

# Интеллектуальные системы управления, анализ данных

© 2020 г. С.В. СОЛОВЬЕВ, канд.техн.наук (sergey.soloviev@scsc.ru)

(Публичное акционерное общество

“Ракетно-космическая корпорация “Энергия”, Королев, Московская обл.)

## МЕТОДИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕСУРСОВ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрена методика интеллектуального анализа телеметрических данных на основе современных математических методов обработки информации. Определены актуальные задачи анализа и прогнозирования с учетом 20-летнего опыта эксплуатации российского сектора международной космической станции (РС МКС). Дано принципиальное описание этих методов. Представлены результаты апробации на основе реальных данных, полученных из телеметрической информации РС МКС.

*Ключевые слова:* международная космическая станция, космический аппарат, управление полетом, идентификационная модель, интеллектуальный анализ, прогнозирование, контроль.

DOI: 10.31857/S0005231020090081

### 1. Введение

Наиболее масштабным, амбициозным и продолжительным международным научно-техническим экспериментом в настоящее время является проект Международной космической станции (МКС). В нем участвуют на постоянной основе 15 стран, а всего в научной и образовательной деятельности МКС уже приняли участие 82 страны. Начавшись в начале 90-х гг. XX в., проект МКС продолжает активно работать, и в настоящее время. Летная эксплуатация первого элемента МКС была начата 20 ноября 1998 г. с запуска функционального грузового модуля. По состоянию на начало 2019 г. в состав МКС входит 15 основных орбитальных модулей (ОМ) общей массой около 420 т, в том числе:

- российский сегмент (РС) МКС, включающий пять ОМ и транспортные корабли типа “Союз” и “Прогресс”;
- американский сегмент (АС) МКС, включающий 10 ОМ, различные фермы и солнечные батареи;
- европейский лабораторный модуль “Колумбус”;
- японский модуль “Кибо”;

Японский и европейский модули входят в состав АС МКС. Таким образом, МКС — это грандиозный рукотворный космический объект, на котором осуществляется большое количество разноплановых работ в интересах различных участников.

Очевидно, что непрерывная эксплуатация МКС — это многогранная и насыщенная деятельность, которая реализуется за счет многофункционального процесса управления полетом [1]. Контроль состояния составных частей ОМ, ОМ и МКС в целом является неотъемлемой частью данного процесса и служит основой для принятия решений на продолжение штатной программы полета или, при выявлении отклонений в состоянии МКС, на перевод в режим полета с ограниченной функциональностью. Однако в ходе полета изменение состояния происходит не только в результате целенаправленного воздействия для реализации процесса управления полетом, но и под влиянием внешних и внутренних неконтролируемых возмущающих факторов, а также естественного износа оборудования составных частей МКС. Источником внешних возмущающих факторов, или воздействий является в основном среда, в которой проходит полет МКС. Внутренние возмущающие воздействия являются следствием функционирования приборов и агрегатов МКС, возникновения в них неисправностей, а также некорректных воздействий при управлении вследствие сбоев в аппаратуре управления или иных причин. Естественный износ и процессы деградации свойств и характеристик, неизбежно происходящие в оборудовании и конструкции в процессе длительной эксплуатации, также накладывают дополнительные ограничения. Таким образом, процесс управления полетом не только сложен сам по себе, но и осуществляется при постоянно изменяющейся ситуации.

В РС МКС наиболее “свежий” ОМ (малый исследовательский модуль 1) провел на орбите в составе МКС уже более 10 лет. В соответствии с требованиями эксплуатационной документации непрерывно осуществляется анализ технического состояния РС МКС. Результаты данного анализа включаются в состав оперативных и ресурсных отчетов по результатам летных испытаний ОМ, на основании которых ежегодно выпускается заключение о подтверждении готовности к эксплуатации на следующий год. В указанных отчетах приводится информация о выполненных работах, затраченных ресурсах, наработке, изменению ключевых телеметрических параметров (ТМП) и описываются возникшие отказы или нештатные ситуации (НШС) с указанием причин их возникновения.

Однако ключевой особенностью отчетов является тот факт, что в них содержится только качественная оценка (работает/не работает) состояния оборудования и составных частей ОМ РС МКС. Анализ значений характеристик оборудования не проводится, а также не определяется деградация параметров состояния. Существенно, что не рассматривается возможная корреляция аномальных событий (отказов) в оборудовании и внешних возмущающих факторов полета МКС. Детальный анализ для подтверждения технических характеристик, взаимовлияние, особенности и прогноз состояния в отчетах не содержатся, хотя ранее такая практика существовала для других изделий.

Значительным показателем, способным существенно повлиять на работоспособность оборудования РС МКС, являются внешние воздействия факто-

ров космического пространства. Давно известно вредное воздействие космического излучения не только на электронные приборы, но и на материалы, основным источником которого является Солнце как ближайшая к Земле звезда. При этом состояние Солнца или солнечная активность изменяется в течение 11-летнего цикла в широких пределах и выражается в условных величинах (число Вольфа), хотя диапазон изменения весьма велик от нуля до 150 и более единиц. В настоящее время, т.е. в 2018–2019 гг., солнечная активность находится на уровне минимальных значений (от 0 до 10 условных величин), что соответствует середине солнечного цикла. Последний период солнечной активности пришелся на 2012–2014 гг. В ближайшие 3–5 лет солнечная активность будет повышаться и, следовательно, увеличится внешнее воздействие солнечного излучения на РС МКС, что потенциально повышает вероятность отказов и увеличивает скорость деградации характеристик оборудования.

С учетом сложившихся обстоятельств, принимая во внимание необходимость осуществления эксплуатации РС МКС как минимум до 2028 г. и далее возникает закономерный вопрос, возможно ли, используя накопленную за 20 лет архивную телеметрическую информацию (ТМИ), более точно, обосновано и детально определить состояние РС МКС и осуществить прогноз его дальнейшего функционирования с определением остаточного ресурса оборудования.

## **2. Интеллектуальный анализ ТМИ на основе цифровых идентификационных моделей**

Исследование динамики процессов при решении задач контроля в процессе управления полетом космических аппаратов (КА) позволяет сделать вывод о перспективности и практической значимости разработки систем анализа информации, использующих современные технологии обработки данных и методов интеллектуального анализа (Data Mining) [2].

Состояние комплекса ресурсов КА является ключевым фактором при осуществлении управления космическим полетом. Представляется целесообразным в качестве идентификационной модели комплекса ресурсов рассматривать цифровой двойник КА. Под цифровым двойником будем понимать результат обработки ТМИ, актуальный для текущего момента времени [3]. Этот результат позволит оценить, как состояние отдельных ресурсов и уровень деградации определенных технических характеристик, так и степень взаимовлияния ресурсов. По сути актуальный результат обработки ТМИ представляет собой динамический слепок (текущий набор) аналитических выводов о состоянии комплекса на основе анализа реальных данных ТМИ (текущих и архивных). В этом состоит основное отличие от имитационной модели, которая может лишь приближенно моделировать реальное функционирование КА на основе математического описания свойств элементов реального КА или его составных частей.

Анализ возможностей математического аппарата обработки данных и обобщения опыта управления полетом различных КА с учетом практических потребностей специалистов управления полетом позволил определить следующие методы исследования [4]:

- кластерный анализ данных для определения аномалий или отклонений в состоянии КА или его составных частей;
- вейвлет-преобразование для определения и локализации аномалий в отдельной составной части КА;
- прогнозирование на основе определения тенденций изменения телеметрических показателей (“параметров”) КА с применением методов анализа временных рядов.

Основной целью методики интеллектуального анализа и прогнозирования состояния является поиск скрытых и неочевидных закономерностей, отклонений или аномалий в больших объемах накопленной (архивной) ТМИ. Наибольший интерес с практической точки зрения представляет анализ состояния для незаменимого или заменяемого с высокой трудоемкостью оборудования РС МКС. К настоящему времени задача управления на основе прогнозирующих моделей применительно к приборам и агрегатам РС МКС не ставилась. Они заменялись или после отказа, или по выработке ресурса.

На первом этапе обучения по данным ТМИ, собранным при номинальной работе КА, с использованием различных алгоритмов строится база данных номинальных состояний, соответствующих нормальному (среднестатистическому) или штатному функционированию КА, что определяется по анализу технического состояния КА на предыдущих этапах полета или на аналогичных КА. Обработанные данные при этом формируют базу знаний — номинальных состояний. На втором этапе “рабочем” производится анализ состояния КА, при котором в режиме реального времени поступает текущая ТМИ от КА, производится анализ (на основе соответствующих алгоритмов Data Mining) и результаты обработки соотносятся с данными из базы номинальных состояний. Если устанавливается соответствие (по определенному критерию) данных из базы с поступившими данными, то входящие данные пополняют «номинальную» базу данных. При несоответствии фиксируется отклонение и происходит предупреждение оператора о выявленной аномалии.

### 3. Алгоритмы интеллектуального анализа

Интеллектуальный анализ состояния комплекса ресурсов РС МКС предлагается осуществлять с использованием следующих алгоритмов:

- кластерного анализа методом  $k$ -средних с евклидовой метрикой;
- непрерывного вейвлет-преобразования;
- процедуры кумулятивных сумм для временного ряда телеметрических параметров.

Данные, которые передаются в составе ТМИ КА, содержат значение телеметрических параметров (ТМП), по которым реализуется функция контроля состояния КА в процессе управления полетом. При этом значения ТМП, сформированные на борту КА специализированной аппаратурой в данный момент времени, будут образовывать многомерный вектор состояния. Таким образом, под вектором технического состояния КА, или его системы, будем понимать многомерный вектор  $X_m$ , образованный значениями ТМП  $x_i$ , ( $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  — общее количество фиксируемых ТМП) сформиро-

ванных на определенный момент времени. Процедурам кластеризации будем подвергать получаемые векторы.

Необходимость осуществить кластеризацию векторов технического состояния КА данных обусловлена наличием различных режимах работы КА в процессе полета и соответственно номинальных, но различных значений ТМП. Процесс орбитального движения КА, его ориентация в пространстве и внутреннее взаимовлияние оборудования КА при функционировании, также следует приводить к различным, но штатным состояниям КА.

Выбор алгоритма кластеризации основывался на следующих факторах:

— возможность использования для анализа данных (текущих и архивных) функционирования любой составной части КА;

— высокая скорость вычислительного процесса для работы с ТМИ, поступающей с борта КА в режиме реального времени;

— оперативность (без задержек в процессе анализа) обнаружения аномалий в поступающих данных.

Были проанализированы как иерархические, так и неиерархические методы кластерного анализа. Учитывая значительные объемы накопленных данных за 20-летний период эксплуатации МКС, иерархические методы были исключены из рассмотрения сразу из-за их большой трудоемкости использования на начальном этапе. Для неиерархических методов, из-за большого количества их разновидностей, ограничились изучением методов:  $k$ -средних,  $c$ -средних, EM-алгоритма, FOREL, распространения близости (AP). Для вычисления расстояния между векторами исследовались различные метрики. Выбор метрики является ключевым моментом исследования, от которого в основном зависит окончательный вариант разбиения объектов на классы при данном алгоритме разбиения. В конечном итоге, были использованы метрики: евклидово расстояние, манхэттенское расстояние и расстояние Чебышева.

В целях апробации анализа эффективности применения представленного метода кластерного анализа было проведено создание кластерной базы данных ТМИ системы исполнительных органов спуска (СИОС) транспортного пилотируемого корабля (ТПК) “Союз”. Контроль состояния и функционирования данной системы осуществляется на основе восьми значений ТМП, которые измеряются независимыми аналоговыми датчиками температуры (четыре штуки) и давления (четыре штуки). При построении кластерной базы данных номинального и штатного состояния СИОС использовались восьмимерные векторы  $X_8$ , образованные четырьмя значениями датчиков температуры и четырьмя значениями датчиков давления в топливных баках и баллонах наддува.

В отборе для построения базы знаний была использована архивная ТМИ, полученная при полете двух ТПК типа “Союз”, при которых было зафиксировано штатное состояние СИОС. Используя эти данные, были получены 2252 восьмимерных вектора, которые описывают номинальное состояние СИОС. Далее, для кластеризации методом  $k$ -средних, определено оптимальное количество кластеров с учетом следующих средних значений разных критериев кластеризации, в том числе: силуэтный коэффициент, индекс Калинского–Харабаза, индекс Дэвиса–Болдина, среднее внутрикластерное

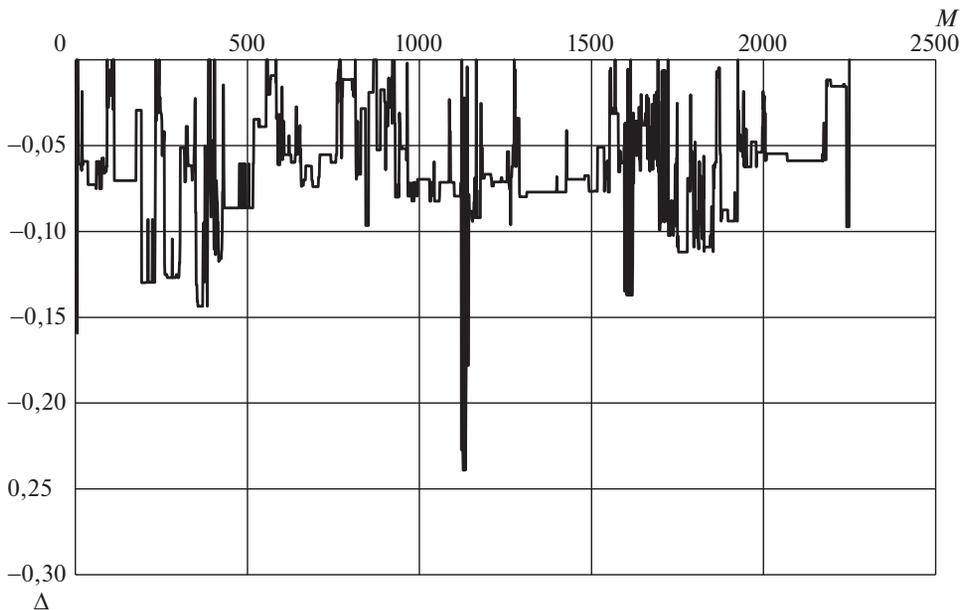


Рис. 1. График отклонений  $\Delta$  векторов при номинальном функционировании СИОС.

расстояние и коэффициент нечеткости разбиения. В результате было выбрано 25 кластеров для метода  $k$ -средних.

Все восьмимерные векторы, образованные значениями ТМП, прошли процедуру нормирования:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max(X_j)}.$$

Визуализация созданной базы данных номинальных состояний состоит в вычислении Евклидова расстояния от отдельного вектора до центра ближайшего кластера:

$$\Delta = \rho(x_i, x_k) - \rho_k^{\max}$$

где:

$$\rho(x_i, x_k) = \sqrt{\sum_{e=1}^n (x_{ie} - x_{ke})^2}, \quad \mathbf{e} = e = \overline{1, 8},$$

$\rho_k^{\max}$  — максимальное значение расстояния от центра кластера до вектора или радиус кластера.

Расчет отклонения  $\Delta$  визуально представляет сравнение радиусов сфер в восьмимерном пространстве. Если значение  $\Delta$  отрицательное, то радиус сферы для данного вектора меньше, чем радиус соответствующего ему кластера, т.е. вектор находится внутри номинального кластера. Положительное же значение  $\Delta$  соответствует случаю нахождения вектора вне границ номинальной области функционирования. Как видно из графика на рис. 1, при

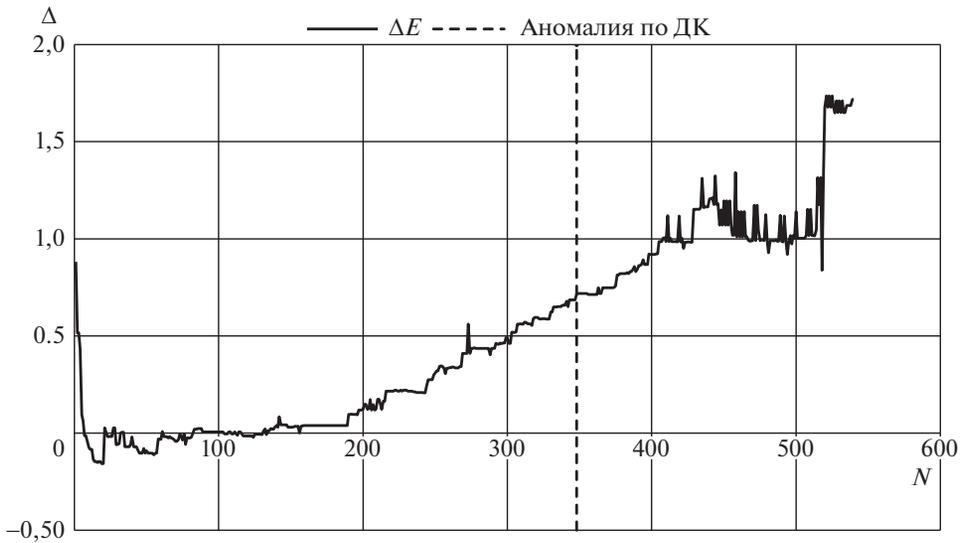


Рис. 2. График отклонений  $\Delta$  “аномальных” векторов.

номинальном функционировании бортовой системы отклонения  $\Delta$  векторов всегда отрицательны (кроме случаев, когда  $\Delta = 0$ , т.е. на границе кластера), что соответствует входимости вектора в кластер, т.е. номинальному функционированию.

С базой данных номинальных состояний были соотнесены и векторы, полученные с использованием данных, полученных при полете другого ТПК “Союз”, при котором были отмечены незначительные отклонения в значениях температурных параметров. С использованием этих векторов, условно назовем их “аномальными”, получен график отклонений, представленный на рис. 2.

Вертикальная прерывистая линия на графике означает момент обнаружения аномалии в функционировании СИОС ТПК “Союз” в реальном полете на основании экспертного анализа специалиста по контролю. Критерием проявления аномалии в состоянии контролируемого объекта для метода кластерного анализа служит появление отклонения  $\Delta$  в области положительных значений, что может сигнализировать о возникшей аномалии в работе системы. В рассмотренном примере, начиная с примерно 200-го вектора, имеется тенденция в постоянном увеличении значения  $\Delta$ . Так как каждому вектору ставится в соответствие временное значение (реальные дата и время), можно сказать, что состояние системы постепенно отклоняется от своей номинальной работы. Момент обнаружения такого отклонения  $N = 200$  соответствует 31.07.2013, в то время, как в реальных условиях аномалия достигает предельно допустимых значений при  $N = 348$ , что соответствует 08.10.2013, т.е. предлагаемый метод обнаруживает аномалию раньше на 2 мес (2 мес и 7 дней).

Практически важным результатом анализа при управлении полетом КА является определение места возникновения аномалий как предвестников нештатных ситуаций (НШС). Для этого предлагается комплексировать

несколько методов интеллектуального анализа в рамках одной задачи определения аномалий с целью уменьшения пределов неоднозначности ее решения.

Основной принцип предлагаемой методики состоит в том, что после кластерного анализа совокупности телеметрических параметров КА, каждый отдельно взятый физический телеметрический параметр проходит дополнительный специальный способ исследования, а именно применение процедуры вейвлет-анализа. Задача интеллектуального анализа решает вопрос не только выявления факта аномалий, но и определения причин и источников возникшей аномалии, а также в определении тенденций ее развития в последующие интервалы времени.

Как известно, значения ТМП КА на начальных этапах обработки рассматриваются в определенной шкале времени. В результате сплайновой аппроксимации значений получается кривая, которую можно интерпретировать как частотный сигнал.

Предлагаемый метод диагностики аномалий в работе составных частей КА состоит в том, чтобы выполнить анализ сигнала, сформированного из ряда значений ТМП, с выявлением в нем нежелательных изменений и аномалий, предшествующих возможным НШС. Анализ выполняется с использованием специального математического аппарата – вейвлет-анализа.

Вейвлет-преобразование представляет собой интегральное преобразование, в котором осуществляется свертка двух функций, одна из которых – вейвлет, а вторая – функция исследуемого сигнала [5]. Анализирующей функцией вейвлет-преобразования является не синусоида (комплексная экспонента), “растянутая” по всей временной оси, а локализованный “всплеск”, или “вейвлет”.

С точки зрения интеллектуального анализа ТМИ получаем частотное наполнение сигнала и моменты времени возникновения соответствующих этим частотам изменений в сигнале, т.е. обнаруживаем факт появления аномалии или НШС. Данному анализу подвергаются отдельные ТМП, которые описывают состояние характерных мест контролируемого оборудования КА, тем самым локализуя аномалию в конструкции КА.

Апробация предлагаемого метода интеллектуального анализа проведена следующим образом. На вход алгоритма поступает ТМИ, прошедшая стадию предварительной обработки и представляющая собой конкретные параметры, отражающие состояния КА, привязанные к конкретному моменту времени и имеющие установленную размерность физических величин. Выбор вейвлета осуществляется на основе информации о диапазоне значений ТМП, количестве локальных максимумов в ряде значений исследуемого ТМП на рассматриваемом интервале времени, а также на основе сопоставления величины модулей вейвлет-коэффициентов преобразования для случаев применения различных вейвлет-функций. Результатом процедуры вейвлет-преобразования является матрица вейвлет-коэффициентов, и ее анализ позволяет обнаружить в исследуемом сигнале аномальное изменение его значений и выявить возникающую НШС по величине и характеру поведения вейвлет-коэффициента. Обнаружение и локализация аномалий или НШС решает задачу выделения из общего числа вычисленных вейвлет-

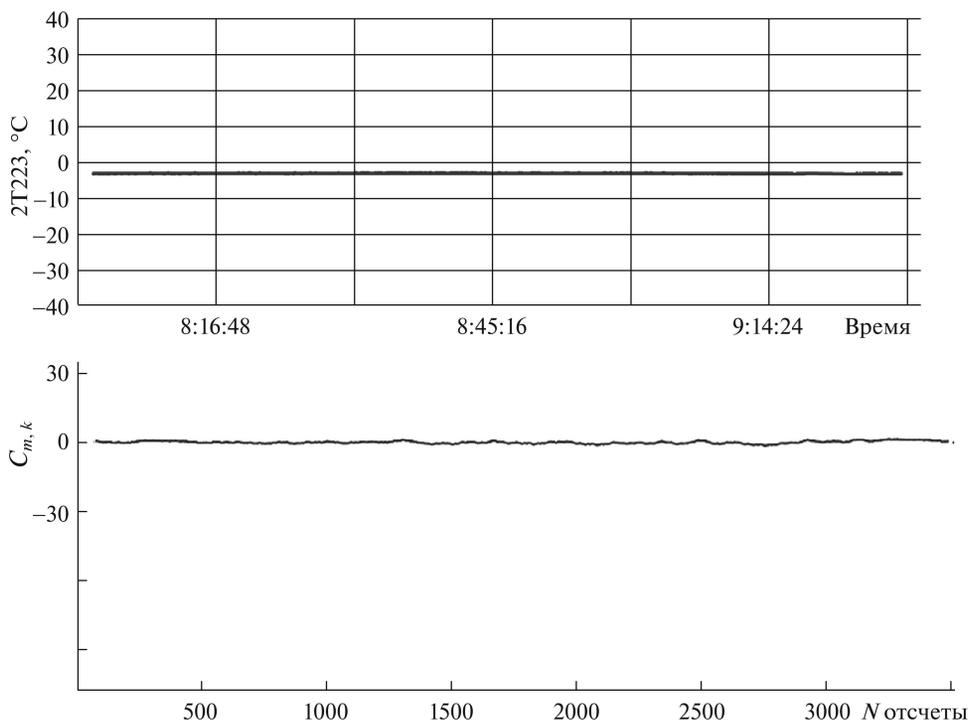


Рис. 3. Номинальное состояние ТМП и график вейвлет-коэффициентов.

коэффициентов и производится фиксирование момента времени возникновения аномалии или НШС.

Проверка работы методики анализа ТМИ с помощью предлагаемого специального математического аппарата выполнялась для системы кондиционирования воздуха (СКВ) из состава служебных систем РС МКС. Был выбран ТМП температуры хладагона 2Т223 на входе компрессора СКВ как характерный ТМП для данной системы. Номинальная работа СКВ показана на рис. 3. При этом верхний график демонстрирует значение ТМП температуры хладагона 2Т223, а нижний график величину соответствующего вейвлет-коэффициента.

На рис. 4 представлены обработанные значения этого ТМП на интервале времени, когда была зафиксирована НШС. При этом автоматика отключила компрессор СКВ на основе внутренней логики управления, а специалист управления не идентифицировал и не локализовал ситуацию, поскольку изменение ТМП было весьма незначительно и составило 6 градусов, что визуально заметить очень тяжело на фоне значений остальных ТМП.

Как видно из рис. 4 вейвлет-преобразование более наглядно отражает изменение значения ТМП на том самом участке, где происходит НШС. Резкое (более чем в 10 раз) изменение вейвлет-коэффициента служит критерием для автоматизированного обнаружения и локализации НШС, что позволяет повысить оперативность ее выявления. Предлагаемая методика позволяет

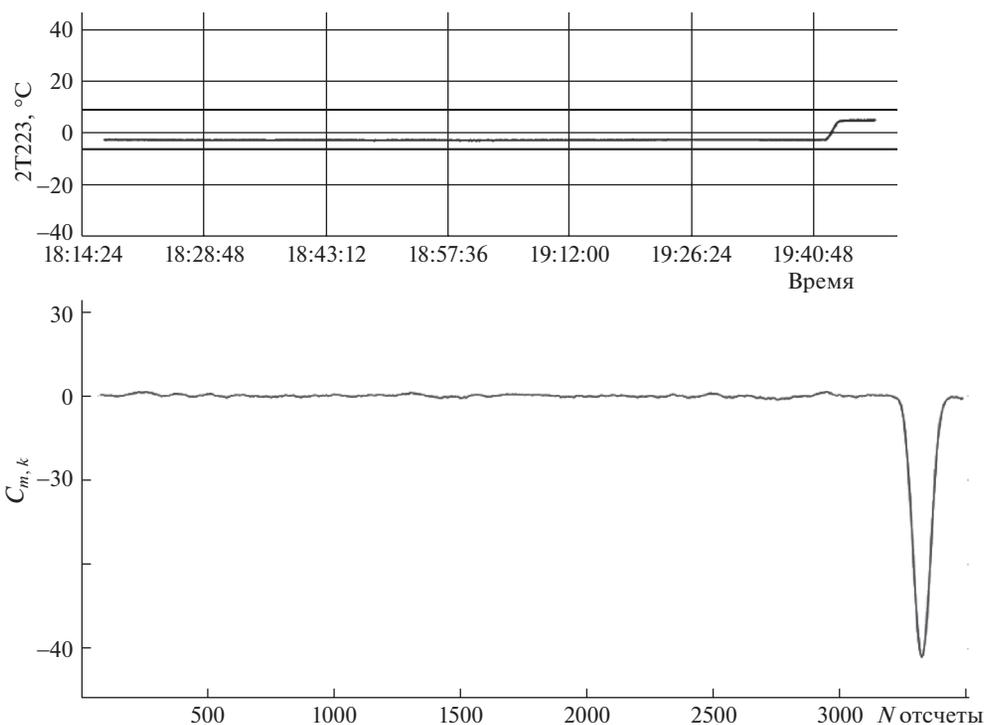


Рис. 4. Значение ТМП и график вейвлет-коэффициентов при НШС.

автоматически исследовать процесс изменения значения ТМП и развития НШС с использованием обновляемой базы данных вейвлет-коэффициентов, характеризующих номинальное поведение этих параметров.

Для решения задачи прогнозирования технического состояния на основе определения тенденций изменения параметров состояния КА рассмотрена возможность применения методов анализа временных рядов. Поскольку значения ТМП в потоке ТМИ от КА следуют через определенные и равные промежутки времени, то эта последовательность представляет собой классический временной ряд. Для его анализа применим методы исследования временных рядов. Наиболее применимой для задач прогнозирования характеристикой временного ряда следует считать величину тренда. Тренд ряда выявляет прямое влияние процесса или режима, происходящего на борту КА на контролируемый ТМП.

Исходя из опыта управления КА и свойств процессов и режимов работы, происходящих на борту, можно выделить:

- номинальный – тренд для определенной группы ТМП характерно и достоверно описывает номинальный процесс на борту КА;
- ненормальный – отклонение от номинального тренда ТМП выше допустимой величины, а также иное направление изменения величины ТМП;
- нехарактерный – появление тренда у ТМП, для которых он не характерен или не запланирован.

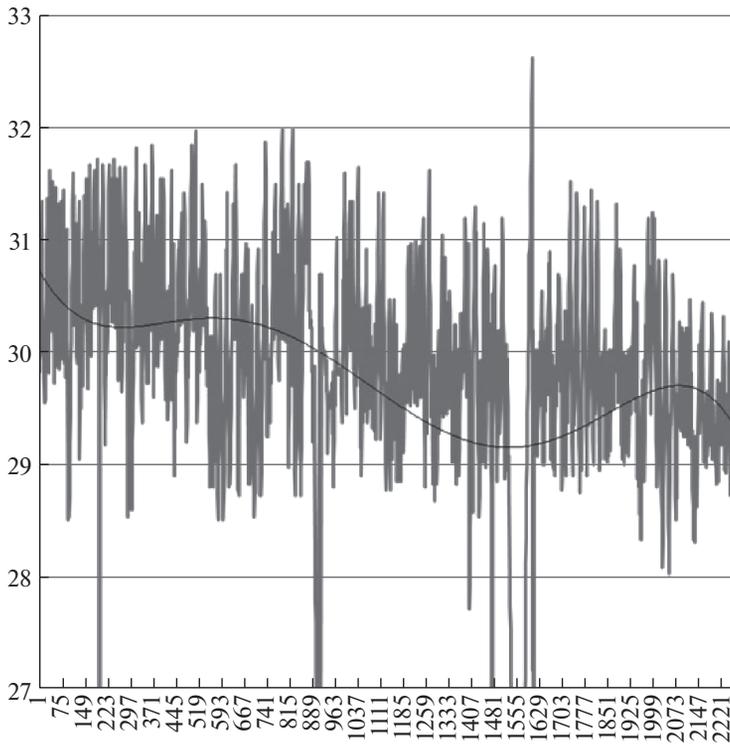


Рис. 5. Тренд напряжения на АБ на длительном интервале.

В основе рассматриваемого метода контроля состояния на основе анализа временных рядов лежит именно выявление тренда. Для практических задач анализа при управлении полетом КА важен факт перехода в тренд значения какого-либо ТМП или группы ТМП. Величина тренда и возможная динамика в будущем необходимы для соотнесения с привлекаемыми ресурсами или запасами и последующего вычисления располагаемого времени до достижения предельно допустимых значений ТМП или исчерпания ресурсов или запасов КА. При этом “располагаемое время” является самостоятельным параметром, сгенерированным в результате подобного интеллектуального анализа ТМИ КА.

Для апробации метода был применен метод кумулятивных сумм. Момент изменения свойств случайной независимой последовательности ТМП ( $Y_1 \dots Y_t$ ), которая до момента наступления нехарактерного/неноминального тренда описывается распределением с плотностью  $f_{\theta_0}(Y_t)$ , а после — распределением с плотностью  $f_{\theta_1}(Y_t)$ .

Достаточно наглядно данный метод продемонстрировал поведение аккумуляторной батареи (АБ), что представлено на рис. 5.

Принципиальная схема описанной методики интеллектуального анализа и прогнозирования состояния российского сегмента международной космической станции на основе цифрового двойника изображена на рис. 6. При этом номинальные данные получаются на начальном этапе полета ОМ в про-

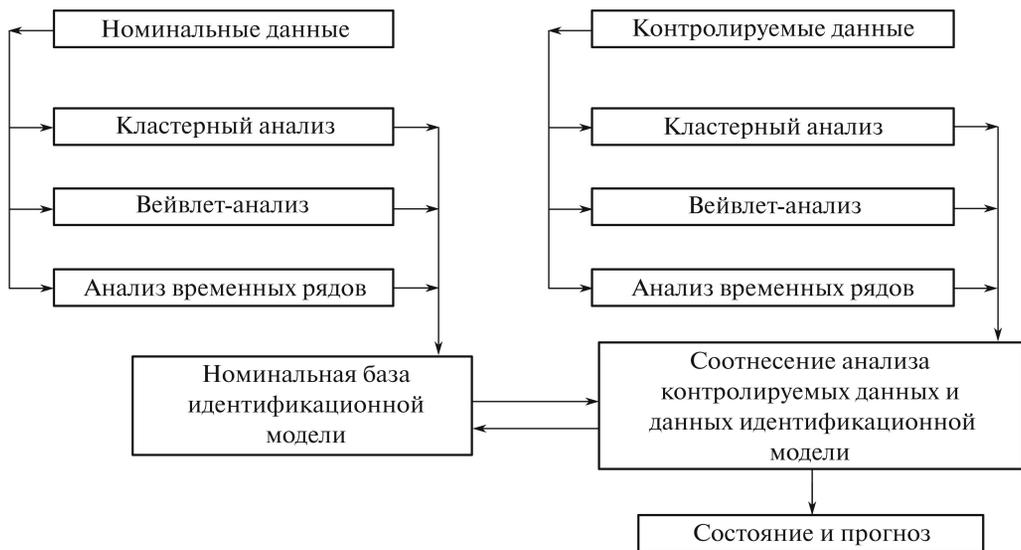


Рис. 6. Принципиальная схема интеллектуального анализа.

цессе проведения летных испытаний. В этот период все ТМП подвергаются детальному анализу и определяются параметры номинальных состояний. На базе этих данных формируется цифровой двойник, имитирующий номинальное состояние объекта. Вновь поступающие данные соотносятся с использованием трех вышеперечисленных методов, формируются данные о текущем состоянии и осуществляется прогноз.

#### 4. Заключение

Задача интеллектуального анализа ТМИ для управления полетом КА является своевременной, обоснованной и актуальной по следующим основным причинам:

- наличие базы информации за 20 лет эксплуатации РС МКС;
- продолжающаяся в настоящий момент эксплуатация РС МКС и предполагаемое в дальнейшем продолжение полета;
- необходимость прогнозирования поведения приборов, агрегатов и составных частей РС МКС в будущем с учетом возрастания внешних воздействующих факторов космического пространства.

Имеющийся математический аппарат и архивные данные позволяют приступить к решению поставленной задачи.

Решение задачи обеспечит наличие эффективного инструмента, методик и данных, перспективного для будущего применения, и позволит реализовать:

- прогноз вероятности выходов из строя или изменения эксплуатационных характеристик, входящих в состав РС МКС приборов и агрегатов;
- прогноз вероятности выходов из строя или изменения эксплуатационных характеристик составных частей МКС с учетом взаимного влияния функционирования приборов и элементов;

— подготовку работ по замене прибора до формальной выработки ресурса или формирование комплекта запасного оборудования на основе полученного прогноза “располагаемого времени” и выявленных тенденций изменения характеристик элементов, если расчетный прогноз выявит тенденции к отказу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами: Уч. пос. в 2 ч. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
2. *Bakhtadze N., Lototsky V., Pyatetsky V., Lototsky A.* Identification Algorithms Based on the Associative Search of Analogs and Association Rules // Proc. Int. Conf. Time Ser. Forecast (ITISE 2018) Granada, Spain, 19–21 September, 2018. P. 783–794. ISBN: 978-84-17293-57-4.
3. Теория управления. Дополнительные главы. Уч. пос. Под ред. Д.А. Новикова. М.: ЛЕНАНД, 2019.
4. *Соловьёв С.В.* Направления интеллектуализации операций контроля, применимых для оперативного управления полетом КА // Инженер. Журн.: наука и инновации. 2018. Вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1824>
5. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: РХД, 2001.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.*

Поступила в редакцию 07.11.2019

После доработки 18.03.2020

Принята к публикации 25.05.2020