_{ав_i}, \quad (3)$$

где $\Delta T_{стак_i}$ ($\Delta T_{нестак_i}$, $\Delta T_{ав_i}$) — суммарные временные интервалы, для которых идентифицировано $s_{стак_i}$ ($s_{нестак_i}$, $s_{ав_i}$).

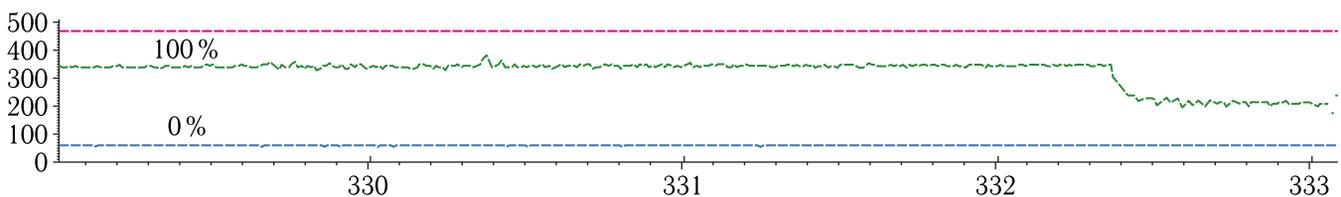


Рис. 7. График (зеленый) телеметрируемого параметра, подвергнутого влиянию дестабилизирующих факторов, проявляющемуся в его «размытости»

Для существующих отечественных БИТС характерна устанавливаемая неизменная частота опроса $f_{\text{опр_нестаци}_i}$, что (см. (2) и (3)), с одной стороны, создает большую избыточность данных телеизмерений, а с другой стороны, не предотвращает потери ТМИ в случае полетной аварии, когда необходима частота опроса $f_{\text{опр_ав}_i}$. Поэтому целесообразно устанавливать частоту опроса датчика ($f_{\text{опр_стаци}_i}$, $f_{\text{опр_нестаци}_i}$ или $f_{\text{опр_ав}_i}$ (2)) в зависимости от степени динамичности относящегося к нему ТМП (1).

При решении задачи осуществляют следующие действия (выполняют алгоритм $A_{\text{предобр_ТМИ}}$):

1. Опрос датчика с частотой $f_{\text{опр_ав}}$ и формирование соответствующей последовательности данных телеизмерений $Q_{\text{ТМИ}_0}$, причем частота $f_{\text{опр_ав}}$ настроена на аварийную ситуацию;

2. Фильтрация (сглаживание) данных $Q_{\text{ТМИ}_0}$ (используется фильтр низких частот (ФНЧ) с полосой пропускания $F_{\text{ФНЧ}}$, причем $F_{\text{ФНЧ}} = F_{\text{нестаци}}$, где $F_{\text{нестаци}}$ — максимальная (априори известная) частота спектра первичного сигнала в случае нестационарного процесса ($s_{\text{нестаци}}$)); в результате фильтрации (сглаживания) данных $Q_{\text{ТМИ}_0}$ формируют данные $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$;

3. Сравнение данных $Q_{\text{ТМИ}_0}$ и $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$ с использованием методов $Met_{\text{разлад}}$ обнаружения разладки случайных процессов [10] (результат сравнения — данные $Q_{\text{ТМИ_разлад}}$);

3.1. Если разладка выходит за пределы допуска, то $Q_{\text{ТМИ_разлад}} = Q_{\text{ТМИ}_0}$, $Q_{\text{ТМИ}_1} := Q_{\text{ТМИ}_0}$ (знак «:=» означает «присваивают значения»);

3.2. Если разладка находится в пределах допуска, то $Q_{\text{ТМИ_разлад}} = Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$;

4. Формируют данные $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр}}$ «прореживанием» данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$ ($Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр}} = \{Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стаци}}, Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестаци}}\}$, где данные $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стаци}}$ ориентированы на состояние $s_{\text{стаци}}$, а $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестаци}}$ — на $s_{\text{нестаци}_i}$ (1), причем

4.1. Осуществляют интерполирование данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стаци}}$, получая при этом данные $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стаци_интер}}$;

4.2. Осуществляют сравнение данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стаци_интер}}$ и $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$;

4.2.1. Если обеспечивается требуемая точность интерполяции, то $Q_{\text{ТМИ}_1} := Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стаци}}$;

4.2.2. Если точность интерполяции хуже требуемой, то $Q_{\text{ТМИ}_1} := Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестаци}}$.

Примечание: действия прекращают, если сформированы данные $Q_{\text{ТМИ}_1}$ ($Q_{\text{ТМИ}_1}$ — выходные данные).

Рассмотрены особенности, касающиеся осуществления методов $Met_{\text{разлад}}$ обнаружения разладки [10], с целью идентификации состояния $s_{\text{ав}}$ (1) ТМП. В частности, рассмотрены следующие признаки разладки:

– повышенная степень динамичности телеметрируемого параметра, свидетельствующая о возможной полетной аварии:

$$\Delta U_i(\Delta t) < \Delta U_{i_max}, \quad (4)$$

где ΔU_i — разница значений i -го ТМП за время Δt , ΔU_{i_max} — максимальное ожидаемое значение ΔU_i при безаварийном функционировании телеметрируемого объекта;

– выход значений ТМП за границы 0% и/или 100% шкалы его измерений (см. рис. 1, 2, 4):

$$U_i(t_j) < U_{0\%}, \quad U_i(t_j) > U_{100\%}, \quad (5)$$

где $U_i(t_j)$ — значение i -го ТМП в момент времени t_j ;

$U_{0\%}$ ($U_{100\%}$) — значение шкалы измерений 0% (100%) i -го ТМП;

– характеристики разладки, вычисленные с использованием известных [10] научно-методических основ построения методов $Met_{\text{разлад}}$ определения скачкообразных изменений среднего значения сигнала.

Следует заметить, что вышеупомянутые [10] методы $Met_{\text{разлад}}$ ориентированы на разнообразное поведение параметров системы и предназначены для идентификации ее различных состояний. Они развиты и применены в отечественной телеметрии [11, 12 и др.]. При этом сохранены их свойства относительной универсальности, обусловленные учетом разнообразного поведения ТМП и необходимостью идентификации относительно многочисленных состояний телеметрируемого объекта.

Акценты сделаны [11, 12] на скачки значений наблюдаемых ТМП, не выходящие за допустимые (за ожидаемые) пределы, характеризующие особенности функционирования *телеметрируемого объекта*. Описанные [10–12] методы $Met_{разлад}$ относительно сложны (требуют значительного объема вычислений), что влечет весьма жесткие ограничения, связанные с их осуществлением, критичные для условий размещения относящихся к ним ПТС на *телеметрируемом объекте* (в случае решения настоящей задачи). Рассмотренные [11, 12] методы $Met_{разлад}$ предназначены для реализации в наземных ПТС.

Предназначенные для решения настоящей задачи методы $Met_{разлад}$ нацелены прежде всего на идентификацию состояний $s_{ав}$ (1) отдельных ТМП. Однако использование для этого более простых критериев (4) и (5) при осуществлении алгоритма $A_{предобр_ТМИ}$ не исключает ошибочную идентификацию состояний $s_{ав}$ (1) в количестве $N_{предобр_ТМИ_ош_ав}$ ТМП при случайных отказах элементов БРТС в произвольные моменты времени при безаварийном функционировании *телеметрируемого объекта* (см., например, рис. 1, 3). Последствия такой ошибочной идентификации — формирование избыточных данных телеизмерений (т. к. $f_{опр_ав_i} \gg f_{опр_нестца_i}$ (2), $i = 1, 2, \dots, N_{предобр_ТМИ_ош_ав}$), причем за короткий промежуток времени развития полетной аварии [1]. Поэтому нужно стремиться, чтобы в полетное время выполнялось следующее условие:

$$N_{предобр_ТМИ_ош_ав} \sim 0. \quad (6)$$

Уменьшение $N_{предобр_ТМИ_ош_ав}$ (с целью выполнения условия (6)) возможно постоянным диагностированием исправности элементов БРТС в полетное время и своевременным исключением ТМП, относящихся к отказавшим элементам БРТС (см., например, рис. 1, 3), из множества ТМП, относящихся к данным телеизмерений, выбранным для обработки по алгоритму $A_{предобр_ТМИ}$:

$$M_{ТМП_отк_k} \not\subset M_{предобр_ТМИ}, \quad (7)$$

где $M_{ТМП_отк_k}$ — множество ТМП, относящихся к отказавшему (k -му) элементу БРТС (например, к k -му ЛК);

$M_{предобр_ТМИ}$ — множество ТМП, относящихся к данным телеизмерений, выбранным для предобработки по алгоритму $A_{предобр_ТМИ}$.

Информацию об исправности/неисправности элементов БРТС целесообразно использовать не только при определении состава ТМП множества $M_{предобр_ТМИ}$ в полетное время (не только для выполнения условий (6) и (7)), но и для последующего анализа функционирования БРТС. Чтобы не потерять эту ТМИ, соответствующие данные телеизмерений, например, о состоянии k -го ЛК должны передаваться по каналам j -го и/или m -го ЛК, а j -го ЛК — по каналам k -го и/или m -го ЛК ($k \neq j$, $k \neq m$); данные телеизмерений о состоянии r -го комплекта БРТС — через l -й комплект ($r \neq l$).

Из практического опыта следует, что доля случайно отказавших в полетное время отдельных элементов датчикообразующей аппаратуры (отдельных датчиков) при безаварийном функционировании *телеметрируемого объекта* (типа отказа датчика, показанного на рис. 4) мала по сравнению с общим количеством датчиков, установленных на *телеметрируемом объекте*. Поэтому возможны ситуации, когда разработчики СИТО_{СВ} будут исходить из безусловного выполнения условия (6), полагая издержки от ошибочных идентификаций состояний $s_{ав}$ (1), связанные со сформированными избыточными и бесполезными данными телеизмерений, незначительными.

Так как в множество $M_{предобр_ТМИ}$ (7) не нужно включать все ТМП *телеметрируемого объекта*, то актуален предварительный (дополетный) отбор ТМП в его состав. Для этого необходим анализ сущностей развития возможных полетных аварий с учетом выявленных потенциальных эпицентров аварий, местоположения отдельных (конкретных) датчиков на *телеметрируемом объекте* и т. д. [1] (такая задача выходит за рамки настоящей работы).

В то же время имеются возможности сужения множества $M_{предобр_ТМИ}$ (7) путем более полного учета особенностей некоторых ТМП и соответствующих им элементов датчикообразующей аппаратуры. Предобработка данных телеизмерений ряда ТМП по алгоритму $A_{предобр_ТМИ}$ не требуется, в частности:

– в случае применения ФНЧ для ограничения полосы спектра частот *первичного сигнала* [2]

(такое ограничение обычно применяют для вибропараметров) максимальная скорость изменения ΔU_{i_max} (4) ограничена полосой пропускания этого ФНЧ, в этом случае критерий (4) не годится (рис. 8);

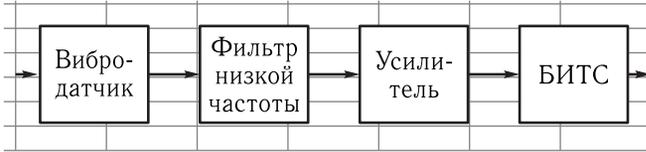


Рис. 8. Схема подключения вибродатчика, иллюстрирующая ограничение частоты спектра первичного сигнала полосой пропускания фильтра низких частот

– исходя из сущностей контактных (сигнальных) датчиков, для соответствующих им телеметрируемым параметрам критерии (4), (5), а также описанные [10] методы $Met_{разлад}$ определения скачкообразных изменений среднего значения сигнала не годятся.

В отдельном блоке данных, формируемом БИТС, могут находиться данные телеизмерений отдельного (i -го) ТМП, соответствующие только одному состоянию из множества $s_{ид_i}$ (1), в количестве или $N_{БД_стац_i}$, или $N_{БД_нестац_i}$, или $N_{БД_ав_i}$. При этом желательно, чтобы скорость $v_{БИТС_ус}$ поступления данных телеизмерений с выхода усовершенствованной БИТС (в ней реализован алгоритм $A_{предобр_ТМИ}$) была не больше скорости $v_{БИТС_сущ}$ существующей (традиционно применяемой) БИТС:

$$v_{БИТС_ус} \leq v_{БИТС_сущ} \quad (8)$$

и – соответственно – не больше объемы $V_{БД_ус}$ и $V_{БД_сущ}$ блоков данных, формируемых БИТС:

$$V_{БД_ус} \leq V_{БД_сущ} \quad (9)$$

Один из способов формирования данных $Q_{ТМИ_ФНЧ}$ и $Q_{ТМИ_разлад}$ связан с использованием метода скользящего окна. При этом количество $N_{окно_ФНЧ_i}$ данных телеизмерений i -го ТМП, характеризующее размер окна при формировании данных $Q_{ТМИ_ФНЧ}$, выбирают из условия $F_{ФНЧ} = F_{нестац}$ (см. выше п. 2 описания алгоритма $A_{предобр_ТМИ}$), а количество $N_{окно_разлад_i}$ данных телеизмерений i -го ТМП, характеризующее размер

окна при формировании данных $Q_{ТМИ_разлад}$, может быть равным $N_{окно_ФНЧ_i}$:

$$N_{окно_разлад_i} = N_{окно_ФНЧ_i} \quad (10)$$

При функционировании алгоритма $A_{предобр_ТМИ}$ накапливаемые данные задержаны с учетом поправки на осуществление методов скользящего окна (рис. 9). Сглаженные данные $Q_{ТМИ_ФНЧ}$ (их скорость следования соответствует частоте опроса датчика $f_{опр_ав_i}$ (2)) прореживают в $N_{прореж_стац_i}$ и в $N_{прореж_нестац_i}$ раз, получая при этом данные $Q_{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}$ и $Q_{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац}$ (см. выше описание алгоритма $A_{предобр_ТМИ}$). Скорости следования данных $Q_{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}$ и $Q_{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац}$ соответствуют частотам опроса датчика $f_{опр_стац_i}$ и $f_{опр_нестац_i}$ (2):

$$\begin{aligned} f_{опр_стац_i} &= f_{опр_ав_i} / N_{прореж_стац_i}, \\ f_{опр_нестац_i} &= f_{опр_ав_i} / N_{прореж_нестац_i}. \end{aligned} \quad (11)$$

Одновременно с накоплением сформированных данных $Q_{ТМИ_ФНЧ_опр_стац_i}$ и $Q_{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац_i}$ решается задача накопления и идентификации аварийного состояния $s_{ав_i}$ (1) i -го ТМП (возможно использование данных телеизмерений скользящего окна $N_{окно_разлад_i}$, выбранных с учетом условия (10)).

Пусть характеристики разладки связаны с критерием (с условием) (5). Положим также, что состояние $s_{ав_i}$ (1) i -го ТМП оказывается идентифицированным в случае

$$N_{окно_вне_i_k} > N_{окно_вне_i_доп}, \quad (12)$$

где $N_{окно_вне_i_k}$ – количество данных телеизмерений, относящихся к скользящему окну, значения которых выходят за пределы $U_{0\%}$ и $U_{100\%}$ (5); k – текущий номер смещения окна (за один такт смещения окно смещается на одно данное телеизмерений);

$N_{окно_вне_i_доп}$ – допустимое для безаварийного состояния количество данных $N_{окно_вне_i_k}$ среди $N_{окно_разлад_i}$.

Если при k -м смещении окна выполняется условие (12), то накопленные в течение передачи j -го блока данные телеизмерений передают в течение передачи данных $(j + 1)$ -го блока (см. рис. 9).

Накопление формируемых данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}}$	Интерполирование данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}}$ и получение данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац_интер}}$	Сравнение данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац_интер}}$ и $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$ и выдача данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}}$, если обеспечивается требуемая точность интерполяции	Передача выходных данных ($Q_{\text{ТМИ_1}} := Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}}$)
Накопление формируемых данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац}}$	Хранение накопленных данных $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац}}$ и их выдача для последующей передачи, если не обеспечивается требуемая точность интерполяции		Передача выходных данных ($Q_{\text{ТМИ_1}} := Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац}}$)
Накопление данных $Q_{\text{ТМИ_0}}$ и одновременное сравнение их с данными $Q_{\text{ТМИ_ФНЧ}}$ по методу $Met_{\text{разлад}}$ обнаружения разладки	Передача выходных данных $Q_{\text{ТМИ_1}}$ ($Q_{\text{ТМИ_1}} := Q_{\text{ТМИ_0}}$), если разладка вне пределов допуска		
Передача текущего j -го блока данных	Передача текущего $(j + 1)$ -го блока данных		Передача текущего $(j + 2)$ -го блока данных

Рис. 9. Циклограмма накопления и предобработки поступающих данных телеизмерений по алгоритму $A_{\text{предобр_ТМИ}}$

Следует заметить, что если $f_{\text{опр_нестац}_i}$ — обычно устанавливаемая частота опроса i -го датчика, то в случае частоты $f_{\text{опр_стац}_i}$ объем выходных данных телеизмерений i -го ТМП уменьшится (см. (11)) в $K_{\text{сж_стац}_i}$ раз:

$$K_{\text{сж_стац}_i} = N_{\text{прореж_стац}_i} / N_{\text{прореж_нестац}_i} = f_{\text{опр_нестац}_i} / f_{\text{опр_стац}_i}, \quad (13)$$

а в случае частоты $f_{\text{опр_ав}_i}$ — увеличится в $1/K_{\text{сж_ав}_i}$ раз ($K_{\text{сж_ав}_i} < 1$):

$$K_{\text{сж_ав}_i} = f_{\text{опр_нестац}_i} / f_{\text{опр_ав}_i}. \quad (14)$$

Если исходить из кратковременности развития аварийной ситуации [1] (и, соответственно, кратковременности влияния условия (14) на выбор частоты опроса i -го датчика), то условия (8) и (9) выполнимы. Однако для их выполнения необходимо относительно оперативно идентифицировать состояние устойчивого послеаварийного метрологического отказа (см., например, рис. 6), когда значения данных телеизмерений i -го ТМП находятся вне диапазона измерений (5) и они уже не несут информации пользователю (анализатору). (Такая задача выходит за рамки настоящей работы.)

Ниже представлен пример, поясняющий формирование выходных данных $Q_{\text{ТМИ}_1}$ ($Q_{\text{ТМИ}_1} := Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_стац}}$, $Q_{\text{ТМИ}_1} := Q_{\text{ТМИ_ФНЧ_опр_нестац}}$, $Q_{\text{ТМИ}_1} := Q_{\text{ТМИ}_0}$) в соответствии с рассмотренным выше способом формирования.

Пусть длительность $T_{\text{БД}}$ блока данных, формируемого БИТС, составляет 80 мс (субкадр отчетственной БИТС типа БРС-4, $T_{\text{БД}} = 80$ мс), данные телеизмерений представлены в виде восьмибитовых слов, частота опроса i -го ТМП $f_{\text{опр_нестац}_i} = 100$ Гц.

Положим $N_{\text{прореж_стац}_i} = 16$ и $N_{\text{прореж_нестац}_i} = 4$ (11). Это означает, что $f_{\text{опр_стац}_i} = 25$ Гц, $f_{\text{опр_ав}_i} = 400$ Гц (11); $N_{\text{БД_стац}_i} = 2$, $N_{\text{БД_нестац}_i} = 8$, $N_{\text{БД_ав}_i} = 32$.

Тогда для передачи выходных данных телеизмерений i -го ТМП при возникновении аварийной ситуации ($s_{\text{ав}_i}$ (1)) понадобится, если не увеличивать количество телеметрических каналов для их передачи и выполнить при этом условия (8) и (9), в 4 раза больше времени ($4T_{\text{БД}}$) по сравнению с временем передачи $T_{\text{БД}}$ одного блока данных (при $s_{\text{нестац}_i}$ (1)). Такое увеличение времени передачи данных (до $4T_{\text{БД}}$) может оказаться приемлемым ввиду кратковременности влияния условия (14) на выбор частоты опроса i -го датчика (см. выше).

Возможен также подход, заключающийся в более полном использовании преимуществ компактного представления данных телеизмерений формированием $N_{\text{БД_стац}_i}$, суть которого описана формульным выражением

$$n_{\text{ТМП}} N_{\text{БД_нестац}_i} = N_{\text{БД_ав}_i} + n_{\text{ТМП}} N_{\text{БД_стац}_i},$$

из которого следует:

$$n_{\text{ТМП}} = N_{\text{БД_ав_}i} / (N_{\text{БД_несжат_}i} - N_{\text{БД_сжат_}i}), \quad (15)$$

где $n_{\text{ТМП}}$ — количество датчиков (количество ТМП) с частотой опроса $f_{\text{опр_несжат_}i}$, причем получаемое от этих датчиков в течение времени $T_{\text{БД}}$ количество данных телеизмерений такое же, как и суммарное количество данных телеизмерений, получаемое в течение времени $T_{\text{БД}}$ от $n_{\text{ТМП}}$ датчиков с частотой опроса $f_{\text{опр_сжат_}i}$ и от одного датчика с частотой опроса $f_{\text{опр_ав_}i}$.

Если следовать представленному выше примеру, то $n_{\text{ТМП}} = 6$ ($n_{\text{ТМП}} = 32 : (8 - 2) \approx 5,3$). При этом с целью большего уплотнения данных телеизмерений возможно пропорциональное увеличение группируемых данных телеизмерений, в частности в 3 раза. Тогда (см. (15)) в одном блоке данных (в одном субкадре) могут быть размещены данные телеизмерений 16 датчиков с частотой опроса $f_{\text{опр_сжат_}i}$ и 3 датчиков с частотой опроса $f_{\text{опр_ав_}i}$.

В случае идентификации аварийного состояния $s_{\text{ав_}i}$ (1) i -го ТМП при, положим, k -м смещении скользящего окна (12) целесообразно сократить объем выходных данных использованием, в частности более коротких кодовых комбинаций, чем для остальных данных, для представления данных телеизмерений, значения которых выходят за границы $U_{0\%}$ и $U_{100\%}$ (5).

Возможности вышеупомянутого уменьшения избыточности выходных данных связаны с важностью констатации факта выхода их значений за пределы диапазона измерений (факта выполнения условия (5)), точность измерений при этом не важна. Поэтому, например, если значение данного меньше $U_{0\%}$, то его можно представить в виде 0, а если больше $U_{100\%}$ — то в виде 1. При выборе $N_{\text{окно_вне_}i_доп}$ (12) достаточно большим по отношению к размеру окна $N_{\text{окно_разлад_}i}$ (10) и к размеру применяемых блоков данных сжатие данных окажется существенным.

Для обеспечения возможности выделения на приемной стороне данных, закодированных «0» и «1», соответствующих событиям «меньше $U_{0\%}$ » и «больше $U_{100\%}$ », а также для выделения остальных данных принятого блока (пусть размер каждого из них составляет 8 битов) предложен (как один из вариантов) способ, заключающийся в ис-

пользовании «нулей» (0) и «единиц» (1) для обозначения признаков вышеупомянутых данных. Например, если значение признака равно 0, то имеем однобитовое данное (оно соответствует событию «меньше $U_{0\%}$ »/«больше $U_{100\%}$ » (5)); если значение признака равно 1, то имеем восьмибитовое данное (для этого данного условие (5) не выполняется).

Так как значение $N_{\text{БД_ав_}i}$ в течение всего полетного времени неизменно, то объем данных вышеупомянутых признаков также не изменяется, а эти данные могут быть размещены в определенном месте блока данных (субкадра).

Если $N_{\text{БД_ав_}i} = 32$ (см. пример выше), то объем данных-признаков равен 32 битам, а объем информационных данных в несжатом виде — $V_{\text{БД_ав_несжат_}i} = 256$ битам (8 битов \times 32 данных = 256 битов).

Пусть $N_{\text{окно_разлад_}i} = N_{\text{окно_ФНЧ_}i} = 32$ (10), а $N_{\text{окно_вне_}i_доп} = 16$ (12). Тогда если среди $N_{\text{БД_ав_}i}$ данных телеизмерений находится $N_{\text{окно_вне_}i_доп}$ данных, для которых выполняется условие (5), и объем данных-признаков составляет $N_{\text{БД_ав_}i}$ битов, то после их компактного представления их объем $V_{\text{БД_ав_сжат_}i}$ (включая объем данных-признаков) составит 176 битов ($V_{\text{БД_ав_сжат_}i} = 8$ битов \times 16 данных + 1 бит \times 16 данных + 32 бита = 176 битов), что примерно в 1,5 раза меньше, чем при представлении в несжатом виде ($K_{\text{сжат_ав_}i} = 256 : 176 \approx 1,5$).

В случае компактного представления данных телеизмерений датчика с частотой опроса $f_{\text{опр_ав_}i}$ их количество уменьшится с 32 до 22 (176 битов : 8 битов = 22 данных, см. пример выше), что позволяет соответственно уменьшить количество $n_{\text{ТМП}}$ (15) до четырех ($n_{\text{ТМП}} = 22 : (8 - 2) \approx 3,7$). Причем при увеличении группируемых данных телеизмерений в 3 раза (как это было рассмотрено ранее) в одном блоке данных (в одном субкадре) могут быть размещены данные телеизмерений 11 датчиков с частотой опроса $f_{\text{опр_сжат_}i}$ и 3 датчиков с частотой опроса $f_{\text{опр_ав_}i}$.

Следует заметить, что точность привязки отдельных данных телеизмерений ТМП к временной шкале, формируемой наземными ПТС ТК, составляет примерно ± 7 мс. Исходя из относительно короткого времени развития аварийной ситуации [1]

для получения необходимых сведений о хронологии ее развития нужно соответствующим образом упорядочить данные телеизмерений отдельных ТМП в блоке данных, формируемом в БИТС, т. е. нужно установить местоположение этих данных телеизмерений, согласованное с хронологией развития полетной аварии.

Выводы

– Представленные результаты исследования, касающиеся уменьшения потерь телеметрической информации при возникновении полетной аварии, приводящей к метрологическим отказам датчико-преобразующей аппаратуры и элементов бортовой радиотелеметрической системы, позволяют существенно улучшить общие (обобщенные) показатели эффективности системы информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения;

– разработанный алгоритм предобработки данных телеизмерений актуален для совершенствования разработанных ранее стратегий управления избыточностью данных телеизмерений, обеспечивающих построение рациональных систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения;

– показанные способы компактного представления выходных данных телеизмерений, сформированных с использованием разработанного алгоритма предобработки, в дальнейшем целесообразно использовать при решении задач развития вышеупомянутых стратегий управления избыточностью данных телеизмерений;

– полученные результаты настоящего исследования базируются на результатах анализа практических случаев метрологических отказов датчико-преобразующей аппаратуры и элементов бортовой радиотелеметрической системы, что в значительной мере способствует обеспечению их достоверности и обоснованности.

Список литературы

1. *Воронцов В. Л.* Система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения. Стратегии совершенствования и применения. М.: Горячая линия–Телеком, 2021. 236 с.
2. ГОСТ 19619-74. Оборудование радиотелеметрическое. Термины и определения. М., 1988. 26 с.
3. *Мороз В. И.* Адаптация к метрологическому состоянию измерительных систем при оперативном контроле объектов // Межотраслевой научно-технический сборник, сер. «Контроль и диагностика», 1991, вып. № 2. С. 44–50.
4. *Васильев В. В., Мороз В. И., Рогатовский И. П.* Управление метрологическим состоянием телеметрических радиотехнических средств. В сб.: Информационные сети, системы и методы / Под общ. ред. О. П. Новикова. М.: Военная академия имени Ф. Э. Дзержинского, 1996. С. 213–215.
5. *Ольховский Ю. Б., Новоселов О. Н., Мановцев А. П.* Сжатие данных при телеизмерениях / Под ред. В. В. Чернова. М.: Сов. радио, 1971. 304 с.
6. *Воронцов В. Л.* Возможности алгоритма преобразования первичных сигналов в бортовой информационно-телеметрической системе // Приборы и системы управления, 1998, № 8. С. 68–71.
7. *Артемов В. Ю., Воронцов В. Л.* Анализ точностных возможностей алгоритма преобразования первичных сигналов в бортовой информационно-телеметрической системе // Измерительная техника, 2012, № 1. С. 20–23.
8. Lossless Data Compression, Recommendation for Space Data System Standards CCSDS 121.0-B-1, Issue 1, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, May 1997.
9. Lossless Data Compression, Report Concerning Space Data System Standards CCSDS 120.0-G-1, Issue 1, Green Book, Consultative Committee for Space Data Systems, May 1997.
10. *Бассвиль М., Вилски А., Банвенист А. и др.* Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем. Под ред. М. Бассвиль, А. Банвениста / Пер. с англ. И. Б. Вильховченко и др. М.: Мир, 1989. 278 с.
11. *Каргин В. А., Скороходов Я. А., Николаев Д. А., Шовкалюк А. П.* Алгоритмы оценивания вероятностных характеристик информационных процессов по статистикам превышений уровней // Труды МАИ, 2015, вып. 84. С. 1–21.
12. *Андреев А. М., Дяченко С. И., Махров К. Б., Федоренко М. Ю.* Экспериментальное исследование метода обнаружения существенных изменений в телеметрируемых параметрах. Тезисы доклада в материалах отраслевой НТК приборостроительных организаций Роскосмоса «Информационно-управляющие и измерительные системы-2012», Королев, 2012. С. 11–13.