

Направления интеллектуализации операций контроля, применимые для оперативного управления полетом космических аппаратов

© С.В. Соловьёв

ПАО РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Рассмотрены особенности существующей системы контроля за выполнением полетных операций и состоянием космических аппаратов. Приведены примеры использования искусственного интеллекта в логических играх. Представлены перспективные направления интеллектуализации операций контроля, применимые для оперативного управления полетом космических аппаратов. Рассмотрены современные методы интеллектуального анализа данных в различных областях. Предложены направления интеллектуализации, наиболее предпочтительные для создания основы перспективных программных средств анализа телеметрической информации на базе специального математического аппарата. Изложены принципы использования кластерного и вейвлет-анализа для автоматизации процесса определения тенденций, направленные на решение задач контроля и прогнозирования состояния КА.

Ключевые слова: космический аппарат, управление полетом, телеметрическая информация, интеллектуализация, искусственный интеллект, контроль и анализ состояния

Введение. К числу основных особенностей современных космических аппаратов (КА) можно отнести значительную продолжительность орбитального полета и весьма сложное устройство с большим числом систем, приборов и агрегатов. Существенным обстоятельством является увеличение функциональных возможностей КА, что приводит к возрастанию числа выполняемых полетных операций и режимов работы бортовых систем (БС) КА. Перечисленные особенности вызывают усложнение операций и технологий, применяемых для контроля за выполнением полетных операций и состоянием КА. Следует отметить увеличение трудоемкости таких работ и необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для осуществления контроля в процессе оперативного управления полетом КА.

Цель настоящей работы — выявить перспективные направления интеллектуализации операций контроля и возможности методов, применимых для оперативного управления. В первую очередь необходимо исследовать возможность использования основанных на современном математическом аппарате интеллектуальных систем, которые могут быть реализованы в виде автоматизированных систем контроля КА.

Текущее состояние. Существующая человеко-машинная система контроля КА, включающая в себя многочисленный набор специализированных программных средств, которые обеспечивают специалиста по управлению всеми данными, необходимыми ему для выполнения функций контроля, в настоящее время постоянно совершенствуется и развивается. В отечественной практике алгоритмы контроля принято подразделять на следующие виды [1]:

- двухуровневый контроль;
- матрицы состояния;
- древо поиска состояния;
- математическая модель КА.

Указанные виды алгоритмов контроля имеют свои преимущества и недостатки и в целом позволяют решать поставленные задачи. Тем не менее развитие этих алгоритмов сдерживается существенным усложнением программного обеспечения, увеличением объемов обрабатываемой информации и другими факторами. Наглядным примером может служить оценка объема матрицы состояний только для части БС транспортного пилотируемого корабля типа «Союз». В нем состояние комбинированной двигательной установки контролируется 95 телеметрическими параметрами (ТМП), система обеспечения теплового режима — 91 ТМП, система энергоснабжения — 51 ТМП. Таким образом, только арифметически получается минимум 440 895 различных состояний. Очевидно, что описание этих состояний — весьма трудоемкая задача, как и математическое моделирование БС КА и КА в целом, поскольку любая классическая математическая модель обладает только теми свойствами и знаниями, которые были заложены в нее при создании. Кроме того, математическая модель является конечной со всеми ограничениями.

Применение искусственного интеллекта. Рассмотрение предметной области и современных математических подходов показало, что альтернативным путем развития и модернизации технологии контроля КА является создание систем анализа информации, основанных на современных технологиях обработки данных и использовании методов искусственного интеллекта.

Термин «искусственный интеллект» в технических приложениях, согласно определению, данному Дж. Маккарти в 1956 г., трактуется как свойство технической системы или программного обеспечения технического устройства выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека [2]. Творчество — процесс свободной реализации с помощью инструментов, который строго не формализован и не ограничен правилами. В этом случае результат работы невозможно прямо вывести из начальных условий или он не определяется алгоритмами работы. Следует отметить, что

при этом результат работы алгоритма ожидаем, но нет однозначной последовательности действий алгоритма, которая приведет именно к такому, а не к иному результату.

Несмотря на очевидный прогресс в создании технических приложений, наделенных возможностью творить, существенным ограничением является то, что подобные средства применимы только для конкретного вида деятельности. В качестве примера можно привести многочисленные программы, позволяющие играть в шахматы. Например, шахматный суперкомпьютер Deep Blue в 1997 г. выиграл матч из шести партий у чемпиона мира по шахматам Г. Каспарова с перевесом в одно очко. Аппаратная часть этого компьютера была создана на базе кластера высокопроизводительных серверов производства компании IBM, в которых использовалось 480 специализированных шахматных процессоров [3]. В большинстве шахматных программ программная часть принципиально построена на применении типовых методов поиска по шахматному дереву, поиск осуществляется в три этапа [3, 4]. Сначала главный процессор исследует первые уровни дерева шахматной игры, а затем распределяет конечные позиции между вспомогательными процессорами для дальнейшего исследования. Вспомогательные процессоры углубляют поиск еще на несколько ходов, а затем раздают свои конечные позиции шахматным процессорам, которые в свою очередь осуществляют поиск на последних уровнях дерева [4]. Таким образом, Deep Blue обрабатывает примерно 1 млрд шахматных позиций в секунду. Данное устройство «творит» только в одной весьма специфичной области, при этом используется специально созданная аппаратная часть. Кроме того, как известно, в шахматах набор правил ограничен и строго однозначен, поэтому в полной мере говорить об искусственном интеллекте в данном случае не совсем корректно.

Более эффективной и существенно продвинутой в плане искусственного интеллекта программой следует считать программу игры в го AlphaGo и ее версию AlphaGo Zero, разработанную компанией Google DeepMind в 2015 г. В 2016 г. эта программа выиграла с существенным отрывом у профессионального игрока высшего ранга. Программа работает на любых аппаратных средствах при условии их высокого быстродействия. В 2016 г. применялась распределенная вычислительная сеть, содержащая 1920 центральных и 280 графических процессоров. Важно, что данная программа основана на общих принципах машинного обучения, которые могут быть применены и в других областях использования искусственного интеллекта, содержит только основные принципы (правила) игры и не использует специальных алгоритмов и оценочных функций, характерных для игры в го [5]. Обучение программы происходило на предварительно записанных партиях профессиональных игроков в го. Для этого AlphaGo

заранее проанализировала около 160 тыс. партий, т. е. процесс обучения шел методом «проб и ошибок». В процессе игры с соперником программа не использует библиотеки, иные базы данных или специализированные алгоритмы, оценочные функции и т. п. Здесь в полной мере проявляется принцип эмерджентности, или системный эффект, т. е. при работе возникают некие свойства, не присущие элементам программы по отдельности или не связанные особым образом.

Главное и фундаментальное отличие состоит в том, что в AlphaGo реализован метод глубинного обучения [6]. Этот метод применяется для систем распознавания образов, и можно полагать, что компания-разработчик (Google DeepMind) в целом опирается на разработки поисковой системы Google.

Смысл метода глубинного обучения состоит в использовании нейронной сети в ее наиболее продвинутом варианте — многоуровневой сверточной нейронной сети, которая для оценки позиции очень много раз случайным образом играет сама с собой, доводя игру до конца. Но поскольку вариантов игры в го на порядок больше, чем игры в шахматы, разработчики программы оперируют только пятью наиболее вероятными ходами [6]. В результате программа выбирает ход, при котором достигнуто наибольшее число побед. Примененные в программе AlphaGo сверточные нейронные сети состоят из нескольких уровней. Каждый уровень, получив на входе матрицу чисел, сравнивает ее с весами и, используя нелинейную функцию активации, выдает множество чисел на выходе, которые являются входными значениями для следующего уровня [5]. В процессе обучения нейронная сеть осуществляет «настройку» весов, в результате чего и появляется свойство сети «думать», спрогнозировать результат точнее практически невозможно вследствие чрезмерного числа вариантов.

В текущей версии AlphaGo используются четыре нейронные сети и перебор вариантов для поиска в дереве осуществляется методом Монте-Карло. Сети обучаются на большом числе примеров, при этом корректируется этап сравнения для определения результата, что переводит сеть в состояние, когда она может распознавать аналогичные позиции. Определить, по мнению разработчиков, как нейронная сеть приходит к таким решениям, затруднительно [6].

Направления интеллектуализации операций контроля. В технических приложениях существуют интересные предложения по применению интеллектуальных способов для решения тех или иных технических задач [7, 8]. Однако в силу специфики и прикладного характера подобных задач информация об этом в открытой печати весьма ограничена, что не позволяет глубоко разобраться в применяемом методе и его математическом аппарате.

В технологии глубинного анализа данных, нашедшей применение в различных областях, где проводится обработка значительных объемов информации, можно укрупненно различать взятые за основу методы интеллектуализации, применимые при решении технических задач:

– *классификация* (кластеризация). Этот метод является инструментом обобщения. Суть процесса формирования понятий заключается в нахождении закономерностей, свойственных классам;

– *прогнозирование*. Область применения этого метода широка: от предсказания возникновения отклонений, аномалий и отказов компонентов оборудования до выявления возможных изменений в программе полета КА;

– *нейронные сети*. Методы анализа данных на основе нейронных сетей применимы к нелинейным адаптивным системам. Функционально эти методы сходны с классификацией (кластеризацией), но для них характерна неизвестность правил классификации;

– *статистические методы анализа*. Достоинством этих методов является то, что в настоящее время существует большое число алгоритмов их реализации и накоплен опыт их применения в научных и инженерных приложениях. Статистические методы малоприменимы для выявления новых закономерностей изменения контролируемых параметров;

– *метод вейвлет-анализа* с использованием интегральных преобразований. Вейвлет-преобразование позволяет выполнять анализ и обработку сигналов и функций с изменяющимся во времени частотным спектром, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала, но и точные сведения о локальных координатах, при которых происходит быстрое изменение частотных составляющих этого сигнала.

Для управления полетом и, особенно, контроля современных КА [8, 9] весьма привлекательным представляется применение различных направлений интеллектуализации. С учетом потребностей специалистов управления на основе анализа возможностей управления и обобщения накопленного опыта можно выделить следующие направления интеллектуализации:

– кластерный анализ данных для комплексной оценки состояния КА;

– вейвлет-преобразования для локализации и идентификации аномалий в отдельной БС КА;

– прогнозирование на основе анализа тенденций изменения параметров состояния КА.

Метод кластерного анализа апробирован на тестовых задачах и реализован на базе метода кластеризации К-средних (k-means) [10].

Алгоритм анализа, построенный на основе этого метода, предпочтителен в силу простоты его реализации и высокой скорости вычислительного процесса [11], что важно при обработке телеметрической информации, поступающей с борта КА в режиме реального времени.

Для работы необходимо образовать многомерный вектор, который задается значениями ТМП, поступающими с борта КА. Для определения состояния БС КА, имеющей, например, восемь параметров, строится восьмимерный вектор, с которым проводятся необходимые преобразования. Значения параметров при этом выбираются с одинаковым временем формирования. При отсутствии каких-либо значений параметров вектор в тестовой задаче не формировался. Также исключались заведомо сбойные значения ТМП.

Кластеризация методом К-средних включает приведенную ниже последовательность действий.

1. Задание m начальных центроидов, которые могут быть выбраны из имеющихся k векторов либо подобраны случайно.
2. Вход в цикл, который продолжается до тех пор, пока положение центроидов кластеров не перестанет изменяться.
3. Обход каждого вектора и определение ближайшего центроида.
4. Привязка вектора к кластеру этого центроида.
5. Расчет новых координат центроидов кластеров после перебора всех векторов.
6. Проверка координат новых центроидов. Если они соответственно равны координатам предыдущих центроидов — выход из цикла, если нет, возврат к п. 3.

После образования кластеров процесс первичного обучения завершается и по результатам традиционного анализа принимается, что данное состояние соответствует норме. В процессе работы вновь формируемые векторы соотносятся с известными кластерами. Попадание вектора в кластер свидетельствует о нормальном состоянии анализируемой БС КА, при выходе за границы кластера как минимум требуется более детальное исследование данного факта другими средствами. С увеличением объема информации и плотности векторов граница кластеров уточняется.

Отличительной чертой предлагаемого принципа интеллектуального анализа является то, что отдельные ТМП, которые задаются вектором, могут находиться в пределах допуска, поэтому аномалия не выявляется. С увеличением объемов данных о нормальной работе БС КА можно уменьшать отклонение Δ , по которому выявляется признак аномалии или тенденции к появлению неисправности. Качественное улучшение результатов анализа представляется достижимым при увеличении числа разнородных ТМП, используемых для формирования многомерного вектора.

Исходя из принципа формирования векторов, можно считать, что предлагаемый метод в первую очередь направлен на выявление и определение аномалий или отклонений от номинального поведения БС КА или КА в целом. Главным свойством метода должно стать привлечение внимания оператора службы управления к тонким и неочевидным аномалиям, которые в большинстве случаев могут быть предвестниками зарождающихся нештатных ситуаций. Однако локализация аномалии и установление причины такого поведения рассмотренным методом представляются маловероятными.

Для этого целесообразно применять другие способы анализа. Протекающий на борту КА физический процесс или состояние КА в первую очередь описывается аналоговыми ТМП, которые формируются датчиковой аппаратурой, установленной на борту КА. В процессе измерений значение аналогового ТМП не является абсолютно постоянным, а с учетом работы БС КА изменяется в некоторых пределах. Таким образом, мы имеем дело с некоторой переменной величиной, или волной (англ. — wave).

При анализе и контроле состояния КА вейвлет-преобразование можно применить для решения нескольких задач, в том числе:

- определение, локализация и выявление аномального изменения отдельного ТМП, характеризующего физический процесс на борту КА;

- фильтрация сбойных значений параметров, не удаленных при первичной обработке телеметрической информации;

- локализация отклонений, аномалий или нештатных ситуаций при оперативном контроле состояния КА.

Иными словами, ТМП, который описывает физический процесс на борту КА, или аналоговый ТМП, формируемый бортовой системой телеметрических измерений, рассматривается как сигнал.

Спектральный анализ позволяет характеризовать свойства измеряемого сигнала по его частотной составляющей. Результат спектрального преобразования сигнала представляет собой его измененную функцию или коэффициенты преобразования. Интегральные методы спектрального преобразования основаны на преобразовании Фурье. Оно устанавливает связь между временным и частотным представлениями сигнала. Частотный спектр определяет наличие тех или иных частот в сигнале. Преобразование Фурье имеет существенный недостаток: по отношению к двум совершенно различным по виду сигналам — стационарному и нестационарному — оно показывает практически идентичные частотные спектры. Таким образом, преобразование Фурье позволяет увидеть частотное наполнение сигналов, но не определить, в какой момент времени существует та или иная частота.

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала состоит в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами преобразующей функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая функция этого базиса характеризует как определенную пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в физическом пространстве (времени). Непрерывный вейвлет-анализ выполняется на основе преобразования Фурье — сигнал перемножается с преобразующей функцией (в данном случае с вейвлетом). Результатом преобразования является свертка двух этих функций. Ширина окна при этом изменяется, так что преобразование вычисляется для каждой спектральной составляющей. Принцип вейвлет-анализа поступившей с борта КА телеметрической информации 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. В конечном счете мы получаем точки на масштабнo-временной плоскости для каждого значения масштаба и времени.

Результатом вейвлет-преобразования является трехмерное представление сигнала в масштабнo-временной области с компонентами s (масштаб), t (время), A (амплитуда). Вейвлет-анализ позволяет выявить особенности анализируемого аналогового ТМП КА, неразличимые при его исследовании классическими методами.

Другим методом интеллектуализации операций контроля, направленным на локализацию и определение аномалий в работе БС КА, является анализ каждого аналогового ТМП для вычисления тенденций или скорости изменения его значения.

Понятие «тенденция» [12] применительно к рассматриваемым вопросам является самостоятельной характеристикой, определяющей скорость и направление изменения аналогового ТМП. Учитывая это обстоятельство, анализу с использованием методики определения тенденций подвергают только аналоговые и температурные ТМП.

Для автоматизации процесса выявления тенденций требуется выполнение следующих основных действий.

1. Выделение функций нормального изменения значений каждого параметра КА. Для выполнения этого шага требуется некоторая статистика по аналогичным приборам (агрегатам) или предполагаемая на этапе проектирования характеристика изменения параметров приборов (агрегатов), которую можно было бы сформировать в статистическую модель КА.

2. Установление минимального числа поступивших от прибора (агрегата) значений параметров, достаточного для подтверждения тенденции в состоянии КА.

3. Определение соотношения нормального и текущего значений тенденций в каждой описанной нештатной ситуации для автоматического отображения этой связи на экранах специалистов группы контроля.

4. Предварительное определение настроек интерфейса (построение графика, статистические данные по предыдущим полетам и др.), позволяющих оперативно отобразить для специалиста группы контроля представленную информацию в максимально удобной форме.

Рассмотренные методы интеллектуализации операций контроля в настоящее время проходят апробацию на тестовых задачах. Продемонстрированы предварительные положительные результаты. Для ограниченного круга БС КА с целью обслуживания орбитальных комплексов разрабатывается автоматизированная система контроля, построенная, в том числе, с учетом приведенных здесь направлений интеллектуализации операций контроля.

Заключение. Описанные методы интеллектуализации операций контроля не являются абсолютно достаточными для решения широкого круга задач анализа и интеллектуализации операций контроля при управлении полетом КА. Безусловные успехи в создании нейросетей для игровых задач вселяют уверенность в возможность применения нейросетей в области управления полетом КА. Учитывая особенности функционирования КА на орбите, выраженные в определенной цикличности действий БС КА и КА в целом, в дальнейшем следует детальнее изучить и протестировать на реальной телеметрической информации статистические методы интеллектуального анализа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. Лысенко Л.Н., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 446 с.
- [2] Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. *Толковый словарь по искусственному интеллекту*. Москва, Радио и связь, 1992, 256 с.
- [3] Campbell M., Hoane A.J., Jr., Feng-Hsiung Hsu. Deep Blue. *Artificial Intelligence*, 2002, vol. 134, no. 1, pp. 57–83. DOI: 10.1016/S0004-3702(01)00129-1
- [4] Арлазаров В.Л. *Алгоритмы шахматных программ*. URL: <http://acm.mipt.ru/> (дата обращения 21.11.2017).
- [5] Burger C. Google DeepMind's AlphaGo: How it works. *On Personalization and Data*. URL: <https://www.tastehit.com/blog/google-deepmind-alphago-how-it-works/> (дата обращения 20.10.2017).
- [6] Хассабиб Д. *Как работает искусственный интеллект (III) DeepMind*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=K9Na-8r9SLA> (дата обращения 01.11.2017).
- [7] Соловьёв С.В. Интеллектуальный метод анализа для автоматизированного прогнозирования состояния КА. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 2 (50). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1469
- [8] Wertz J.R., Puschell J.J., Everett D.F. *Space mission engineering: The new SMAD*. Microcosm corp., 2011, 1033 p.

- [9] Фонтескью П., Старк Дж., Суинерд Г., ред. *Разработка систем космических аппаратов*. Москва, Альпина Паблишер, 2017, 764 с.
- [10] Соловьев С.В., Хаиров К.И. Метод прогнозирования состояния космических аппаратов на основе интеллектуального анализа данных. *Труды XIX международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»*, 2017, с. 218–223.
- [11] Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко В.П., Интеллектуальный анализ телеметрической информации для диагностики оборудования космического аппарата. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2016, № 1, с. 64–75.
- [12] Лукашин Ю.П. *Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов*. Москва, Финансы и статистика, 2003, 415 с.

Статья поступила в редакцию 25.10. 2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Соловьев С.В. Направления интеллектуализации операций контроля, применимые для оперативного управления полетом космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1824>

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

Соловьёв Сергей Владимирович — канд. техн. наук, ведущий конструктор ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов, управление полетом.
e-mail: sergey.soloviev@scsc.ru

Directions for control operations intellectualization applicable for operational space flight control

© S.V. Soloviev

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolyov,
Moscow Region, 141070, Russia

The paper focuses on some particularities of the present system of control over implementation of flight operations and space vehicle condition. The study gives the examples of the most effective application of artificial intelligence in logical games. Promising directions of control operations intellectualization applicable for efficient space flight control were presented. Contemporary methods of intellectual analysis in different fields were considered. As a result, we suggested the directions of intellectualization which are the most satisfying for creating the base of prospective software applications for analysis of telemetric information with the use of special mathematical apparatus. Stated principles of using cluster and wavelet analysis for automatization of tendency detecting process are directed to solve control missions and space vehicles condition predicting.

Keywords: *space vehicle, flight control, telemetric information, intellectualization, artificial intelligence, control and condition analysis*

REFERENCES

- [1] Soloviev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Space flight control]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 446 p.
- [2] Averkin A.N., Gaaze-Rapoport M.G., Pospelov D.A. *Tolkovyy slovar po iskusstvennomu intellektu* [Artificial intelligence explanatory dictionary]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1992, 256 p.
- [3] Campbell M., Hoane A.J., Jr., Feng-Hsiung Hsu. Deep Blue. *Artificial Intelligence*, 2002, vol. 134, no. 1, pp. 57–83. DOI: 10.1016/S0004-3702(01)00129-1
- [4] Arlazarov V.L. *Algoritmy shakhmatnykh programm* [Chess software algorithms]. Available at: <http://acm.mipt.ru/> (accessed November 21, 2017).
- [5] Burger C. *Google DeepMind's AlphaGo: How it works. On Personalization and Data*. Available at: <https://www.tastehit.com/blog/google-deepmind-alphago-how-it-works/> (accessed October 20, 2017).
- [6] Hassabis D. *Kak rabotaet iskusstvenny intellekt (II) DeepMind* [How artificial intelligence (AI) DeepMind works]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=K9Na-8r9SLA> (accessed November 1, 2017).
- [7] Soloviev S.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, issue 2 (50). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1469
- [8] Wertz J.R., Puschell J.J., Everett D.F. *Space mission engineering: The new SMAD*. Microcosm corp., 2011, 1033 p.
- [9] Fortescue P., Stark J., Swinerd G. *Spacecraft Systems Engineering*. Wiley Publ., 2011, 724 p. [In Russ.: Fortescue P., Stark J., Swinerd G. *Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov*. Moscow, Alpina Publisher Publ., 2017, 764 p.].
- [10] Soloviev S.V., Khairov K.I. *Metod prognozirovaniya sostoyaniya kosmicheskikh apparatov na osnove intellektualnogo analiza dannykh* [Prediction method for space vehicles condition on the basis of intellectual analysis of data]. *Trudy*

- XIX mezhdunarodnoy konferentsii "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"* [Proc. of 19th International Conference "Problems of control and simulation in complex systems"]. 2017, pp. 218–223.
- [11] Abramov N.S., Talalaev A.A., Fralenko V.P. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy — Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2016, no. 1, pp. 64–75.
- [12] Lukashin Y.P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov* [Adaptive methods of short-time predictions of timing series]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003, 415 p.

Soloviev S.V., Cand. Sc. (Eng.), Chief Designer, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia. Research interests: automatic space vehicles engineering, flight control. e-mail: sergey.soloviev@scsc.ru