

Новые математические методы анализа телеметрической информации в задачах контроля при управлении полетом космического аппарата

© О.И. Абанин, С.В. Соловьёв

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены математические методы анализа для решения задач контроля при управлении полетом космического аппарата. Проведен обзор существующих методов анализа телеметрической информации, применяемых при управлении полетом отечественных космических аппаратов. Изучены этапы обработки анализа телеметрической информации, определено место предлагаемых математических методов в системе контроля. Обоснована актуальность и возможность интеллектуализации методов решения задач в целях контроля состояния космического аппарата при управлении его полетом. Предложены способы автоматизации процессов контроля на основе специального математического аппарата. Приведено краткое математическое описание предлагаемых методов анализа сигналов. Предложены математические методы анализа телеметрической информации и указаны основные их преимущества. Особое внимание уделено вейвлет-преобразованию сигналов как наиболее универсальному из предлагаемых методов. Изложены основные принципы использования вейвлет-анализа, направленные на решение задач контроля и прогнозирования состояния космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, управление полетом, контроль, телеметрическая информация, автоматизация, вейвлет-преобразование, анализ состояния

В процессе управления полетом космического аппарата (КА) решаются задачи контроля его состояния. Применяемые в настоящее время методы контроля в основном заключаются в сравнении фактических значений контролируемых параметров состояния КА с их нормальными или прогнозируемыми значениями. На основании этого сравнения оцениваются реакции КА на выданные управляющие воздействия. В случае отклонения контролируемых параметров за допустимые пределы проводится дополнительный анализ полученной телеметрической информации (ТМИ) с целью установления причин, вызвавших эти отклонения.

Традиционные методы анализа ТМИ при управлении полетом КА включают использование алгоритмов, создаваемых специалистами, непричастными к разработке конкретного КА. В связи с этим создается набор правил, ограничений и граничных условий, составляющих основу подобных методов анализа и однозначно привязанных к особенностям конструкции и режима функционирования именно этого КА. Для повышения достоверности алгоритмов совокупный набор правил воз-

растает, что приводит к увеличению объема и усложнению алгоритма контроля. В этом заключается недостаток существующих методов.

В настоящее время происходит интенсивное развитие информационных технологий — совокупности программно-технологических средств и методов сбора, хранения, обработки и распространения информации. Существует возможность и обоснованная необходимость использования интеллектуальных математических методов для решения задач анализа в процессе контроля при управлении полетом КА. Однако в целях анализа ТМИ КА современные информационные технологии используются ограниченно. На практике для обеспечения алгоритмизированного анализа ТМИ разрабатывается специальное математическое обеспечение на основе лишь специализированных типовых алгоритмов.

Процесс обработки и анализа ТМИ включает:

- первичную обработку, при которой выполняется автоматизированная обработка поступающей ТМИ (в формате данных пакетной телеметрии) и ТМИ отображается в виде физических значений параметров состояния КА и его составных частей на экране для ее контроля оператором;
- вторичную обработку, при которой проводится анализ ТМИ с целью контроля состояния КА, учет ресурсов, мониторинг изменения параметров состояния КА и т. п. [1].

Основное направление совершенствования и автоматизации технологий анализа ТМИ — создание методов, основанных на математических преобразованиях большого объема данных. При этом появляется возможность установить скрытые и неочевидные закономерности, взаимовлияния, аномалии, неоднородности, что, в свою очередь, позволит спрогнозировать дальнейшее состояние КА. При длительных сроках активного существования КА задачи прогнозирования его технического состояния особо востребованы.

Для выявления скрытых корреляций внутри больших объемов информации применяется технология глубинного анализа данных (Data Mining). Подобные технологии нашли применение в различных отраслях, в которых проводится обработка информации в значительных объемах.

Интеллектуализация процесса анализа ТМИ возможна с использованием множества различных методов интеллектуального анализа [2]: классификации; прогнозирования; статических методов; нейронных сетей; методов вейвлет-преобразования и его разновидностей [3].

Вейвлет-преобразование (ВП) — это интегральное преобразование, представляющее собой свертку двух функций (вейвлет и функции исследуемого сигнала). ВП позволяет анализировать и обрабатывать сигналы и функции с изменяющимся во времени частотным

спектром. При этом результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала, но и точные сведения о моментах времени, при которых происходит быстрое изменение частотных составляющих этого сигнала. ВП позволяет очистить сигнал от шума, а также при необходимости сжимать сигнал. С помощью ВП становится возможным выделять кратковременные локальные особенности сигнала, незаметные на фоне его глобальных изменений. Вейвлеты используются в качестве фильтров высокочастотных изменений сигнала в целях изучения его долговременных эволюций. Кроме того, ВП служит для выявления точек разрыва и малых дефектов сигнала на фоне шумов.

Вейвлет-преобразование с точки зрения анализа ТМИ КА можно применить для решения нескольких задач:

- определения и выявления аномального изменения телеметрического параметра, характеризующего физический процесс на борту КА;
- фильтрации сбойных значений параметров, не удаленных при первичной обработке ТМИ;
- локализации аномалий или нештатных ситуаций при оперативном контроле состояния КА.

Отметим, что телеметрический параметр, описывающий физический процесс на борту КА (например, изменение температуры, давления, напряжения), или аналоговый параметр, формируемый бортовой системой телеметрических измерений, рассматривается как сигнал.

Спектральный анализ позволяет характеризовать свойства изменяемого сигнала по его частотной составляющей. Результат спектрального преобразования сигнала представляет собой его измененную функцию (коэффициенты преобразования).

Интегральные методы спектрального преобразования основаны на преобразовании Фурье (ПФ), с помощью которого устанавливается связь между временными и частотными характеристиками сигнала. Частотный спектр определяет наличие тех или иных частот в сигнале. Существенным недостатком ПФ является то, что по отношению к двум совершенно разным по виду (стационарному и нестационарному) сигналам оно показывает практически идентичные частотные спектры [4, 5]. Таким образом, при использовании ПФ можно увидеть частотное наполнение сигналов, но невозможно определить, в какой момент времени существует та или иная частота.

Преобразование Фурье декомпозирует сигнал на комплексные экспоненциальные функции различных частот. Процесс декомпозиции задается равенствами:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi\omega t} dt,$$
$$e^{-2\pi\omega t} = \cos(2\pi\omega t) + j\sin(2\pi\omega t).$$

Исследуемый сигнал умножается на функцию, имеющую гармонические составляющие, затем это произведение интегрируется. Если результат интегрирования имеет большое значение, то рассматриваемая частота ω существенно присутствует в сигнале. Отметим, что интеграл взят по всей области времени, т. е. результат вычисления для текущей частоты инвариантен по отношению к длительности ее существования. Этим объясняется неприменимость ПФ для сигналов с изменяющейся частотой. Такие сигналы, чаще всего являющиеся нестационарными, могут быть проанализированы с использованием разновидности ПФ — оконного преобразования Фурье (ОПФ).

В качестве преобразующей функции выбирается «окно стационарности», в рамках которого вычисления производятся согласно ПФ.

Формула ОПФ выглядит следующим образом:

$$STFX_x^{(\omega)}(t', \omega) = \int_t^t [x(t)W^*(t-t')] e^{-i2\pi\omega t} dt,$$

где $STFX_x^{(\omega)}(t', \omega)$ — функция ОПФ; $W^*(t-t')$ — оконная функция.

Функция $STFX_x^{(\omega)} = f(t', \omega)$ является трехмерным преобразованием, поэтому определяет не только распределение амплитуды при разных частотах, но и локализацию ее пиков во временной области.

«Проблема разрешения» ОПФ связана с принципом неопределенности Гейзенберга. В данном случае в основе этого принципа лежит тот факт, что невозможно одновременно измерить и частоту, и время с высокой точностью. ОПФ при постоянном неизменном окне может обеспечить либо хорошее временное разрешение, либо только частотное.

Эту проблему можно решить при использовании ВП одномерного сигнала. Она заключается в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами преобразующей функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в физическом пространстве (времени) [6].

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) выполняется аналогично ОПФ — сигнал умножается на преобразующую функцию (в данном случае на вейвлет). Результатом преобразования является свертка этих двух функций. Ширина окна при этом изменяется так, что преобразование вычисляется для каждой спектральной компоненты. НВП определяется по формуле

$$CWT_x^\Psi(\tau, s) = \Psi_x^\Psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt.$$

Здесь $\psi^*(t, \tau, s)$ — функция преобразования (или материнский вейвлет). Материнский вейвлет является прототипом для всех оконных функций.

Преобразованный сигнал представляет собой функцию двух переменных: параметра сдвига τ и параметра масштаба s . Сдвиг функции определяет положение окна во временной области.

В качестве частотной меры в случае ВП используется величина, обратная частоте, — масштаб. Масштаб определяет детализацию сигнала.

Результатом НВП являются вейвлет-коэффициенты $\nabla(t, s)$, которые составляют функцию позиции t и масштаба s . Коэффициенты $\nabla(t, s)$ показывают, как тесно коррелированы вейвлет и анализируемый сигнал на рассматриваемом интервале времени.

Принцип вейвлет-анализа ТМИ КА можно описать следующим образом. Представим вейвлет или волну, которая со сдвигом относительно исходного положения проходит через сигнал и является окном некоторого масштаба (ширины s) в процессе интегрирования.

Пусть $x(t)$ — анализируемый сигнал, который в рассматриваемом случае задается значением аналогового телеметрического параметра. Процесс его преобразования включает следующие процедуры.

1. Определение материнского вейвлета.

2. Старт процедуры расчета, начиная со значения масштаба $s = 1$. Проводится расчет интеграла при начальных условиях. Вейвлет помещается в начало сигнала, в точку $t = 0$. Выполняется вычисление интеграла с масштабом $s = 1$. НВП вычисляется для различных значений s так, чтобы вычислительная операция охватывала весь сигнал (полосу сигнала).

3. Вейвлет-функция масштаба $s = 1$ умножается на анализируемый сигнал и интегрируется на всем временном интервале. Выполняется нормализация, т. е. умножение интеграла на константу $\frac{1}{\sqrt{|s|}}$.

4. Происходит сдвиг вейвлета масштаба $s = 1$ вправо на $t = \tau$ относительно исходного положения материнского вейвлета:

$$\tau_{i+1} = \tau_i + e,$$

где e — достаточно малая величина.

5. Процедура выполняется до тех пор, пока вейвлет не достигнет конца сигнала, т. е. до того момента, пока сдвиг τ_i не станет равным диапазону рассматриваемого сигнала.

В итоге получается строка точек на масштабном-временном плане для масштаба $s = 1$.

6. Значение s увеличивается на Δs . Значение τ устанавливается в начальную точку сигнала ($\tau_i = 0$).

7. Для нового значения масштаба $s_{i+1} = s_i + \Delta s$ проводится увеличение параметра $\tau_{i+1} = \tau_i + e$. Далее вычисляется интеграл до момента окончания сигнала.

8. Процедура 7 выполняется для каждого значения s . Происходит заполнение масштабно-временной плоскости строка за строкой.

В результате получаются точки на масштабно-временной плоскости для каждого значения масштаба и времени. Вычисления при фиксированном масштабе дают строку на плоскости, при фиксированном времени — столбец. Определяя значения амплитуды сигнала для сетки масштабно-временной области, можно получить рассчитанные значения интегралов функции для всех масштабов в каждый момент времени. Итогом НВП является трехмерное представление сигнала (рис. 1) в масштабно-временной области представления с компонентами [7, 8].

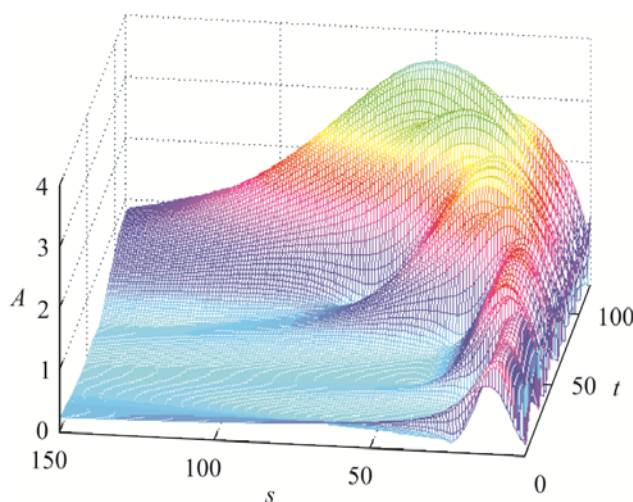


Рис.1. Трехмерное изображение результата вейвлет-преобразования для нестационарного сигнала:

A — амплитуда; t — время

Вейвлет-анализ позволяет увидеть кратковременные особенности анализируемого аналогового телеметрического параметра КА, неразличимые при его исследовании классическими методами. Допустим, что анализируемый сигнал ТМИ представляет собой синусоиду, имеющую небольшое искажение в области ее определения (рис. 2). На спектрограмме сигнала эта особенность не видна, однако после ВП на графике и диаграмме коэффициентов детализации эта особенность наглядно отображается.

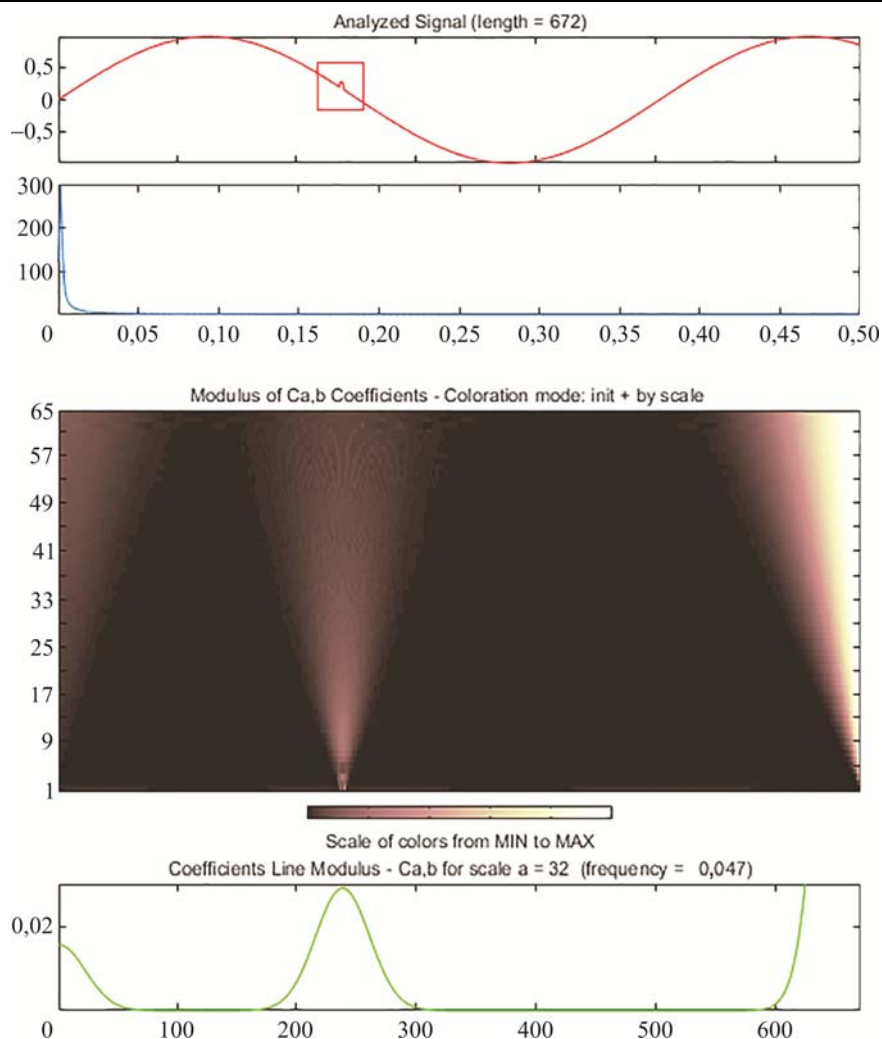


Рис. 2. Анализ сигнала с небольшим отклонением

В процессе ВП с ростом масштаба базисная вейвлет-функция преобразования увеличивается, захватывая больший диапазон и выделяя все более низкие частоты, что не способствует выявлению локальных особенностей. Следовательно, при анализе локальных изменений функции основной интерес представляет высокочастотная информация, поэтому необходимо анализировать не все вейвлет-коэффициенты, а только соответствующие вейвлет-функциям малого масштаба [9, 10]. Этот анализ позволяет решить задачу фильтрации сбойных значений телеметрических параметров.

Результат ВП можно интерпретировать как поверхность в трехмерном пространстве. Наиболее важная информация о ВП содержится в линиях локальных экстремумов поверхности модулей

вейвлет-коэффициентов, поиск которых проводится на каждом масштабе.

Анализ вейвлет-коэффициентов на малых масштабах позволяет судить о регулярности функции анализируемой ТМИ в каждой ее точке. Наиболее значимые вейвлет-коэффициенты могут свидетельствовать о наличии изменения контролируемых параметров. Абсолютные величины вейвлет-коэффициентов сравниваются с некоторым порогом, после чего определяются отклонения сигнала от его нормального поведения. Сравнение вейвлет-коэффициентов на нескольких уровнях ВП позволяет расширить возможности обнаружения скачков разных масштабов и уменьшить влияние шумовых выбросов.

Предлагаемые математические методы интеллектуального анализа ТМИ являются независимыми от конструктивного исполнения КА и режима его функционирования. Это возможно благодаря использованию исключительно математических преобразований в алгоритмах анализа.

Результатами работы математического метода анализа ТМИ с использованием ВП является отклонение или приращение отклонения аналогового параметра КА, характеризующее аномальное поведение физического процесса на борту КА.

Учитывая точную привязку каждого аналогового параметра к конкретной составной части КА или агрегата (прибора, узла, бака и т. п.), выявленная аномалия оперативно и автоматически локализуется, значит, можно идентифицировать причину, породившую эту аномалию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьёв С.В., Мишурова Н.В. Анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полетом космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 3. DOI 10.18698/2308-6033-2016-03-1474
- [2] Тихомиров С.А. *Алгоритмы анализа телеметрической информации и поддержки принятия решений в системах автоматизации испытаний космических ракет-носителей*. Дис. ... канд. техн. наук, Рязань, 2014. URL: http://www.dissforall.com/_catalog/t8/_science/39/736188.html (дата обращения 08.05.2018).
- [3] Соловьёв С.В. Интеллектуальный метод анализа для автоматизированного прогнозирования состояния КА. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 2. DOI 10.18698/2308-6033-2016-2-1469
- [4] Polikar R. *The Story of Wavelets*. USA, Iowa State University. URL: <http://users.rowan.edu/~polikar/RESEARCH/PUBLICATIONS/wavelet99.pdf> (дата обращения 08.05.2018).
- [5] Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. *Успехи физических наук*, 1996, т. 166, № 11, с. 1145–1170.
- [6] Малла С. *Вэйвлеты в обработке сигналов*. Москва, Мир, 2005, 671 с.
- [7] Козинев И.А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием сигналов и процессов с использованием

- вейвлет-преобразования. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 1, с. 4.
- [8] Смоленцев Н.К. *Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB*. Москва, ДМК Пресс, 2014, 628 с.
- [9] Дьяконов В.П. *Вейвлеты. От теории к практике*. Москва, Солон-Р, 2002, 448 с.
- [10] Мандрикова О.В., Полозов Ю.А. Критерии выбора вейвлет-функции в задачах аппроксимации природных временных рядов сложной структуры. *Информационные технологии*, 2012, № 1, с. 31–36.

Статья поступила в редакцию 30.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Абанин О.И., Соловьёв С.В. Новые математические методы анализа телеметрической информации в задачах контроля при управлении полетом космического аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1788>

*Статья подготовлена по материалам доклада,
представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике,
посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся
отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства,
Москва, 23–26 января 2018 года.*

Абанин Олег Игоревич — студент 5-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: анализ временных рядов, управление полетом космического аппарата, интеллектуальные системы управления. e-mail: olegaban@mail.ru

Соловьёв Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов, управление полетом. e-mail: sergey.soloviev@scsc.ru

New mathematical methods for analyzing telemetric information in spacecraft flight control

© O.I. Abanin, S.V. Solovyov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers mathematical methods for solving problems of spacecraft flight control. A review of existing methods for analyzing telemetric information used in flight control of domestic spacecrafts is carried out. The stages of processing the analysis of telemetric information are studied, the place of the proposed mathematical methods in the control system is determined. The urgency and possibility of intellectualization of methods for solving problems of monitoring the state of the spacecraft when controlling the flight are substantiated. Methods for automation of control processes based on a special mathematical apparatus are proposed. A brief mathematical description of the proposed methods for signal analysis is given. Mathematical methods for the telemetric information analysis are offered and their main advantages are indicated. Particular attention is paid to wavelet transform of signals as the most universal of the proposed methods. The basic principles of using wavelet analysis for solving problems of monitoring and forecasting the spacecraft state are outlined.

Keywords: spacecraft, flight control, monitoring, telemetric information, automation, wavelet transform, state analysis

REFERENCES

- [1] Solovyov S.V., Mishurova N.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-03-1474
- [2] Tikhomirov S.A. *Algoritmy analiza telemetricheskoy informatsii i poddezhki prinyatiya resheniy v sistemakh avtomatizatsii ispytaniy raket-nositeley*. Diss. cand. tekhn. nauk [Algorithms for the analysis of telemetric information and decision making support in the systems for testing space launch vehicles. Cand. eng. sc. diss.]. Ryazan, 2014. Available at: <http://www.dissforall.com/catalog/t8/science/39/736188.html> (accessed May 08, 2018).
- [3] Solovyov S.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 2. DOI: [10.18698/2308-6033-2016-2-1469](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-2-1469)
- [4] Polikar R. *The Story of Wavelets*. USA, Iowa State University. Available at: <http://users.rowan.edu/~polikar/RESEARCH/PUBLICATIONS/wavelet99.pdf> (accessed May 08, 2018).
- [5] Astafyeva N.M. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Advances of Physical Sciences*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170.
- [6] Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. New York, Academic Press Publ., 1999, 795 p. [In Russ.: Mallat S. *Veyvlety v obrabotke signalov*. Moscow, Mir Publ., 2005, 671 p.].
- [7] Kozinov I.A. *Informatsionno-upravlyaushchie sistemy — Information and Control Systems*, 2015, no. 1, p. 4.
- [8] Smolentsev N.K. *Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB* [Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB]. Moscow, DMK Press Publ., 2014, 628 p.
- [9] Dyakonov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From theory to practice]. Moscow, Solon-R Publ., 2002, 448 p.
- [10] Mandrikova O.V., Polozov Yu.A. *Informatsionnye Tekhnologii — Information Technologies*, 2012, no. 1, pp. 31–36.

Abanin O.I., fifth year student, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: time series analysis, spacecraft flight control, intelligent control systems.
e-mail: olegaban@mail.ru

Solovyov S.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Space Flight Dynamics and Control, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: design of automatic spacecraft, flight control. e-mail: sergey.soloviev@scsc.ru