

## **Алгоритмы оценивания вероятностных характеристик информационных процессов по статистикам превышений уровней**

**Каргин В.А.<sup>1\*</sup>, Скороходов Я.А.<sup>1\*\*</sup>, Николаев Д.А.<sup>2\*\*\*</sup>, Шовкалюк А.П.<sup>3\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Ждановская наб., 13; Санкт-Петербург, 197198, Россия*

<sup>2</sup>*СКБ «Орион», ул. Тобольская, 12, Санкт-Петербург, 194044, Россия*

<sup>3</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

*\*e-mail: vic\_kargin@mail.ru*

*\*\*e-mail: yaroslavskor@gmail.com*

*\*\*\*e-mail: nikolaev@skborion.ru*

*\*\*\*\*e-mail: shovalex@yandex.ru*

### **Аннотация**

В работе представлена классификация неоднородностей телеметрической информации ракет-носителей, при которой учитывались как результаты анализа технического состояния объекта контроля, так и статистические свойства информации, поступающей от него. Предложенная классификация структурно-параметрической неоднородности телеметрируемых параметров является первым этапом в создании комплекса моделей и разработки математического аппарата для оперативной обработки телеметрической информации. Представлены аналитические выражения оценивания вероятностных характеристик с использованием алгоритмов подсчета числа пересечений траекторией информационного процесса заданных уровней. Предлагается метод оценивания нелинейных преобразований информационных процессов, основанный на

регистрации числа пересечений реализацией процесса заданных уровней. На основе приведенных аналитических выражений разработаны оригинальные алгоритмы оценивания вероятностных характеристик по статистикам превышений уровней.

**Ключевые слова:** характеристики «превышений уровней», выбросы траекторий случайных процессов, оперативная обработка, телеметрическая информация.

## **Введение**

Системный анализ процессов функционирования автоматизированных систем управления (АСУ) в ракетно-космической отрасли промышленности выявил низкий уровень автоматизации на этапе анализа технического состояния ракет-носителей (РН) по результатам обработки всех видов информации, что приводит к снижению эффективности системы информации о техническом состоянии и надежности ракетно-космических комплексов [1].

Основным источником информации для оценивания технического состояния бортовых систем РН является телеметрическая информация (ТМИ). Практика обработки ТМИ РН показывает, что не выполняются требования по обеспечению заданного уровня достоверности принятия решения о техническом состоянии бортовых систем в реальном масштабе времени при использовании результатов первичной обработки в качестве входной информации для комплексов автоматизированного анализа. В основном, это связано с неоднородностью и трудностью формализации обработки ТМИ на этапе полета РН [2] в виду большого объема ТМИ.

В силу перечисленных особенностей, наиболее сложной и важной среди задач обработки космических средств (РН, разгонных блоков и космических аппаратов) является оперативная обработка ТМИ РН. Она осуществляется на этапе выведения космических аппаратов на заданную орбиту. Результаты оперативной обработки непосредственно используются для принятия решений по управлению полётом и уточнению программы полёта при различных возможных отклонениях и неполадках, поэтому основным требованием, возникающим при оперативной обработке, является требование сокращения времени обработки и анализа измерений [3].

В работе предлагаются алгоритмы оценивания вероятностных характеристик информационных процессов по статистикам превышений уровней. Данные алгоритмы характеризуются низкими вычислительными затратами, что открывает широкие возможности по их использованию в комплексах автоматизированной обработки ТМИ РН.

## **1. Результаты систематизации особенностей телеметрической информации ракет-носителей**

Результаты системного анализа создания и сопровождения комплексов автоматизированного анализа позволили предложить подход к классификации «неоднородностей» ТМИ по характеру их проявления (рис. 1) [2]:



Рисунок 1. Виды неоднородностей ТМИ

Представленная классификация позволяет для каждого вида из перечисленных неоднородностей разработать модель информационного процесса и провести сравнительный анализ методов и алгоритмов обработки информации.

Для достижения необходимых значений оперативности и достоверности получаемых оценок технического состояния бортовых систем РН к обработке передаваемой с борта ТМИ предъявляется ряд требований [1]:

- получение результатов обработки в режиме мягкого реального времени;
- высокие требования к уровню достоверности результатов обработки телеметрической информации.

В связи с этим алгоритмы обработки информации оцениваются по показателю качества

$$\mathbf{E} = \langle D, T \rangle, \quad (1)$$

где

$D$  – показатель достоверности обработки;

$T$  – показатель оперативности обработки,

с использованием критерия пригодности [4]

$$\mathbf{G} : (D \geq p_{\text{пр}} \cap T \leq t_{\text{пр}}) \sim U, \quad (2)$$

где

$p_{\text{пр}}$  – минимально допустимая вероятность правильного решения;

$t_{\text{пр}}$  – максимально допустимое значение времени преобразования данных;

$U$  – достоверное событие (истинное высказывание);

$\cap$  – символ булева пересечения событий (конъюнкция высказываний).

В работах [5, 6, 7, 8, 9, 10], посвященных проблеме оперативной обработки ТМИ разработаны следующие алгоритмы, удовлетворяющие заданному критерию пригодности  $\mathbf{G}$ :

– алгоритм оперативного обнаружения аномальных измерений с использованием модели «засоренного» нормального закона;

– алгоритм адаптивного сжатия телеметрируемых параметров (ТМП);

– алгоритм оценивания нелинейных преобразований ТМП.

Особенностью представленных алгоритмов является их настройка к текущим вероятностным характеристикам ТМП. Например, в алгоритмах отбраковки и сжатия используются разные аналитические выражения для назначения порога для отбраковки в первом случае или оценивания интервала сжатия во втором в

зависимости от текущих спектрально-корреляционных свойств параметра. Проведенный анализ позволил сопоставить виды неоднородностей и вероятностные характеристики информационных процессов, определяющие структуру и параметры алгоритмов обработки ТМИ, характеризующейся соответствующими неоднородностями (табл. 1).

Таблица 1

Вероятностные характеристики информационных процессов

№ п/п	Вид неоднородности информации	Алгоритм обработки	Вероятностные характеристики
1.	Избыточность	Сжатие ТМП	Центральная частота $f_0$ , корреляционная функция $r_\xi(\tau)$
2.	«Засоренные» выборки	Устранение аномальных измерений	Центральная частота $f_0$ , корреляционная функция $r_\xi(\tau)$ , коэффициенты асимметрии $\gamma_1$ и эксцесса $\gamma_2$
3.	Структурно-временная неоднородность	Оценивание нелинейных преобразований ТМП	Закон распределения, корреляционная функция $r_\xi(\tau)$ ,

## 2. Аналитические выражения оценивания вероятностных характеристик информационных процессов по статистикам превышений уровней

Перечисленные в табл. 1 вероятностные характеристики могут быть оценены по статистикам превышений уровней следующим образом:

1. Тип корреляционной функции  $r_\xi(\tau)$ .

Оценивание типа корреляционной функции (формы спектра) производится с использованием характеристики  $v^2$  [5, 11]

$$v^2 = 1 - [N^+(0, 1) / N_{\max}(1)]^2; v^2 \in [0, 1], \quad (3)$$

где

$N^+(0, 1)$  – центральная частота процесса;

$N_{\max}(1)$  – тип корреляционной функции;

Характеристика  $v^2$  определяется корреляционной зависимостью между  $\xi(t)$  и  $\dot{\xi}(t)$  в совпадающие моменты времени и содержит полную информацию о законе распределения высот локальных максимумов (рис. 2).

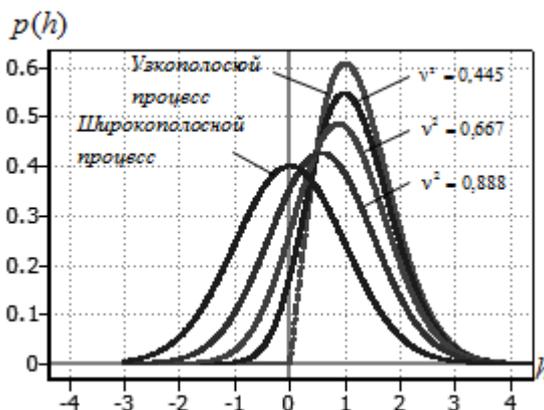


Рисунок 2 – Плотности вероятности высоты локальных максимумов

Ее значение (в диапазоне от нуля для гармонического процесса до единицы для широкополосного шума) зависит от коэффициента формы и относительной ширины спектра процесса и может быть оперативно оценено через характеристики «превышений уровней», если информационный процесс обладает свойством как минимум двукратной дифференцируемости на всем интервале анализа  $T_a$ .

Зависимость характеристик «превышений уровней» от спектральных свойств для гауссовых процессов представлена в табл. 2.

Таблица 2.

Характеристики «превышений уровней» и спектрально-корреляционные характеристики информационных процессов

№	$\chi$	$\nu^2$	$S(\omega)$	$r(\tau)$	$-r''(0)$	$\Delta f_s^*$	$N_1^+(0,1)$	$N_{\max}(1)$
1	0,399	0,667	$\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \exp\left(-\frac{\omega^2}{4\alpha}\right)$	$\exp(-\alpha\tau^2)$	$2\alpha$	$\frac{2,508n^+(0,1)}{(1+\gamma_2/8)}$	$0,225\sqrt{\alpha}\left(1+\frac{\gamma_2}{8}\right)$	$0,39\sqrt{\alpha}\left(1+\frac{\gamma_2}{8}\right)$
2	0,289	0,445	$\begin{cases} 2\pi/\Delta\omega, &  \omega  \leq \Delta\omega/2 \\ 0, &  \omega  > \Delta\omega/2 \end{cases}$	$\frac{\sin(\Delta\omega\tau/2)}{\Delta\omega\tau/2}$	$\frac{\Delta\omega^2}{12}$	$\frac{1,748n^+(0,1)}{(1+\gamma_2/8)}$	$\Delta\omega\left(1+\frac{\gamma_2}{8}\right)$	$0,247\Delta\omega\left(1+\frac{\gamma_2}{8}\right)$
3	0,869	0,888	$\frac{16\alpha^5}{3(\alpha^2 + \omega^2)^3}$	$\left(1 + \alpha \tau  + \frac{1}{3}(\alpha\tau)^2\right) \times \exp(-\alpha \tau )$	$\frac{\alpha^2}{3}$	$\frac{3,538n^+(0,1)}{(1+\gamma_2/8)}$	$0,092\alpha\left(1+\frac{\gamma_2}{8}\right)$	$0,276\alpha\left(1+\frac{\gamma_2}{8}\right)$

Решение о типе корреляционной функции ТМП принимается по следующему классифицирующему правилу

$$\left. \begin{aligned} 0,00 < \nu^2 \leq 0,56 &\rightarrow \chi = 0,289 \\ 0,56 < \nu^2 \leq 0,78 &\rightarrow \chi = 0,399 \\ 0,78 < \nu^2 \leq 1,00 &\rightarrow \chi = 0,869 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

2. Центральная частота  $\omega_0 = 2\pi f_0$  спектра  $S_\xi(\omega)$  ТМП

$$\omega_0 = \frac{\int_0^\infty \omega S_\xi(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_\xi(\omega) d\omega}, \quad (5)$$

Используя статистики превышений уровней, выражение для оценки центральной частоты процесса  $\xi(t)$  с учетом формы плотности распределения и формы спектра имеет вид [9]:

$$f_0^* = \sqrt{\left(\frac{n^+(0, T_a)}{T_a(1 + \gamma_2^*/8)}\right)^2 - (\chi \Delta f_{\text{Э}}^*)^2}, \quad (6)$$

где

$n^+(0, T_a)$  – количество пересечений траекторией процесса нулевого уровня на интервале анализа  $T_a$ ;

$\chi$  – коэффициент формы спектра;

$\Delta f_{\text{Э}}^*$  – эффективная ширина спектра;

$\gamma_2^*$  – коэффициент эксцесса.

В свою очередь, эффективная ширина спектра  $\Delta f_{\text{Э}}$  информационного процесса со спектром

– прямоугольной формы ( $\chi = 0,289$ ) определяется выражением

$$\Delta f_{\text{Э}}^* = \frac{1,748n^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}, \quad (7)$$

– гауссовой формы ( $\chi = 0,399$ ) определяется выражением

$$\Delta f_{\text{Э}}^* = \frac{2,508n^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}, \quad (8)$$

– с коэффициентом формы  $\chi = 0,869$  определяется выражением

$$\Delta f_{\text{Э}}^* = \frac{3,538n^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}, \quad (9)$$

#### 4. Коэффициенты асимметрии и эксцесса

На участках полета РН, на которых плотность вероятности процесса аппроксимируется рядом Эджворта

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma_\xi} \left[ p_\Gamma \left( \frac{\xi}{\sigma_\xi} \right) - \frac{\gamma_1}{3!} p_\Gamma^{(3)} \left( \frac{\xi}{\sigma_\xi} \right) + \frac{\gamma_2}{4!} p_\Gamma^{(4)} \left( \frac{\xi}{\sigma_\xi} \right) \right], \quad (9)$$

при условии небольших отклонений от гауссовой плотности

$$p(\xi) \in p(\xi, \gamma_1, \gamma_2 \mid |\gamma_1| < 1, |\gamma_2| < 1), \quad (10)$$

коэффициенты асимметрии  $\gamma_1^*$  и эксцесса  $\gamma_2^*$  могут быть получены путем оценивания числа пересечений траекторией информационного процесса на уровнях

$H = 0, H = 0,74\sigma_\xi, H = -0,74\sigma_\xi$  [9]:

$$\gamma_1^* = \frac{0,759}{0,23 - \frac{6,28n^+(-0,74\sigma_\xi)}{15,74n^+(0,74\sigma_\xi, T_a) - 6,91n^+(0, T_a)}}, \quad (11)$$

$$\gamma_2^* = \frac{8}{0,31 - \frac{3,31n^+(-0,74\sigma_\xi, T_a)}{15,74n^+(0,74\sigma_\xi, T_a) - 6,91n^+(0, T_a)}} - 8 \quad (12)$$

Представленные аналитические выражения позволяют разрабатывать алгоритмы оперативной обработки ТМИ.

### **3. Алгоритм оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик информационных процессов**

Использование соотношений (10), (11) и типовых спектральных плотностей (табл. 2) дает возможность проводить совместное оценивание моментов одномерных распределений и спектрально-корреляционных характеристик. Блок-схема алгоритма оценивания моментных и спектральных характеристик информационных процессов представлена на рис. 3.

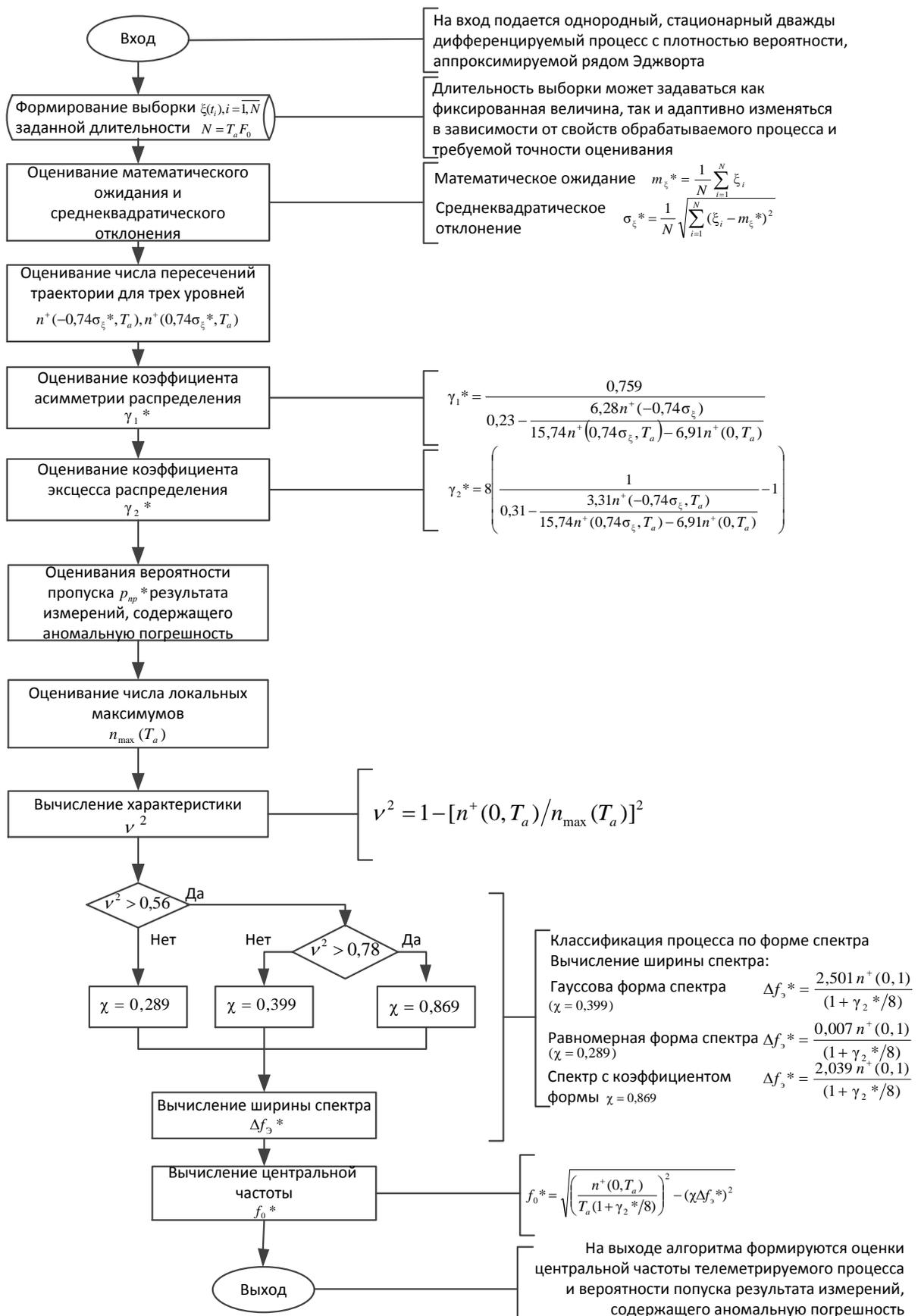


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма оценивания моментных и спектральных

характеристик информационных процессов

#### 4. Модель, метод и алгоритмы обработки информационных процессов со структурно-временной неоднородностью

Модель информационного процесса со структурно-временной неоднородностью представлена смесью распределений процессов первого класса [6]:

$$\begin{aligned}
 p(\xi) &\approx \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i(\xi), \\
 p_i(\xi) | p_i(\xi, \dot{\xi}, t) &= p_i(\xi, t) p_i(\dot{\xi}, t), \quad p_i(\dot{\xi}, t) = (2\pi\sigma_{\xi}^2)^{-1/2} \exp(-\dot{\xi}^2 / 2\sigma_{\xi}^2), \\
 \sum_{i=1}^n \alpha_i &= 1, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Метод обработки информационных процессов со структурно-временной неоднородностью заключается в оценивании закона распределения процесса по выборке  $\xi(t), t \in [t_0, t_0 + T]$ , формируемой скользящим окном с заданной шириной  $T$ , путем принятия решения о принадлежности выборки, описываемой вектором образов  $\mathbf{X}$ , в соответствии с заданным решающим правилом  $d(\mathbf{X})$  к одному из классов  $\omega_i, i = 1, 2, \dots, n$ , соответствующих компонентам смеси (рис. 14) [6].

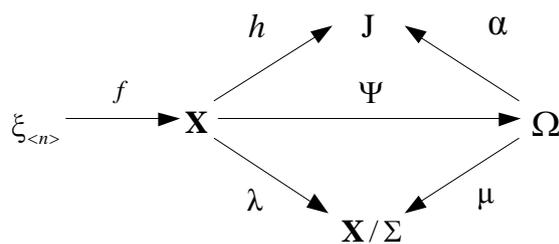


Рисунок 14. Диаграмма процесса оценивания закона распределения информационных процессов

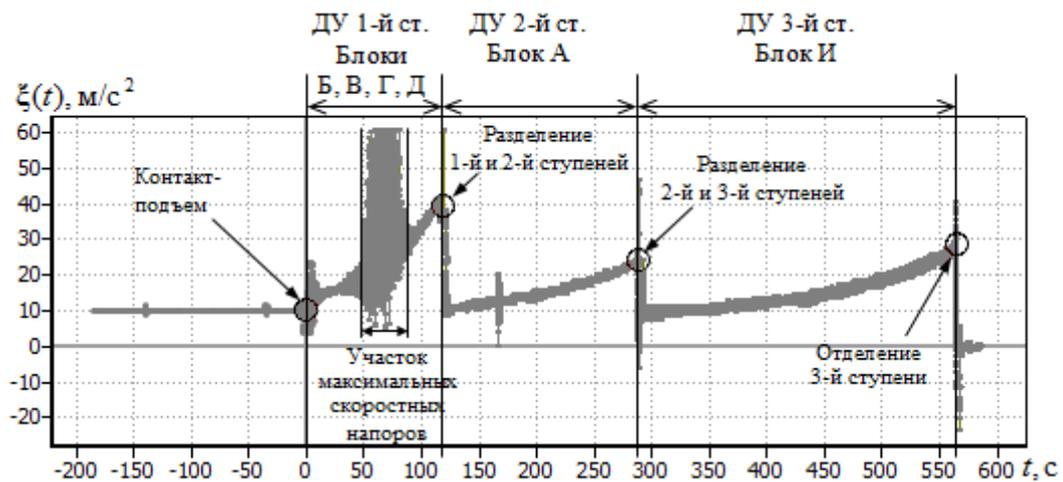
На рисунке используются следующие обозначения:  $\xi_{\langle n \rangle}$  – выборка размерности  $n$ ;  $f: \xi(t) \rightarrow \mathbf{X}_{\langle l \rangle}$  – функция измерения;  $\mathbf{X}_{\langle l \rangle}$  – вектор признаков размерности  $l$ ;  $\Omega$  – множество компонентов смеси (13) или алфавит классов;  $\Psi: \mathbf{X} \rightarrow Q$  – отображение, ставящее в соответствие вектору признаков  $\mathbf{X}_{\langle l \rangle}$  класс  $\omega \in \Omega$ ;  $\mathbf{X}/\Sigma$  – фактор-множество;  $\lambda: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}/\Sigma$  – отображение факторизации (разбиения множества  $X$  на классы эквивалентности);  $\mu: Q \rightarrow \mathbf{X}/\Sigma$  – взаимно однозначное отображение между фактор-множеством и множеством классов распознавания;  $J = \{1, 2, \dots, m\}$  – индексное множество  $\forall k \in J$  выполняется  $\mathbf{X}_k \in \mathbf{X}$ ,  $h(\mathbf{X}_k) = k$ ;  $h: \mathbf{X} \rightarrow J$  – отображение, ставящее в соответствие вектору признаков  $\mathbf{X}$  решение о вероятностном распределении информационного с учетом ошибок при классификации.

Для оперативного оценивания вероятностной структуры ТМП в качестве метрики используется расстояние между образами в признаковом пространстве, образованном значениями количества пересечений на относительных уровнях, при которых заданные законы распределения являются максимально разделимыми. Разделяющие поверхности определяются с использованием классификатора Неймана – Пирсона [6].

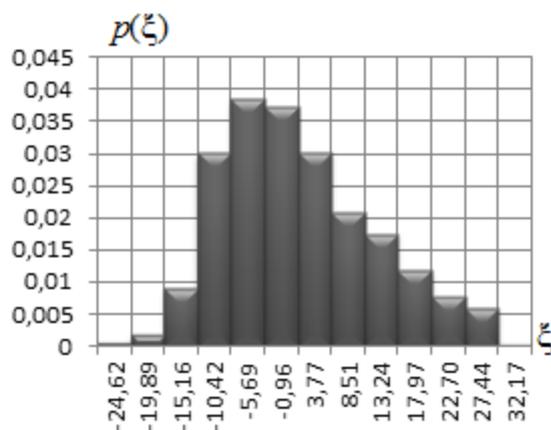
Конкретизируя модель (13), можно произвести синтез алгоритмов оценивания нелинейных преобразований ТМП.

Рассмотрим пример использования предлагаемого метода. Анализ полученных оценок плотности вероятности ТМИ, поступающей с датчика осевого ускорения блока «И» РН «Союз-2» (рис. 4, а), позволил сделать вывод о

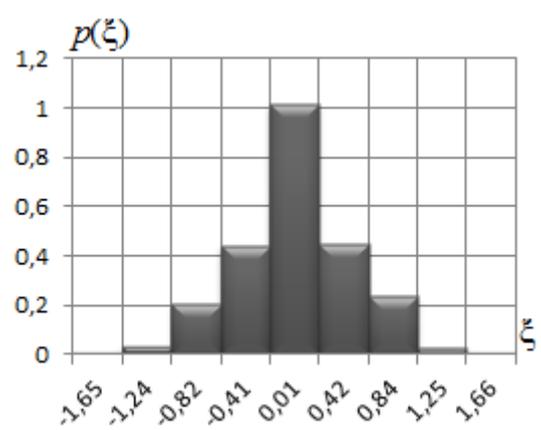
неоднородности вероятностной структуры параметра и условно разделить время полета ракеты на два интервала: на первом интервале (участке максимальных скоростных напоров) плотность вероятности имеет ярко выраженный асимметричный характер, на втором – плотность вероятности близка к гауссовой (рис. 4, б, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4. Телеметрическая информация, поступающая с датчика осевого ускорения блока «И» ракеты-носителя «Союз-2» (а); оценка плотности вероятности на участке максимальных скоростных напоров (б); оценка плотности вероятности на участке на участке работы ДУ 2-й ступени

Следует отметить, что на участке полета РН в условиях максимальных скоростных напоров наблюдается значительное рассогласование между оценками значений проекции ускорения на продольную ось связанной системы координат в виде среднего значения или медианы распределения и модельными (расчетными) значениями. Таким образом, на основе закона распределения ТМП ОП может быть сформирован показатель степени доверия к поступающей ТМИ и, соответственно, к получаемым на ее основе оценкам летно-технических характеристики РН.

Результаты экспериментальных исследований показали хорошую согласованность ТМП ОП с моделью в виде трехкомпонентной смеси, состоящей из гауссовского процесса, процессов с  $\chi$ -распределением с числом степеней свободы  $n=5$  и числом степеней свободы  $n=2$  (процесса Релея). Данная модель представляет собой частный случай модели (13).

*Исходными данными* для синтеза алгоритма классификации процессов с заданными законами распределений по вероятностным характеристикам являются векторы математических ожиданий  $\mathbf{M}_k$  и корреляционные матрицы  $\Sigma_k$ ,  $k = \overline{1,3}$  двумерной случайной величины  $\mathbf{X} = [n^+(H_1/\sigma_\xi, T)/\sigma_\xi, n^+(H_2/\sigma_\xi, T)/\sigma_\xi]^T$ , где  $n^+(H_i/\sigma_\xi, T)/\sigma_\xi, i = 1, 2$  – нормированное количество положительных пересечений траекторией  $\xi(t), t \in [t_0, t_0 + T]$  процесса относительных уровней  $H_1/\sigma_\xi = -1,219$ ,  $H_2/\sigma_\xi = 0,821$  [6]. Векторы математических ожиданий определяются по аналитическим выражениям среднего числа пересечений траекторией процесса заданных уровней. Элементы корреляционной матрицы оцениваются по результатам

имитационного моделирования случайных процессов с заданными вероятностными распределениями и спектральными свойствами.

*Признаковое пространство и границы Неймана-Пирсона* для различных вероятностей ошибок первого рода (в случае разделения процессов с распределениями Гаусса и  $\chi$  с числом степеней свободы  $n = 5$  нулевой гипотезой является распределение Гаусса, для разделения процессов с  $\chi$ -распределением с  $n=5$  и Релея основной гипотезой является распределение Релея) представлены на рис. 5.

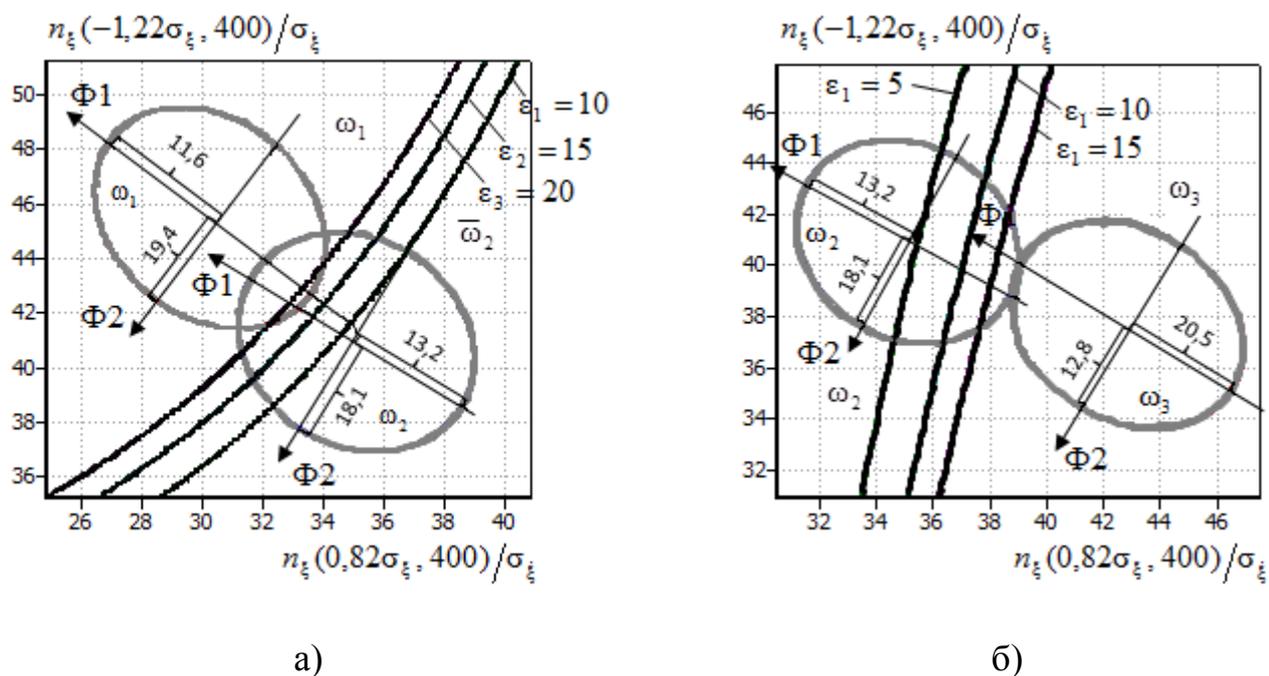


Рисунок 5. Признаковое пространство и границы Неймана-Пирсона: процессы с распределениями Гаусса  $\omega_1$  и  $\chi$  с числом степеней свободы  $n = 5$   $\omega_2$  (а); процессы с  $\chi$ -распределением с  $n = 5$  и Релея  $\omega_3$

Здесь значения процессов некоррелированы ( $\hat{\sigma}_{\xi} = 1,41$ ), а объем выборки  $N = 400$  задается при предварительной настройке исходя из требований к достоверности результатов работы алгоритма.

Надписями  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  обозначены собственные векторы корреляционных матриц  $\Sigma_i, i = \overline{1,3}$ . Значения полуосей равны собственным значениям корреляционных матриц  $\Sigma_i, i = \overline{1,3}$ .

*Решающее правило* для классификации процессов по вероятностным характеристикам имеет вид

$$\left. \begin{aligned} d_{12}(\mathbf{X}) < 0 &\rightarrow \mathbf{X} \in \omega_1 \\ d_{12}(\mathbf{X}) > 0 \cap d_{23}(\mathbf{X}) > 0 &\rightarrow \mathbf{X} \in \omega_2 \\ d_{23}(\mathbf{X}) < 0 &\rightarrow \mathbf{X} \in \omega_3 \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где

$\mathbf{X}$  – вектор, компонентами которого являются значения числа положительных пересечений  $n^+(H_i/\sigma_\xi, T)/\sigma_\xi, i = 1,2$  траекторией процесса относительных уровней  $H_1/\sigma_\xi, H_2/\sigma_\xi$  на интервале анализа  $T_a$ ;

$\omega_i, i = \overline{1,3}$  – классы для распознавания, соответствующие распределениям Гаусса,  $\chi$  с числом степеней свободы  $n=5$  и Релея

$d_{ij}$  – разделяющие границы для классов  $\omega_i$  и  $\omega_j$ ;

Таким образом, *блок-схема алгоритма* оценивания закона распределения вероятностей информационных процессов по статистикам превышений уровней представлена на рис. 6.

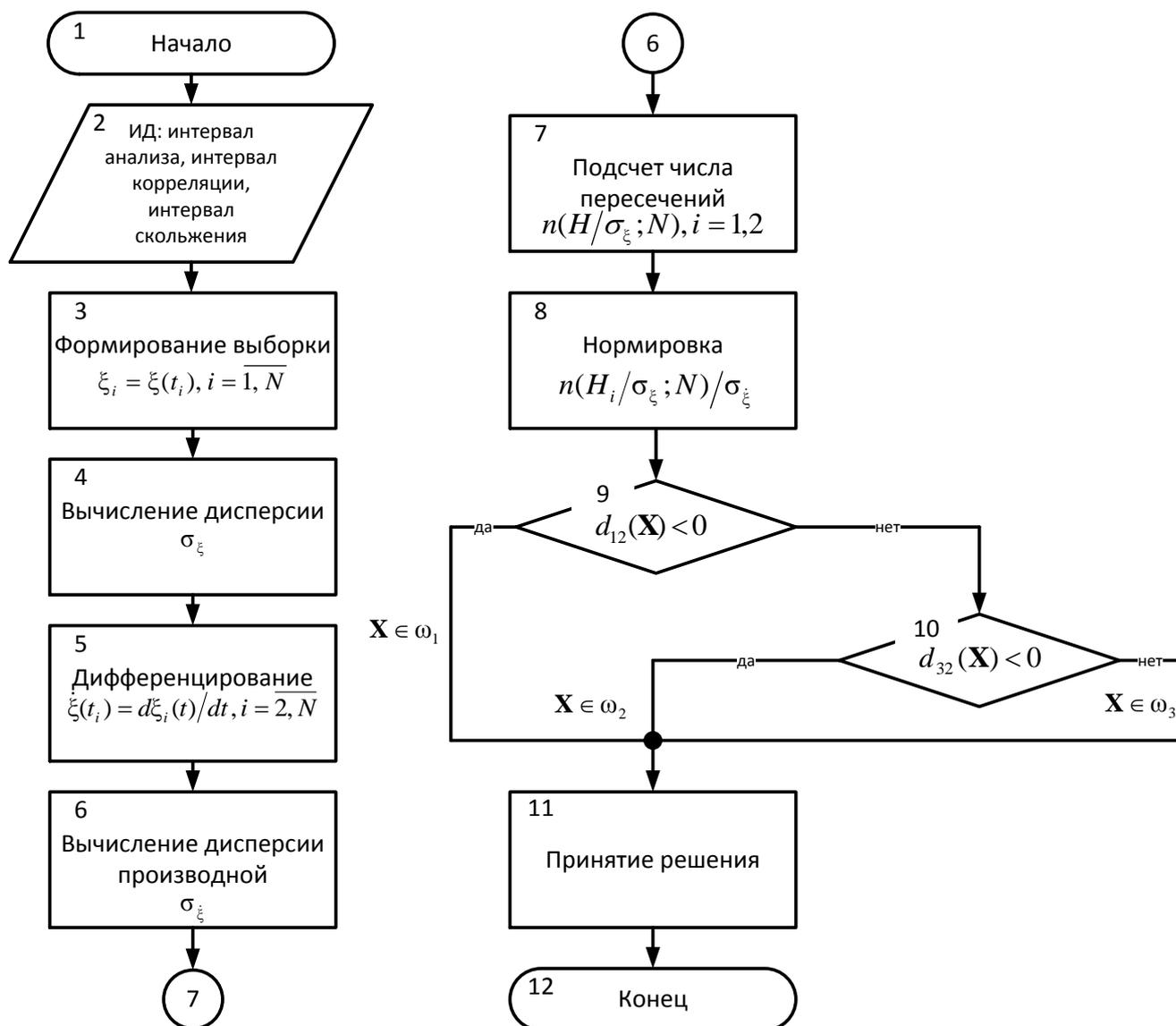


Рисунок 6. Блок схема оценивания закона распределения по статистикам превышений уровней

Учитывая, что алгоритм используется в рамках метода, основанного на характеристиках «превышений», значения  $\sigma_{\xi}$  и  $\sigma_{\dot{\xi}}$  уже, как правило, вычислены и хранятся в оперативной памяти, поэтому для принятия решения о вероятностном

распределении ТМП достаточным оказывается подсчет числа пересечений на двух уровнях и проверки условий 9 и 10.

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование разработанного алгоритма при обработке ТМП осевой перегрузки РН «Союз-2», характеризующимся структурно-временной неоднородностью, позволит повысить достоверность получаемых оценок измеряемого параметра.

### **Заключение**

В работе представлены аналитические выражения оценивания моментов одномерных распределений и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик информационных процессов. Предлагаются модель и метод обработки информационных процессов со структурно-временной неоднородностью. Разработанные алгоритмы используют счетчики «нулей», являются достаточно простыми для реализации и не требуют больших вычислительных затрат, что позволяет их применять в системах автоматизированного анализа ТМИ РН на активном участке траектории и получать оценки ТМП в режиме близкому к режиму реального времени.

### **Библиографический список**

1. Майданович О.В., Каргин В.А., Мышко В.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2011. – 219 с.

2. Каргин В.А., Скороходов Я.А. Подход к классификации неоднородностей телеметрической информации ракет-носителей // Авиакосмическое приборостроение. 2015. №4. С. 94–103.
3. Стёпкин В.С., Шмыголь С.С. Автоматизированная обработка и анализ измерительной информации. – М.: МО СССР, 1980. 515 с.
4. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. - М.: АСТ, 2006. – 504 с.
5. Каргин В.А. Оперативное необратимое сжатие телеметрической информации // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 6(29). С. 58 – 68.
6. Каргин В.А. Скороходов Я.А. Оценивание нелинейных зависимостей при оперативной обработке телеметрической информации по статистике пересечений заданных уровней // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2015. Выпуск №646. С. 13–23.
7. Каргин В.А., Скороходов Я.А. Алгоритмы обработки телеметрической информации при формировании исходных данных для анализа технического состояния бортовых систем ракет-носителей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2014. Выпуск №645. С. 39–43.
8. Каргин В.А., Николаев Д.А., Скороходов Я.А. Оценивание вероятностных характеристик телеметрируемых процессов ракет-носителей в реальном масштабе времени. Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2014. Выпуск №644. С. 161–168.

9. Николаев Д.А. Оценивание и аппроксимация вероятностных характеристик флуктуационных процессов в системах телеметрии реального времени. - СПб.: Изд-во ГУАП, 2010. – С. 160–163.

10. Каргин В.А., Николаев Д.А., Самойлов Е.Б. Обнаружение и отбраковка аномальных результатов измерений для формирования исходной измерительной информации по ракете-носителю типа «Союз» // Информация и космос, 2009. №4. С. 83 – 86.

11. Тихонов В.И., Хименко В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987. – 305 с.