

УДК 629.76.05

## **Алгоритм формирования диагностических признаков бортовых динамических систем на основе показателя Херста**

**Якимов В. Л.\* , Панкратов А.В.\*\***

*Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,  
Ждановская набережная, 13, Санкт-Петербург, 197082, Россия*

*\*e-mail: yakim78@yandex.ru*

*\*\*e-mail: pankratov-av@rambler.ru*

### **Аннотация**

Проведен анализ применимости  $RS$  - статистики и, в частности, показателя Херста, для исследования временных рядов телеметрируемых параметров объектов ракетно-космической техники. Разработан алгоритм формирования диагностического признака на основе сглаживания оценок показателя Херста и определения доверительного интервала на данный показатель для различных состояний бортовой динамической системы. Проведенные исследования показывают возможность использования данного показателя при автоматизированной обработке телеметрической информации и диагностировании бортовых систем объектов ракетно-космической техники, в том числе в условиях нештатного функционирования.

**Ключевые слова:** динамическая система, телеметрируемые параметры, показатель Херста.

## Введение

При анализе телеметрической информации (ТМИ), получаемой по результатам испытаний изделий ракетно-космической техники (РКТ), решается задача автоматической классификации участков телеметрируемых параметров (ТМП), описывающих процессы их функционирования, что связано с большими объемами получаемой измерительной информации и необходимостью ее оперативной обработки [1]. Особенно это важно для выявления причин неисправностей, сопровождающих аварийные пуски изделий РКТ. Параллельно задаче классификации решаются задачи поиска оптимального состава признаков классификации и их унификации для обработки различных временных рядов ТМП. Это связано с тем, что даже для различных участков одних и тех же ТМП оптимальными по критерию достоверности классификации состояний являются различные признаки, что значительно усложняет процесс автоматической обработки ТМИ.

В данной статье рассматривается возможность применения интегральных характеристик, которые используются в нелинейной динамике для описания свойств динамических систем различной природы. К таким характеристикам относят: корреляционную размерность, показатель Херста, показатели Ляпунова, корреляционную энтропию и т. д. В работах [2,3] для решения задачи классификации самых различных, но преимущественно модельных временных рядов, используется показатель Херста. В данной статье рассмотрены возможности

использования показателя Херста в задачах анализа состояний динамических систем объектов РКТ.

### Постановка задачи

Наличие неисправности на борту объектов РКТ оказывает определенное влияние на ТМП их динамических систем: во временных рядах таких ТМП появляются различного рода тренды, а в их спектрах – дополнительные составляющие и шумы. Поиск унифицированных показателей, реагирующих на подобного рода изменения в ТМП различных бортовых динамических систем, позволит значимо упростить существующие алгоритмы автоматизированной обработки больших массивов ТМИ.

Пусть отсчеты некоторого ТМП динамической системы, взятые на определенном интервале наблюдения  $n$  представляют собой временной ряд  $x_1, x_2, \dots, x_n$  с математическим ожиданием:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где  $n$  – размерность интервала наблюдения,  $i$  – номер отсчета. Используем для анализа ТМП  $RS$  – статистику, для которой величина размаха накопленных сумм  $R_n$ , среднеквадратическое отклонение  $S_n$  и величина нормированного размаха накопленных сумм  $RS_n$  определяются из формул [4]:

$$\begin{aligned} R_n &= \max_{q=1, \dots, n} \left( \sum_{i=1}^q (x_i - \bar{x}_i) \right) - \min_{q=1, \dots, n} \left( \sum_{i=1}^q (x_i - \bar{x}_i) \right), \\ S_n^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2, \\ RS_n &= \frac{R_n}{S_n}. \end{aligned} \tag{1}$$

Размах  $R_n$  зависит от величины  $n$  и растет вместе с ним, а безразмерное отношение  $R_n/S_n$  позволяет сравнить этот размах для разных временных процессов. Нормированный размах хорошо описывается эмпирическим соотношением [4]:

$$\frac{R_n}{S_n} = cn^H, \quad (2)$$

где  $H$  – показатель Херста,  $c$  – некоторый коэффициент.

Если рассмотреть зависимость величины  $\ln(R_n/S_n)$  от величины  $\ln(n)$  и аппроксимировать множество полученных точек прямой с использованием метода наименьших квадратов, то можно определить показатель Херста – как угловой коэффициент аппроксимирующей прямой. На рисунке 1 представлен результат определения показателя Херста для временного ряда, представляющего собой белый шум с равномерной плотностью вероятности распределения. Показатель Херста характеризует тенденцию в динамике временного ряда и наличие в ней устойчивых трендов, показывает степень стохастичности динамической системы.

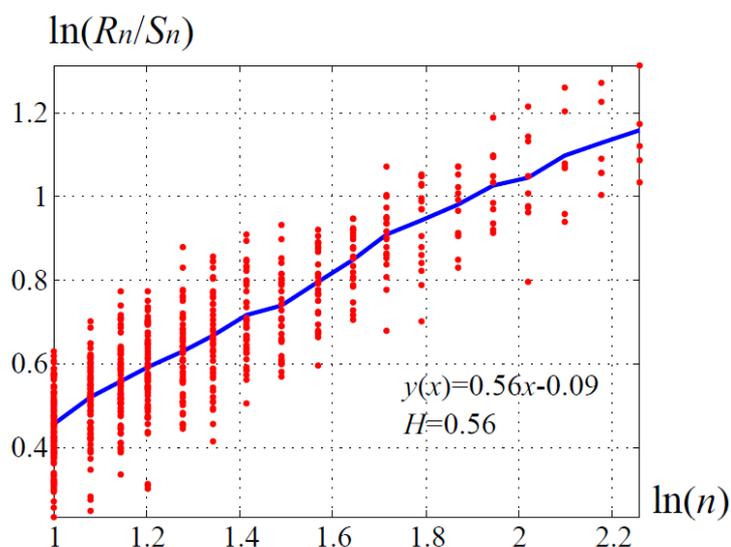


Рис.1. Результат вычисления показателя Херста для белого шума с равномерной плотностью вероятности распределения

Если  $H=0.5$ , то временной ряд представляет собой белый шум с равномерной плотностью вероятности распределения, при  $0.5 < H < 1$  временной ряд имеет стохастический характер, но в нем имеются устойчивые продолжительные тренды, при  $0 < H < 0.5$  во временном ряду наблюдаются частые изменения его значений на противоположные, в том числе, возможно, регулярные и детерминированные [4].

Используем данный показатель для оценки состояния бортовых динамических систем. Обработка временного ряда ТМП длиной  $M$  отсчетов реализуется в скользящем “окне наблюдения” размерностью  $n$ . Каждому “окну наблюдения” ставится в соответствие класс  $S_g$ , где  $g=1..N$  – номер класса,  $N$  – количество классов, к которому участок ТМП может быть отнесен. Данная процедура осуществляется экспертом на обучающей выборке. Как показывает практика, при вычислении показателя Херста с использованием скользящего “окна наблюдения”, получаемые оценки сильно изменяются во времени, что требует использования алгоритма сглаживания, в результате чего формируется оценка диагностического показателя  $H_k$ . По результатам испытаний однотипных изделий РКТ имеется достаточное количество телеметрической информации. С использованием этой информации можно определить плотность вероятности распределения значений показателя  $H_k$  на  $g$ -м участке и границы доверительного интервала  $[H_{g,min} H_{g,max}]$ , который покрывает величину  $H_k$  с доверительной вероятностью, равной 0.99 [5].

Множество сформированных доверительных интервалов  $\{[H_{g,min} H_{g,max}]\}$ , характеризующих классы  $S_g$ , должно удовлетворять условию:

$$\sum_{\forall i, j; i \neq j} \|\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j\| \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $\|\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j\|$  – расстояние между классами  $i$  и  $j$ , вычисляемое с использованием заданной метрики. В настоящей работе в качестве меры использовалось эвклидово расстояние. Для достижения малого значения ошибки классификации при определении класса  $\mathbf{S}_g$  по значению оценки  $H_k$  желательно ограничиться небольшим количеством классов  $N$ . Рассмотренная задача направлена на поиск таких размеров “окна наблюдения” и “окна сглаживания”, которые бы позволили сформировать оценку  $H_k$ , позволяющую наилучшим образом различить множество состояний бортовой динамической системы, определяемых доверительным интервалом  $[H_{g,min}, H_{g,max}]$ .

## Алгоритм формирования диагностических признаков

Так как значения допусков определяются исключительно законом распределения значений  $H_k$ , то решить задачу (3) можно варьируя размерностью “окна наблюдения”  $n$  и параметрами алгоритма сглаживания. Алгоритм решения задачи представлен на рисунке 2. На шаге 1 алгоритма осуществляется получение  $M$  значений реализации ТМП и информации о принадлежности отдельных его участков классам  $S_g$ , которая формируется экспертами. Осуществляется ввод: переменной  $n$ , определяющей размер “окна наблюдения”; переменной  $n_{opt}$  для хранения наилучшего значения  $n$ ; начального размера “окна наблюдения”  $n_0$ ; переменной  $T$ , определяющей размер “окна сглаживания” алгоритма скользящего среднего; переменной  $T_{opt}$  для хранения наилучшего значения  $T$ ; начального размера “окна сглаживания”  $T_0$ ; переменных  $r_1$  и  $r_2$  для оценки суммарного расстояния между классами (3), в начальный момент равных максимально возможному значению суммы (3); шагов для “окна наблюдения”  $dn$  и “окна сглаживания”  $dT$ . Осуществляется присваивание переменной  $n$  начального значения  $n_0$ . На шаге 2 вводится начальное значение счетчика  $k=1$ , соответствующего номеру отсчета реализации ТМП и отвечающего за положение “окна наблюдения” во временной области. На шаге 3 осуществляется получение отсчетов ТМП  $x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}$  и линейная нормировка их значений в пределах от 0 до 1. На шаге 4 осуществляется расчет показателя Херста  $H_k$  для полученных значений ТМП в пределах “окна наблюдения” с использованием (1) и (2). На шаге 5 осуществляется сохранение значения  $H_k$  в массив  $\mathbf{W} \equiv [w_k]$ .

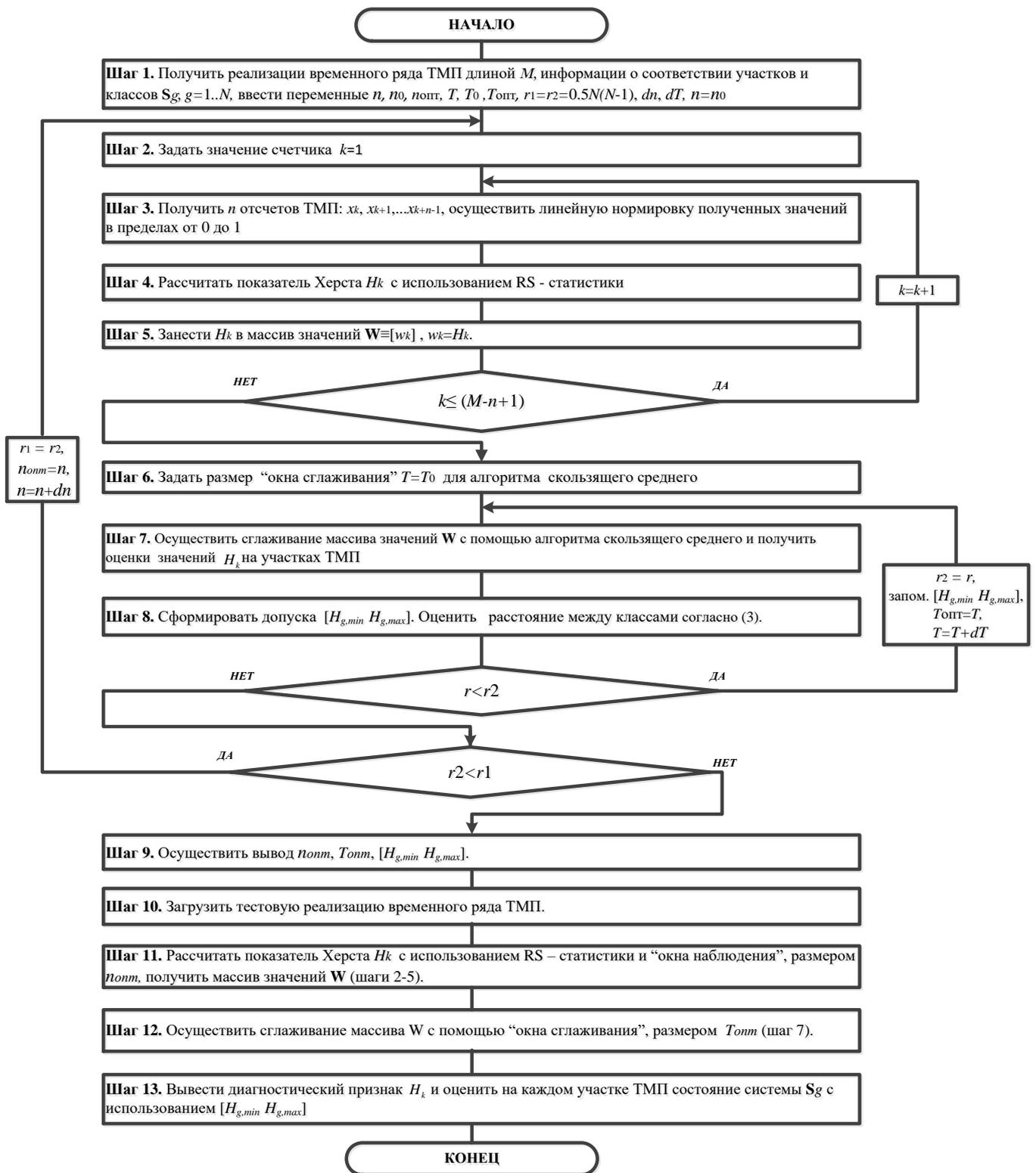


Рис. 2. Алгоритм формирования диагностических признаков на основе показателя Херста

Если достигнут конец реализации временного ряда, то осуществляется переход на шаг 6, иначе осуществляется сдвиг “окна наблюдения” на  $dn$  отсчетов

вправо, переход к шагу 3. На шаге 6 размеру “окна сглаживания”  $T$  присваивается значение  $T_{opt}$ . На шаге 7 осуществляется сглаживание значений массива  $W$  с использованием алгоритма скользящего среднего и получение оценок значений показателя Херста  $H_k$ . На шаге 8 оценивается закон распределения величины  $H_k$  и формируются допуски  $[H_{g,min} H_{g,max}]$  для каждого класса  $S_g$ , вычисляется суммарное расстояние между классами по формуле (3). Если значение  $r < r_2$ , то  $r_2 = r$ , запоминаются допуски  $[H_{g,min} H_{g,max}]$ ,  $T_{opt} = T$ , увеличивается размер “окна сглаживания” на  $dT$ , осуществляется переход на шаг 7. В противном случае, если значение  $r_2 < r_1$ , то  $r_1 = r_2$ , запоминается размер “окна наблюдения”  $n_{opt} = n$ , увеличивается значение  $n$  на  $dn$ , иначе осуществляется переход на шаг 9. В результате работы алгоритма определяется наилучший размер “окна наблюдения”  $n_{opt}$  и “окна сглаживания”  $T_{opt}$ , доверительные интервалы  $[H_{g,min} H_{g,max}]$  для заданных классов  $S_g$ , которые используются в дальнейшем для получения значения диагностического показателя  $H_k$  и оценки состояния бортовой динамической системы на тестовых реализациях телеметрируемых параметров (шаги 10-13).

### Результаты моделирования

Для того чтобы использовать диагностический признак  $H_k$  на основе показателя Херста и сформировать на него допуски для различных состояний анализируемой бортовой динамической системы, необходимо обеспечить одинаковые условия проведения эксперимента. В частности, у рассматриваемых временных рядов должна быть одинаковая частота дискретизации  $F_d$ , в противном

случае значения показателя Херста для одинаковых временных рядов будут разными. Это видно из рисунка 3,б, на котором представлены диагностические признаки  $H_k$ , полученные по различным временным реализациям ТМП  $U_{6c}$  (напряжения бортовой сети) в различные периоды функционирования малого КА.

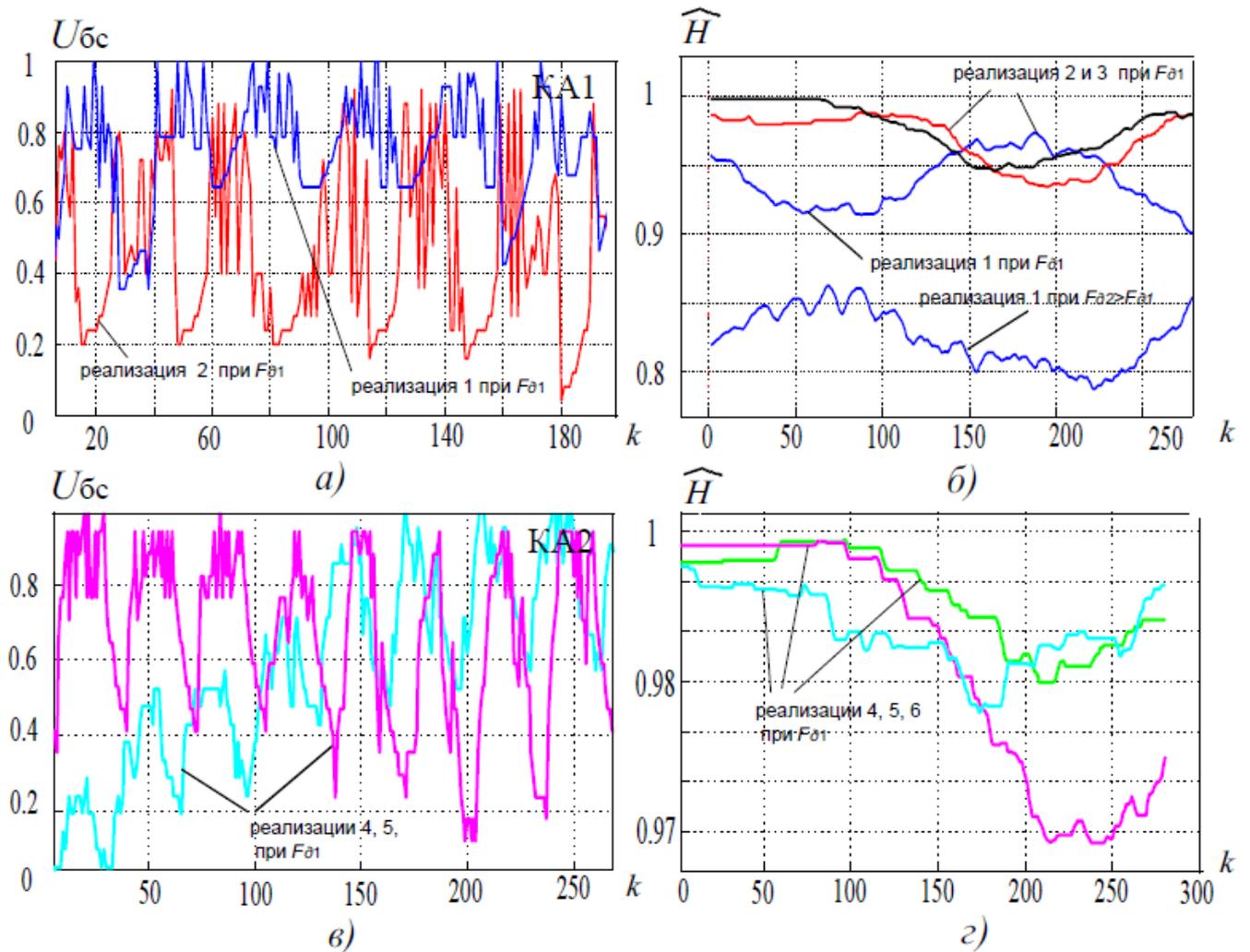


Рис. 3. Зависимости: значений ТМП  $U_{6c}$  и соответствующих значений показателя Херста от дискретного времени  $k$  для различных малых КА

На рисунке 3, в и г) представлены зависимости показателя Херста  $H_k$  от дискретного времени для реализаций ТМП  $U_{6c}$  другого КА, характеризующегося более стабильной работой системы электропитания, а также меньшим количеством помех

и шумов. Представленные графики показывают возможность кластеризации диагностических признаков  $H_k$  и формирования допусков для ТМП бортовых динамических систем одного или нескольких однотипных объектов РКТ в схожих условиях функционирования.

На рисунке 4 представлен ТМП  $U_{v1}$ , характеризующий вибрации в одной из контрольных точек двигательной установки первой ступени ракеты-носителя (рис. 4, а). Показатель  $H_k$  данного ТМП позволяет различить участки, характеризующиеся хаотическим поведением и наличием продолжительных трендов (на временном интервале от начала записи ТМИ до отрыва изделия от стартового стола) и участки, характеризующиеся случайными изменениями значений временного ряда (на активном участке траектории полета) (рис. 4, б).

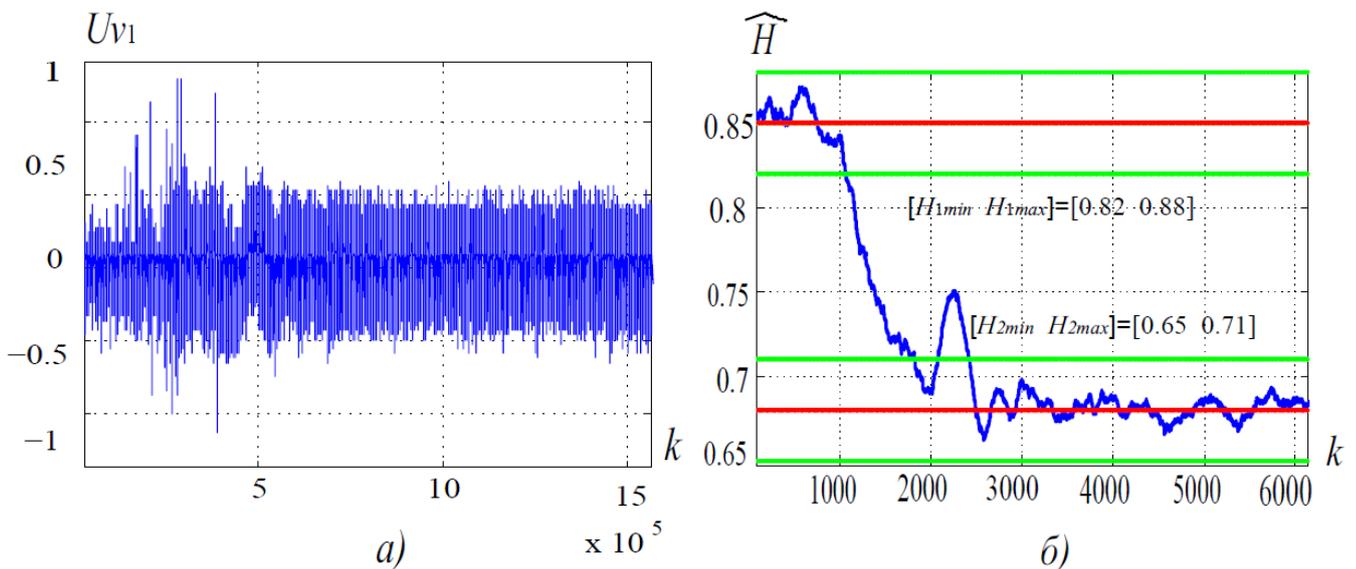


Рис. 4. Зависимости: значений ТМП  $U_{v1}$  и показателя  $H_k$  от дискретного времени с доверительными интервалами (допусками) для двух различных участков ТМП

На рисунке 5 представлены зависимости показателя  $H_k$  от времени для вибрационного ТМП  $U_{v2}$ , характеризующего работу одного из рулей ракеты – носителя в штатном (синим) и аварийном (красном) режимах функционирования по результатам различных испытаний. В отличие от предыдущих ситуаций в ТМП присутствуют как регулярные высокочастотные изменения значений временного ряда (показатель Херста меньше 0.3), случайные изменения (показатель Херста близок к значению 0.5), так и различного рода временные тренды (показатель Херста изменяется от 0.5 до 0.98).

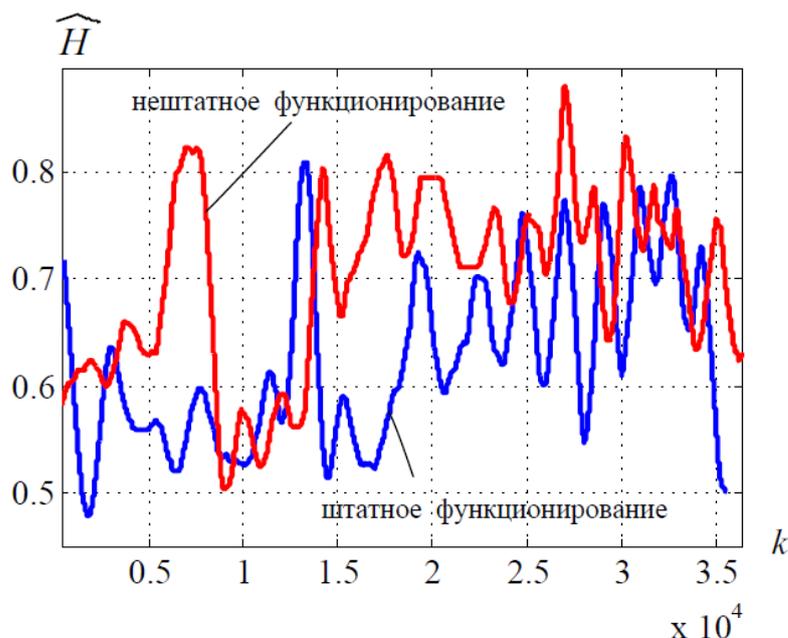


Рис. 5. Зависимости значений показателя  $H_k$  от дискретного времени в штатном и аварийном режимах функционирования бортовой динамической системы

Особенностью рассмотренного случая является невозможность с помощью допусков однозначно отделить показатели  $H_k$  в штатном и аварийном режимах функционирования, тем не менее, различие двух представленных процессов в

пространстве рассматриваемого показателя  $H_k$  более очевидны, чем во временной и спектральной области.

На рисунке 6 представлены зависимости значений вибрационного параметра  $U_{v3}$ , характеризующего работу насоса горючего третьей ступени ракеты-носителя, и показателя  $H_k$  от времени при различных летных испытаниях. При этом на временном отрезке от начала записи ТМИ до старта ракеты-носителя динамика анализируемых временных рядов принципиально различалась, а на активном участке траектории временные ряды близки по своим характеристикам белому шуму. Данные особенности временных рядов полностью нашли отражение в изменении показателя  $H_k$  (рис. 6, б).

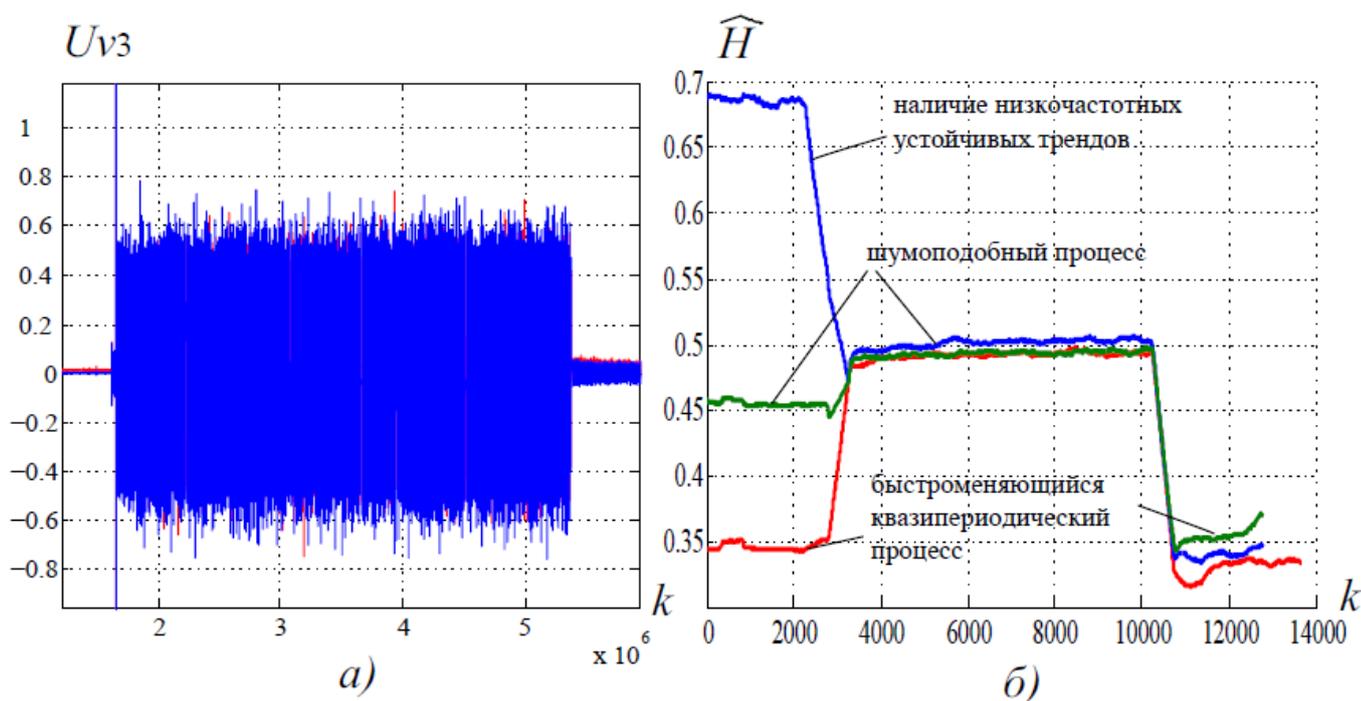


Рис. 6. Зависимости: значений показателя  $H_k$  вибрационного ТМП  $U_{v3}$  от дискретного времени при различных испытаниях ракеты-носителя

Недостатком использования показателей нелинейной динамики является их сильная чувствительность к шуму, снижающая их применимость в реальных системах. Отношение сигнал/шум в телеметрических радиолиниях, используемых при испытаниях объектов РКТ, варьируется от 0 до 15 дБ. При этом погрешность телеизмерений в современных телеметрических системах не превышает 1%, что позволяет говорить о применимости данных показателей в задачах анализа телеметрической информации. Используя сглаженные оценки показателя Херста можно формировать диагностические признаки, позволяющие классифицировать различные состояния бортовых динамических систем, находящихся в условиях воздействия внешних факторов, в том числе, и в условиях нештатного функционирования объектов РКТ.

### **Библиографический список**

1. Назаров А. В., Якимов В. Л. Алгоритм выбора диагностических признаков при поиске мест и причин неисправностей бортовых систем объектов ракетно-космической техники // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2013. №641. С. 56 – 60.
2. Бутаков В., Граковский А. Оценка уровня стохастичности временных рядов произвольного происхождения при помощи показателя Херста // Компьютерное моделирование и новые технологии. 2005. Т. 9. №2. С. 27 – 32.

3. Клионский Д. М., Орешко Н. И., Геппенер В. В. Декомпозиция на эмпирические моды и ее использование при анализе дробного броуновского движения // Цифровая Обработка Сигналов. 2008. №3. С. 37 – 45.

4. Калуш Ю. А., Логинов В. М. Показатель Херста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. 2002. Том 5. № 4. С. 29 – 37.

5. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 544 с.