

## Построение прототипа экспертно-диагностической системы анализа траекторной измерительной информации КА

**В. К. Ларин**

*к. т. н., АО «Российские космические системы»*

*e-mail: larin\_vk@risde.ru*

**Аннотация.** В статье представлена технология построения прототипа экспертно-диагностической системы (ЭДС) анализа траекторной измерительной информации. Основной функцией ЭДС является выявление и последующее удаление аномальных измерений и формирование массива корректной информации для дальнейшего использования в цикле расчетов баллистико-навигационного обеспечения (БНО). В качестве основного инструмента анализа принята фильтрация — последовательное сравнение каждого измерения с системой критериев (фильтров), значения которых определяются на основе технических характеристик КА данного типа и параметров среды, в которой проводились измерения. Предлагаемый проект ЭДС позволяет производить достаточно качественную выборку аномальных измерений из информационных массивов для большинства видов траекторной информации и может использоваться в цикле расчетов БНО управления КА.

**Ключевые слова:** экспертно-диагностическая система, фильтрация, траекторная измерительная информация

## Building of a Prototype of Expert-Diagnostic System for the Analysis of Spacecraft Flight Path Measurement Information

**V. K. Larin**

*candidate of engineering science, Joint Stock Company “Russian Space Systems”*

*e-mail: larin\_vk@risde.ru*

**Abstract.** The article presents the technology of building of a prototype expert-diagnostic system (EDS) for analysis of flight path measurement information. The main function of the EDS is the identification and subsequent removal of abnormal measurements and the formation of a collection of correct information for further use in the cycle of ballistic and navigational support (BNO) calculations. The main analysis tool is filtering — a sequential comparison of each measurement with the system of criteria (filters), the values of which are determined based on the technical characteristics of the spacecraft of this type and the parameters of the medium in which the measurements were made. The proposed EDS project allows producing of a high-quality sample of abnormal measurements from the data collections for most types of flight path information and can be used in the BNO calculation cycle for spacecraft control.

**Keywords:** expert-diagnostic system, filtration, flight path measurement information

## Введение

Основной задачей БНО является определение элементов орбиты КА по траекторным измерениям (ТИЗ). В зависимости от функционального назначения КА выбирается определенный вид ТИЗ (дальность, радиальная скорость, углы и т. д.), что реализуется в настройках программных комплексов БНО. В этом случае использование данного ПК для обеспечения КА другого типа потребует перенастройки соответствующей программы обработки ТИЗ.

Предлагаемый вариант прототипа ЭДС позволяет производить предварительную обработку ТИЗ для КА различных типов, не изменяя схемы решения. Для практического использования ЭДС необходимо ввести в архив ИД (блок ЭДС, рис. 1) количественные значения фильтров (документация Главного конструктора изделия).

Основополагающие принципы проектируемой системы сводятся к следующему.

Под функцией анализа траекторной измерительной информации будем понимать отбор аномальных измерений (АИ), не удовлетворяющих по своим значениям заданным критериям.

Процедуру выбора АИ будем называть фильтрацией.

Полный цикл выбора состоит из последовательного проведения измерений через систему фильтров, значения которых определяются техническими характеристиками КА и физическими условиями проведения измерений.

Измерительная информация, полученная по одному КА в зоне одного измерительного пункта, называется сеансом.

В окончательную обработку траекторных измерений для определения параметров орбиты КА поступает информация в виде нескольких сеансов, называемых циклом радиоконтроля орбиты (РКО).

«Сырые» (не обработанные) измерения одного цикла РКО несут в себе различного рода погрешности, возникающие вследствие неточной работы бортовой и наземной аппаратуры, а также погрешностей в параметрах среды прохождения сигнала.

С некоторыми допущениями можно принять, что условия, порождающие эти погрешности, для временных и пространственных рамок одного цикла

РКО одинаковы. Это позволяет построить диагностическую систему анализа в виде последовательности фильтров для одного сеанса, используя тот же алгоритм и для других сеансов.

Поскольку физическая природа погрешностей в измерениях не дает возможности описания их аналитическими зависимостями, то в качестве инструмента анализа выбрана ЭДС, которая, используя систему фильтров, позволяет достаточно корректно получить решение по сути неформальной задачи выбора аномальных измерений.

## Постановка задачи

### Предварительные замечания

1. ЭДС строится для анализа одного сеанса измерений.

2. Количество фильтров и их числовые значения приведены в символьном виде, поскольку они не привязаны к конкретному типу КА.

3. Обязательным условием сохранения сеанса измерений для дальнейшего использования определения орбиты КА является следующее утверждение: количество оставшихся после каждого этапа фильтрации нормальных измерений в сеансе не должно быть меньше заданного числа.

4. В качестве вида представления знаний в базе знаний проектируемой ЭДС выбрана продукционная модель.

5. Последовательность использования фильтров определяется их индексом.

6. Погрешности измерений носят систематический и случайный характер. Систематическая составляющая определяется аналитическими зависимостями, случайная — с помощью фильтров.

7. Последовательность построения ЭДС соответствует структурной схеме, приведенной на рис. 1.

8. Условия проведения измерений для всех сеансов исходного цикла РКО равные.

### Исходные данные

$P_1 \dots P_{N_k}$  — измеряемый параметр (дальность, фаза, угол и т. д.);

$N_k$  — начальное число измерений в сеансе;

$F_1, F_2, \dots, F_n$  — фильтры измерений;

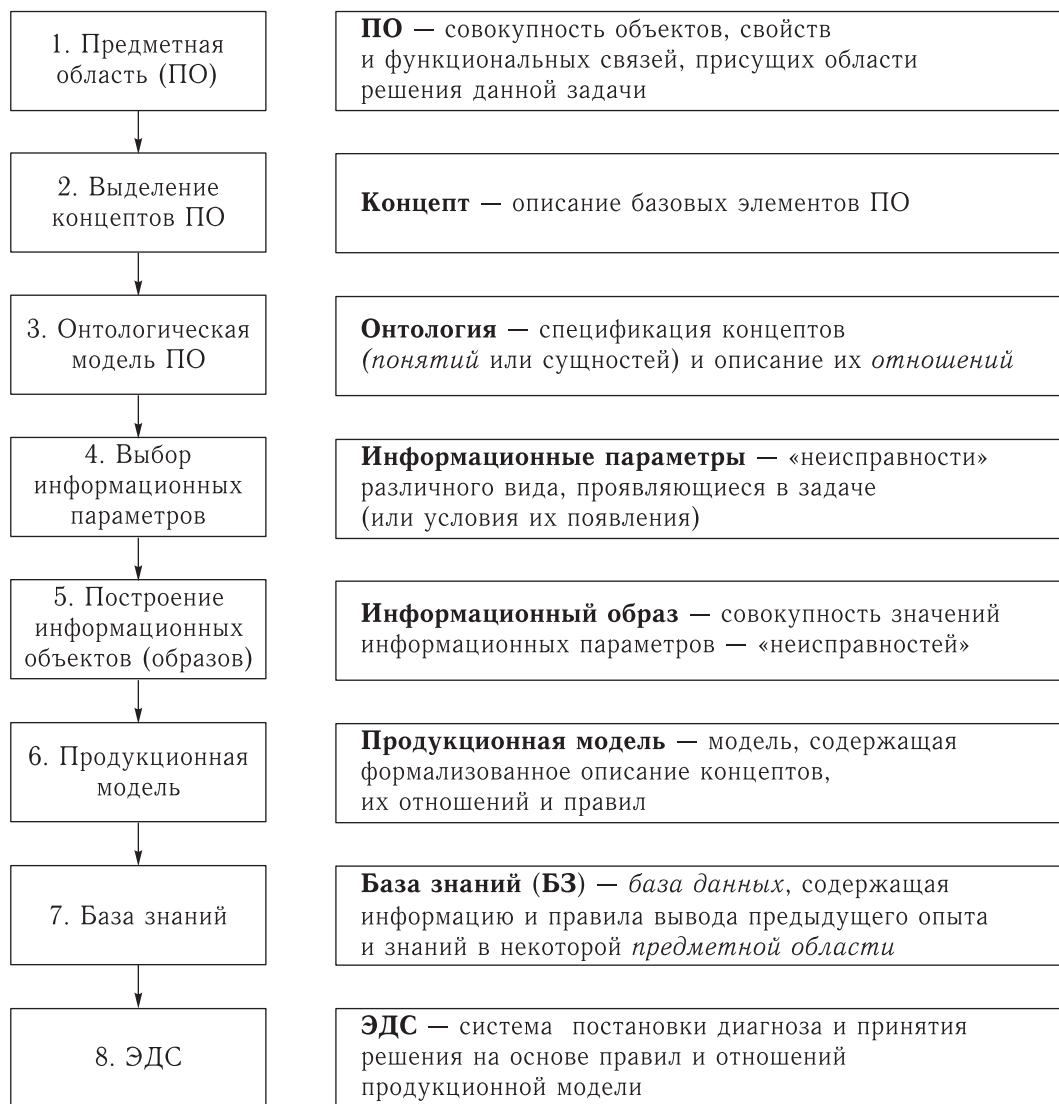


Рис. 1. Структурная схема построения ЭДС

$Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  — фильтры условий измерений;  
 $n$  — допустимое минимальное число измерений в сеансе.

$M_j$  — число сеансов в цикле РКО.

Поставим задачу разработать прототип ЭДС, позволяющий производить определение и отбор аномальных измерений из массива измерений одного сеанса.

На рис. 1 представлена технологическая схема построения ЭДС в виде последовательно расположенных блоков с названиями этапов разработки системы. Справа от схемы приведены определения основных понятий, используемых в работе [1].

## Описание блоков

### 1. Предметная область (ПО)

Предметную область задачи фильтрации измерительной информации составляют следующие данные:

- $M_j$  — число сеансов в цикле РКО;
- $N_k$  — начальное число измерений в сеансе;
- $P_k$  — измеряемый параметр;
- $q_k$  — измеренные характеристики условий измерений;
- $F_1, F_2, \dots, F_n$  — фильтры измерений;
- $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  — фильтры условий измерений;
- $S = 0,6 \cdot N_k$  — условие отбора сеанса.

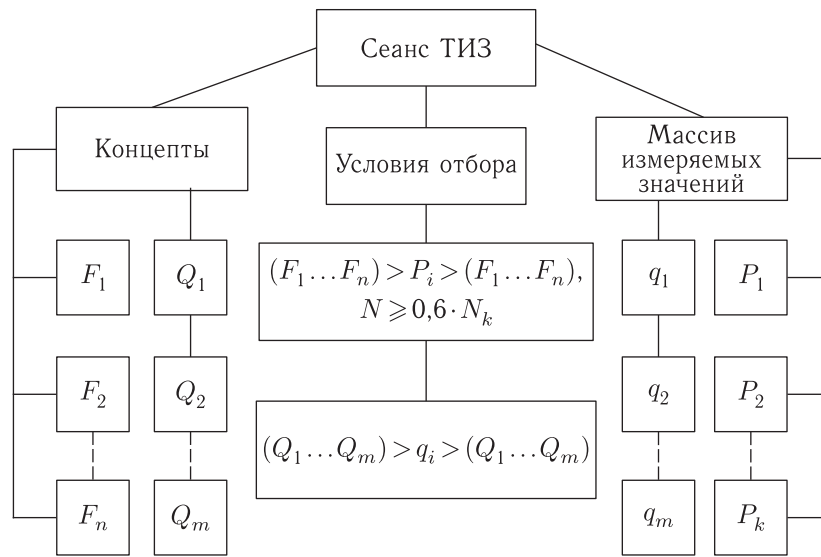


Рис. 2. Онтологическая модель

## 2. Выделение концептов ПО

В качестве концептов ПО можно выделить следующие данные:

$F_1, F_2, \dots, F_n$  — значения фильтров измерений — определяются в зависимости от функциональных характеристик КА;

$Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  — значения фильтров условий измерений — определяются по характеристикам условий проведения измерений (среда, аппаратура).

Условия отбора аномальных измерений:

$P_k \geq (F_1, F_2, \dots, F_k)$  или  $P_k \leq (F_1, F_2, \dots, F_k)$  — в зависимости от физического смысла фильтра;

$q_k \geq (Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  или  $q_k \leq (Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$  — в зависимости от физического смысла фильтра;

$S$  — условие отбора сеансов.

## 3. Онтологическая модель ПО

В соответствии с указанным выше определением представим онтологию предметной области в виде схемы (рис. 2).

## 4. Выбор информационных параметров

Для формирования информационных параметров представим измерение (для случая дальности) в следующем виде:

$$P_k = D + \Delta P_{\text{сис}} + \Delta P_{\text{сл}},$$

где  $D = \tau_p c$  — геометрическая дальность до КА;

$\Delta P_{\text{сис}}$  — систематическая составляющая погрешности измерения;

$\Delta P_{\text{сл}}$  — случайная составляющая погрешности измерения.

$$\Delta P_{\text{сис}} = I_1 + \Delta D_{\text{trop}} + \Delta D_{\text{rot}} - \Delta D_{\text{pcsat}} - \Delta D_{\text{pcrecl}} - \Delta D_{\text{marker}} + \Delta D_{\text{grav}},$$

где  $I_1$  — задержки, обусловленные влиянием ионосферы;

$\Delta D_{\text{trop}}$  — поправка на задержку распространения сигнала в тропосфере;

$\Delta D_{\text{rot}}$  — поправка на вращение Земли за время распространения сигнала;

$\Delta D_{\text{pcsat}}$  — поправка на смещение фазового центра антенны НКА относительно центра масс НКА;

$\Delta D_{\text{pcrecl1}}, \Delta D_{\text{pcrecl2}}$  — поправка на смещение фазового центра приемника относительно ARP-точки антенны;

$\Delta D_{\text{marker}}$  — поправка, вызванная смещением ARP-точки антенны относительно координат станции;

$\Delta D_{\text{grav}}$  — релятивистская поправка.

$$\Delta P_{\text{сл}} = F(\delta 1 + \delta 2 + \dots + \delta n),$$

где  $\delta 1, \delta 2, \dots, \delta n$  — значения фильтров для выявления аномальных измерений, обусловленных случайными факторами (ошибками в параметрах

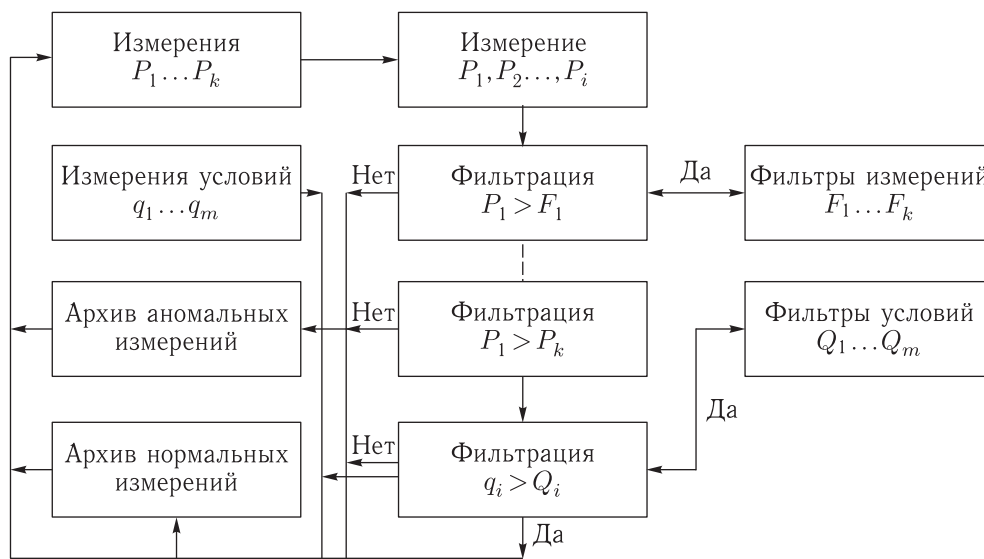


Рис. 3. Информационный образ

Таблица 1. Информационные параметры

Концепт	Информационный параметр (ИП)	Примечание
$F_1$	$\Delta P_{\text{сис}}$	Систематическая составляющая
$F_2$	$\delta 1$	Значение фильтра
$F_3$	$\delta 2$	– « –
..	..	– « –
..	..	– « –
$F_n$	$\delta n$	– « –
$Q_1$	$\delta 11$	– « –
$Q_2$	$\delta 22$	– « –
..	..	..
$Q_m$	$\delta m m$	– « –
$S$	$\delta N = 1 - \frac{n_{\text{аном}}}{n_{\text{изм}}}$	$1 - \frac{n_{\text{аном}}}{n_{\text{изм}}} < 0,6$

аппаратуры, в среде прохождения сигнала, в условиях приема сигнала, его характеристиках и т. д.).

## 5. Построение информационного образа (ИО)

Процедура создания ИО каждой неисправности (в частности, аномальных измерений) может

быть определена на основе составления диагностических правил (ДП), определяющих схему отбора аномальных измерений [2].

ДП представляют собой последовательное применение фильтров к каждому измерению сеанса с проверкой на достаточность количества оставшихся измерений после исключения аномальных, как необходимого условия продолжения дальнейшей фильтрации измерений данного сеанса или перехода к анализу измерений другого сеанса.

Информационный образ анализа измерительной информации на примере одного измерения представлен на рис. 3.

Информационный образ ( $I_k$ ) представляет собой процедуру отбора аномальных измерений.

В случае если измерение является аномальным (соответствие одному из фильтров), вырабатывается комментарий «Нет» и измерение заносится в архив аномальных измерений, в противном случае вырабатывается комментарий «Да» и измерение заносится в архив нормальных измерений.

## 6. Продукционная модель (ПМ)

Продукционная модель (ПМ) — модель, основанная на правилах, представляющих знания в виде предложений типа «Если (условие), то (действие)» [3]. В данном случае основным элементом продукционной модели является информационный образ, построенный на указанных выше правилах

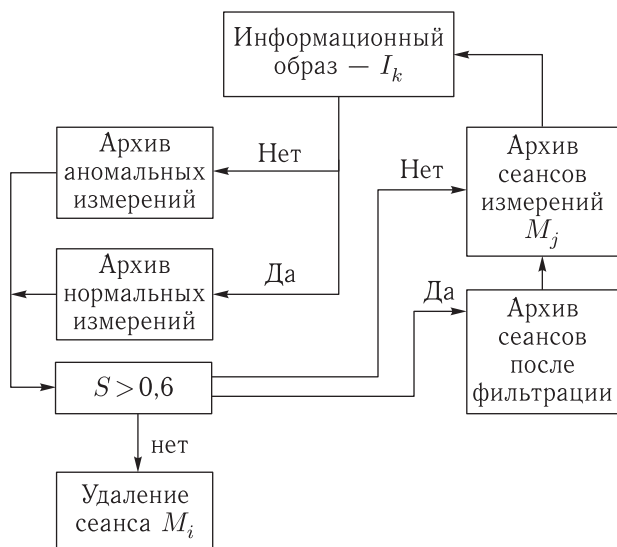


Рис. 4. Продукционная модель

(рис. 3). С учетом этого ПМ представим в виде схемы (рис. 4).

После проверки всех измерений сеанса (см. рис. 3) проверяется условие: соответствие  $S$  (число отфильтрованных измерений) минимуму нормальных измерений в сеансе. В случае выполнении условия сеанс заносится в «Архив сеансов после фильтрации» при соответствующем комментарии «Да». В противном случае вырабатывается комментарий «Нет», при этом сеанс исключается из дальнейшей обработки и функции передаются в блок сеансов (при том же комментарии «Нет») для выбора следующего сеанса измерений и передаче его в  $I_k$ . Действия повторяются, пока не будут проверены все сеансы.

### 7. База знаний (БЗ)

При использовании продукционной модели база знаний состоит из набора правил типа:

«Если (условие), то (действие)» — (А).

С учетом сказанного БЗ может быть представлена совокупностью отношений концептов в виде правил — условий (А), используемых в информационном образе, и продукционной модели [4].

Структурно представим БЗ состоящей из трех блоков:

Блок 1 — Исходные данные.

Блок 2 — Правила.

Блок 3 — Результат.

Блок 1 — Исходные данные.

- $M_j$  — число сеансов в цикле РКО;
- $N_k$  — начальное число измерений в сеансе;
- $P_k$  — измеряемый параметр;
- $q_k$  — фактические характеристики условий измерений (сигнал/шум, угол места, ...);
- $F_1, F_2, \dots, F_n$  — набор фильтров для проверки измерений;
- $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  — набор фильтров для проверки характеристик условий измерений;
- $\delta 1, \delta 2, \dots, \delta n, \delta N$  — значения информационных параметров;
- $S = 0,6 \cdot N_k$  — условие отбора сеанса.

Архивы:

- сеансов измерений цикла РКО,
- измерений одного сеанса,
- аномальных измерений,
- нормальных измерений,
- сеансов измерений после фильтрации.

Блок 2 — Правила.

Представим правила в виде последовательности использования фильтров для отбора аномальных измерений, а также действий, связанных с вводом и выбором из архивов необходимых данных.

Под фильтром  $F_i$  следует понимать действие сравнения соответствующего информационного параметра  $\delta n$  с измеренным параметром ( $P_i$ ) либо характеристикой условий  $q_i$ . Тогда запись вида  $P_i > F_n$  соответствует использованию фильтра для данного измерения или условий измерений —  $q_i > Q_m$ .

Пошаговый алгоритм фильтрации отнесен к измерениям одного сеанса РКО. Обработка измерений других сеансов производится в цикле, выходом из которого является фильтрация измерений последнего сеанса в «Архиве сеансов измерений» цикла РКО.

Шаг 1. Выбор сеанса измерений  $M_i\{P_{1i}, \dots, P_{ki}\}$ .

Шаг 2. Выбор первого измерения сеанса —  $P_{1i}$ .

Шаг 3. Проверка условия  $P_{1i} > F1$  ( $P_{1i} < F1$ ), если «Да», то переход к шагу 4, если «Нет», то занесение  $P_{1i}$  в «Архив аномальных измерений» и возврат к шагу 2.

Шаг 4. Проверка условий  $P_{1i} > F2, \dots, P_{1i} > Fk$ , если «Да», то переход к шагу 5



(для всех значений  $F_i$ ), если «Нет», то занесение  $P_{1i}$  в «Архив аномальных измерений» и возврат к шагу 2.

Шаг 5. Выбор параметров условий измерений —  $q_{1i}$  и их сравнение с соответствующими значениями фильтров условий  $Q_i$ , если «Да», то переход к шагу 6, если «Нет», то занесение  $P_{1i}$  в «Архив аномальных измерений» и возврат к шагу 2.

Шаг 6. После проведения последовательности действий, описанных в шагах 2–5 и соответствующего заполнения блока «Архив аномальных измерений», проверяется условие:  $S > 0,6$ . Если оно выполняется (комментарий «Да»), то сеанс заносится в «Архив сеансов после фильтрации» и команда передается в блок «Архив сеансов измерений» для выбора очередного сеанса и проведения действий по шагам 2–5.

Если условие не выполняется, то текущий сеанс исключается и действие передается в блок «Архив сеансов измерений» для выбора очередного сеанса и фильтрации его измерений.

Цикл обработки заканчивается после фильтрации измерений последнего сеанса  $M_j$ .

#### Блок 3 — Результат.

Результатами выполнения действий по шагам 1–6 являются:

- набор сеансов нормальных измерений в «Архиве сеансов после фильтрации», готовых к использованию для решения краевой задачи;
- номера удаленных сеансов аномальных измерений в блоке «Удаление сеанса  $M_i$ »;
- количество аномальных измерений в каждом сеансе в «Архиве аномальных измерений»;
- количество нормальных измерений в каждом сеансе в «Архиве нормальных измерений».

### 8. Прототип ЭДС фильтрации траекторных измерений

Ниже представлена принципиальная схема построения ЭДС. По сравнению со стандартной схемой [3,5] в ней не отражены такие элементы, как объяснительный компонент и компонент приобретения знаний, так как отсутствие этих частей не влияет на суть предлагаемого варианта решения поставленной задачи.

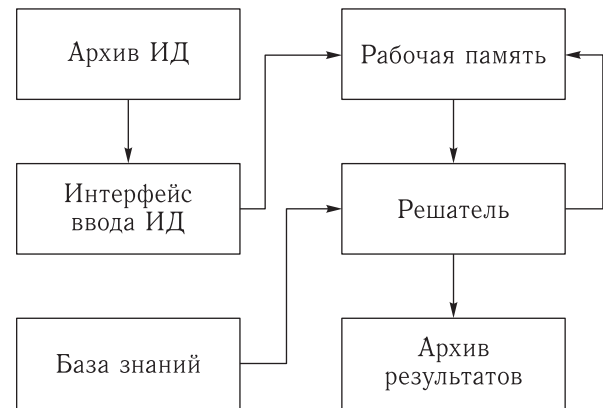


Рис. 5. Принципиальная схема прототипа ЭДС

*Назначение блоков схемы прототипа ЭДС (рис. 5).*

**Архив ИД** содержит данные, приведенные в Блоке 1, с числовыми значениями фильтров измерений и условий их проведения (информационных операторов), для различных типов КА.

**Архив результатов** содержит следующие данные:

- сеансы с отфильтрованными измерениями;
- сеансы с «сырыми» измерениями (до фильтрации);
- номера удаленных сеансов после фильтрации;
- число аномальных измерений в каждом сеансе.

Указанные данные результатов и исходные данные приводятся в форме выдачи результатов расчетов (табл. 2).

**Интерфейс ввода ИД** — осуществляет выбор ИД из архива ИД для заданного тип КА.

**Рабочая память** — предназначена для хранения исходных и промежуточных данных решаемой в текущий момент задачи.

**Решатель** — формирует последовательность правил, применение которых к исходным данным рабочей памяти и знаниям из БЗ, приводят к решению задачи.

## Заключение

По материалам, приведенным в данной статье, можно сделать следующие выводы.

Т а б л и ц а 2. Форма выдачи результатов расчетов

Форма №				Дата расчета		
Тип КА	№ КА	Дата измерений		Время измерений	Вид измерительной информации	
Исходные данные		Результаты				
Обозначение	Значение	Номер сеанса $N_c$	Число измерений $n_n$	Число аномальных измерений $n_{ан}$	$n_{ан}/n_n$	Признак аномальности сеанса $(-/+)^*$
$\delta 1$						
$\delta 2$						
$\dots$						
$\delta n$						
$\delta N$						
$q1$						
$q2$						
$\dots$						
$qk$						
Архивы						
A1	Сеансы измерений	A3	Отфильтрованные сеансы			
A2	Измерения сеанса	A4	Аномальные измерения в сеансах			
		A5	Нормальные измерения в сеансах			

Примечание. (\*) — сеанс аномальный — «-»; сеанс нормальный — «+».

1. Разработан прототип ЭДС, позволяющий производить отбор аномальных измерений в цикле РКО на основе фильтрации измерительной информации.
2. Прототип ЭДС является унифицированным изделием с точки зрения возможности применения для анализа большинства используемых видов траекторной информации.
3. Количественные значения фильтров и их число определяются в зависимости от технических характеристик КА и условий измерений.
4. Данный прототип ЭДС может входить в состав математического обеспечения по расчету баллистико-навигационной информации для управления КА.

## Список литературы

1. Гаврилова Т.А. Использование онтологий в системах управления знаниями. URL: [http://big.spb.ru/publications/bigspb/km/ontol\\_podhod\\_to\\_uz.shtml](http://big.spb.ru/publications/bigspb/km/ontol_podhod_to_uz.shtml)
2. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем / Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2000.
3. Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. М.: КРАСАНД, 2009.
4. Бетанов В.В., Ларин В.К., Позьева З.А. База знаний для программного модуля определения местоположения приемника. В сб. статей ИТМиВТ им. С. А. Лебедева, 2015.
5. Бетанов В.В., Ларин В.К., Позьева З.А. К вопросу анализа причин возникновения сбоев в АКП // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1.