



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29

EDN: FERBGZ

УДК 629.782


Научная статья / Research article

## Методический подход к решению проблемы автономного парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом

Д.А. Орлов<sup>a</sup> , С.А. Купреев<sup>a</sup> , О.Е. Самусенко<sup>a</sup> , В.М. Мельников<sup>a</sup> , И.В. Буркова<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup>Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

 orlov-da@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 17 ноября 2022 г.

Доработана: 27 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 2 марта 2023 г.

### Ключевые слова:

автономное управление, идентификация полетных ситуаций, нештатные полетные ситуации, принятие решений, бортовая аппаратура

**Аннотация.** В рамках основных тенденции развития мировой космической деятельности – расширение состава околоземных орбитальных группировок космических аппаратов, активизация исследования планет и тел Солнечной системы, повышение требований к качеству и надежности осуществления космических экспедиций – на первый план выдвигается проблема развития и усовершенствования методики оптимального управления, системного анализа, поддержки принятия решений в целях проектирования высокоэффективных систем управления космических аппаратов. К этим исследованиям относится формирование методических подходов к изучению оптимального управления аппаратами при их движении в атмосферах планет, автономному управлению космическим аппаратом в условиях неопределенности полетных ситуаций и др. Проблемным вопросом проектирования экспедиций дальнего космоса является организация эффективного управления космическим аппаратом при значительной его удаленности от наземных станций. При этом безальтернативное условие успешного осуществления программ полета – это разработка и применение автономных систем управления космического аппарата, основанных на использовании высокоэффективных технологий сбора и обработки измерительной информации, что предопределяет необходимость совершенствования методов и алгоритмов автономного принятия решений по управлению космическим аппаратом. Разработан новый методический подход к структурному построению автономных систем управления космического аппарата, основанный на созданных технологиях идентификации полетных ситуаций: обработка проводимых измерений; формирование логических решающих правил; прогнозирование траекторий полета и работоспособности бортовой аппаратуры. Приведена формальная постановка задачи автономного принятия решений по управлению космическим аппаратом.

### Для цитирования

Орлов Д.А., Купреев С.А., Самусенко О.Е., Мельников В.М., Буркова И.В. Методический подход к решению проблемы автономного парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 17–29. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29>




## A methodical approach to solving the problem of autonomous parrying of contingencies situations in spacecraft control

Dmitry A. Orlov<sup>a</sup>  , Sergei A. Kupreev<sup>a</sup> , Oleg E. Samusenko<sup>a</sup> ,  
Vitaly M. Melnikov<sup>a</sup> , Irina V. Burkova<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>RUDN University, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup>Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

 orlov-da@rudn.ru

### Article history

Received: November 17, 2022

Revised: February 27, 2023

Accepted: March 2, 2023

### Keywords:

autonomous control, identification of flight situations, decision making, onboard equipment

**Abstract.** As part of the main trends in the development of world space activities – expanding the composition of near-Earth orbital constellations of spacecraft, intensifying the study of planets and bodies of the solar system, increasing the requirements for the quality and reliability of space expeditions – the problem of developing and improving the methodology of optimal control, system analysis, decision support to design highly efficient spacecraft control systems is brought to the fore. These studies include the formation of methodological approaches to the study of the optimal control of spacecraft during their movement in the atmospheres of planets, the autonomous control of a spacecraft under conditions of uncertain flight situations, etc. The problematic issues of designing deep space expeditions include the organization of effective control of the spacecraft with its considerable distance from ground stations. At the same time, an uncontested condition for the successful implementation of flight programs is the development and application of autonomous spacecraft control systems based on the use of highly efficient technologies for collecting and processing measurement information. This determines the need to improve the methods and algorithms of autonomous decision-making on the spacecraft control. The authors develop a new methodological approach to the structural construction of autonomous spacecraft control systems based on the created technologies for identifying flight situations: processing measurements; forming logical decision rules; forecasting flight trajectories and on-board equipment operability. A formal statement of the problem of autonomous decision-making on spacecraft control is provided.

### For citation

Orlov DA, Kupreev SA, Samusenko OE, Melnikov VM, Burkova IV. A methodical approach to solving the problem of autonomous parrying of contingencies situations in spacecraft control. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):17–29. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29>

### Введение

В активизации исследования дальнего космоса [1–4] существенно повышаются требования к проектированию космических экспедиций. Приобретает большую значимость проблема обеспечения высокого уровня надежности эксплуатации создаваемых дорогостоящих изделий космической техники, так как срыв программ полета ведет к огромным потерям финансовых и технических ресурсов. Кроме того, в связи с прогнозируемой высокой интенсивностью изменения динамики полета космического аппарата (КА) при реализации экспедиций дальнего космоса, осо-

бенно при движении аппаратов в атмосферах планет, возрастает вероятность возникновения нештатных ситуаций и повышаются требования к оперативному их устранению.

Характерной особенностью проектирования космических экспедиций является необходимость учета влияния на процесс управления множества разноплановых факторов, связанных как со спецификой построения управляемых объектов, так и с условиями их полета. Так, при возникновении признаков нарушения работоспособности бортовой аппаратуры необходима разработка и применение алгоритмов парирования неисправностей [5–7].

Анализ существующей литературы позволил установить наличие значительного числа работ по вопросам принятия решений по управлению космическим аппаратом, проблеме создания и применения автономных систем в различных сферах научно-практической деятельности, в том числе при управлении космическими аппаратами [8–18]. Вместе с тем показано отсутствие методического подхода к решению задач автономного парирования нештатных ситуаций. На первый план выдвигается проблема создания новых и развития существующих методов и алгоритмов управления перспективными космическими аппаратами. Это даст возможность проектировать высокоэффективные системы управления, позволит значительно повысить качество и надежность реализации космических экспедиций.

Однако эти работы в основном направлены на исследование отдельных вопросов проектирования и функционирования систем управления. Так, в [13] описывается система, обеспечивающая парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом Deep Space One. В [8–10; 13] исследуются вопросы выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций при диагностике работоспособности бортовой аппаратуры космического аппарата, в [11; 12] описываются различные варианты базы знаний. Вместе с тем в существующих материалах недостаточно освещены вопросы построения систем управления, обеспечивающих основные операции процесса принятия решений: от анализа влияния системных связей на процесс управления и прогноза возникновения нештатных ситуаций до исполнения корректирующих программ.

В настоящем исследовании основное внимание уделяется разработке методического подхода к структурному построению системы автономного управления космическими аппаратами, которая будет в дальнейшем использоваться для построения оптимального управления и принятия автономных решений в задачах проектирования систем управления космического аппарата.

### **1. Анализ особенностей методического подхода к решению проблемы автономного управления космическими аппаратами**

Исключительно важной представляется проблема организации автономного управления космическими аппаратами, необходимость решения которой может быть обусловлена различ-

ными обстоятельствами, в первую очередь нарушением работоспособности бортовой аппаратуры, а также возможными неопределенностями текущих полетных ситуаций. В этих условиях только оперативное принятие правильных решений по управлению космическим аппаратом может предотвратить развитие негативных тенденций динамики движения космических аппаратов и обеспечить необходимые условия качественного выполнения научных экспериментов и программ полета. Высокий уровень оперативности принятия решений по управлению космическим аппаратом достигается за счет разработки адаптивных алгоритмов идентификации полетных ситуаций и формирования логических решающих правил.

Данная проблема наиболее трудноразрешима при управлении аппаратами дальнего космоса, предназначенными для изучения планет Солнечной системы и припланетного пространства. Основные отличия функционирования космических дальнего космоса аппаратов от аппаратов ближнего космоса заключаются, во-первых, в их большой удаленности от наземных пунктов управления, что существенно снижает быстродействие информационного обмена и принятия решений, и, во-вторых, в существующей в настоящем времени неточности знания характеристик околопланетного пространства, в первую очередь параметров атмосфер исследуемых планет.

Таким образом, проблема обеспечения оперативного автономного управления является актуальной при проектировании экспедиций дальнего космоса.

Очевидно, что для эффективного автономного управления космического аппарата должна быть обеспечена возможность решения взаимосвязанных между собой следующих основных задач:

- проведение оперативной идентификации текущих полетных ситуаций с помощью бортовых средств и алгоритмов, что является особенно важным при управлении космическим аппаратом с высокой динамикой изменения параметров движения, например при полете аппарата на участках аэродинамического торможения или при проведении ракетодинамических маневров;
- автоматизированная выработка рекомендаций по формированию программ управления с использованием предварительно разработанной и

содержащейся в базе знаний бортовой системы управления совокупности взаимосвязанных решающих правил с учетом полученных результатов идентификации текущих полетных ситуаций и граничных условий полета космического аппарата;

– оценка правильности вырабатываемых рекомендаций путем анализа результатов прогнозирования динамики изменения параметров движения космического аппарата на последующих участках полета.

Анализируя особенности перечисленных задач, следует отметить, что необходимым условием и вместе с тем основной трудностью их решения в бортовом исполнении является создание высокоэффективных логических решающих правил, охватывающих максимально возможные случаи возникающих полетных ситуаций, применяемых для парирования негативных тенденций и корректировки траекторий движения космического аппарата в практически любых складывающихся текущих условиях.

Принцип, по которому формируются решающие правила, составляющие основу базы знаний, заключается в их структурном построении: каждое правило из существующего множества описывается в формате – «если  $S_k$ , то  $U_j$ », где  $S_k$  – установленное состояние объекта,  $U_j$  – управляющее воздействие на объект, соответствующее состоянию космического аппарата в текущий момент времени [19–23]. В определенных условиях при таком структурном построении базы знаний и организации рационального процесса выбора необходимых правил из общей совокупности может быть достигнут желаемый результат управления объектом. Применяемый принцип формирования логических решающих правил является наиболее простым в реализации и вместе с тем эффективным для процессов эволюции объектов с ограниченным числом возможных состояний и достаточно хорошо прогнозируемыми полетными ситуациями космических аппаратов. В частности, разработанные таким образом решающие правила успешно использовались при парировании нештатных ситуаций в работе бортовых систем, достаточно часто возникающих при управлении орбитальными космическими аппаратами. В этих случаях составленные командные воздействия направлены в основном не на коррекцию орбитальных параметров движения аппарата, а на выбор рациональных режимов управления бортовой аппаратуры.

Тем не менее для достаточно широкого класса задач управления космическим аппаратом с высокой динамикой изменения полетных ситуаций указанный принцип построения решающих правил не всегда позволяет выбрать правильные решения по управлению космическим аппаратом. Наиболее характерным примером таких задач является управление космическим аппаратом в атмосфере в условиях неточности знания ее параметров. Например, при решении задач посадки космического аппарата на поверхность планет возможные неопределенности в значениях плотности атмосфер  $\rho$  могут привести к существенному изменению качественного характера траекторий полета по сравнению с номинальными. Так, при входе космического аппарата в атмосферу вблизи верхней границы физически реализуемого коридора даже небольшое уменьшение плотности  $\rho$  приводит к вылету аппарата из атмосферы, а при входе космического аппарата в окрестности нижней границы увеличение плотности  $\rho$  является причиной превышения максимальных величин перегрузки и температуры сверх допустимых значений. В этих случаях возможные отклонения значений плотности атмосферы  $\rho$  от заранее прогнозируемых (что может привести к срыву выполнения задач космической миссии) существенно влияют на корректирующие программы управления аэродинамическими силами, обеспечивающими перевод космического аппарата в номинальный режим полета. Стоит отметить, что для одинаковых отклонений  $\delta\rho$  при разных значениях скорости  $V$ , высоты  $h$ , угла наклона вектора скорости к местному горизонту  $\theta$  и курсового  $\varepsilon$  углов полета космического аппарата корректирующие управляющие воздействия могут сильно различаться, так как вариации возможных полетных ситуаций носят широкий характер. Полетные ситуации связываются логическими операциями типа «если  $S_k$ , то  $U_j$ », а также практической невозможностью их полного учета в виде формализованных решающих правил по указанному принципу. При динамично меняющихся полетных ситуациях задача определения правильных функций управления усложняется чрезвычайно высокой чувствительностью характера траектории движения космического аппарата от подаваемых командных воздействий. Например, неправильное по времени изменение (несколько секунд) аэродинамического качества с одного граничного значения на другое может привести к вылету аппарата из атмосферы и срыву программы посадки

космического аппарата в заданную область поверхности планеты.

Поэтому в условиях высокой интенсивности изменения параметров движения космического аппарата представляется целесообразным составление логических решающих правил по принципу функциональных аналитических (а не логических) зависимостей управляющих воздействий от характеристик текущего и прогнозируемого состояний управляемого объекта. При этом быстрое изменение полетных ситуаций вызывает необходимость применения решений по управлению космическим аппаратом в масштабе времени, близком к реальному, что вызывает повышенные требования к разработке расчетных аналитических зависимостей с целью обеспечения адекватного моделирования динамики полета космического аппарата.

В формализованном виде расчетные соотношения должны выглядеть следующим образом:

$$U_j = f(\xi_k, S_k, S_{k+1}), \quad (1)$$

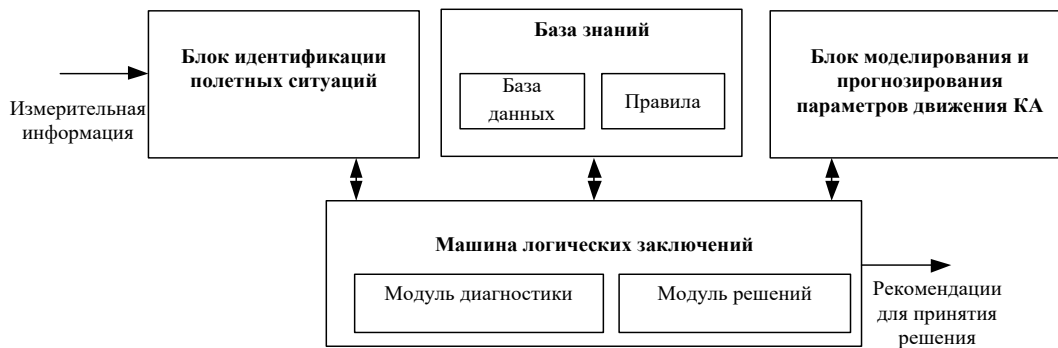
где  $\xi_k$  – отклонения характеристик текущего состояния объекта от номинального;  $S_{k+1}$  – номинальное состояние объекта на следующий интервал времени.

С помощью выражения (1) определяются управляющие воздействия на объект  $U_j$  в зависимости от идентификационных возмущенных текущих состояний, а также от требуемых прогнозируемых состояний.

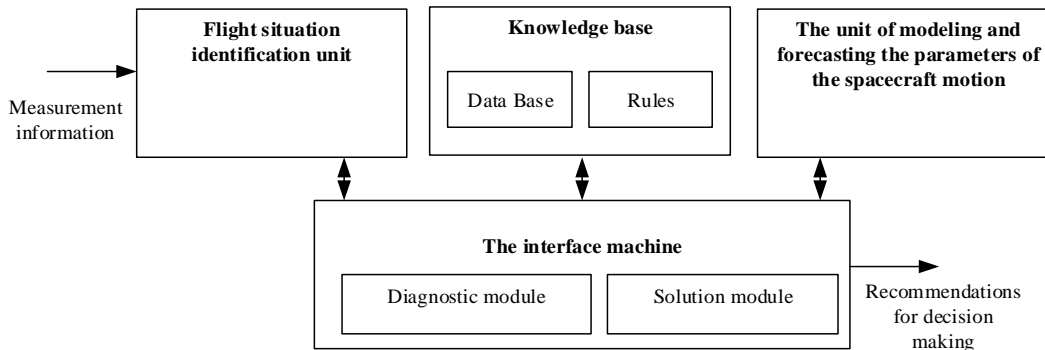
## 2. Методический подход к структурному построению системы автономного управления космическими аппаратами

Разработанная структура построения автономной системы управления КА содержит блоки, представленные на рисунке.

Исходя из рисунка видно, что в разработанной структуре построения автономной системы управления вводятся новые элементы – блок идентификации полетных ситуаций и блок моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата. В традиционных автономных структурах такие элементы, как базы знаний и машины логических заключений, уже существуют. Дадим описание принципов функционирования как отдельных структурных блоков системы, так и их взаимодействия.



Структурное построение автономной системы управления



Structural construction of an autonomous control system

*Блок идентификации полетных ситуаций* позволяет регулировать работу измерительной бортовой аппаратуры в процессе получения необходимой информации. В зависимости от целевого назначения космического аппарата применяется различный состав бортовых измерительных средств: датчики угловых скоростей, звездные датчики, оптические датчики, инфракрасные вертикали, гироскопические системы, датчики плотности атмосферы и т. д. С помощью аппаратуры блока определяется вектор состояния космического аппарата и его бортовой аппаратуры за счет обработки и преобразования измерительной информации. В результате обеспечивается возможность реализации качественно новых технологий автономной идентификации полетных ситуаций. Так, при реализации миссий дальнего космоса с применением аппаратно-программных средств блока определяются скоростные перегрузки и проводится анализ роста кажущейся скорости космического аппарата в атмосфере  $V_s$ . По интенсивности нарастания величины  $V_s$  определяются отклонение расчетных значений плотности атмосферы от номинальных, крутизна траекторий спуска, высота полета космического аппарата и необходимость корректировки траекторий движения аппарата. Получаемая с помощью данного блока информация является исходной для формирования технологических циклов принятия автономных решений по управлению космическим аппаратом и поступает на координирующий блок автономной системы – машину логических заключений, на котором во взаимодействии с базой знаний обеспечивается выработка необходимых логических решающих правил.

Для формирования *базы знаний* создается совокупность логических решающих правил, определяющих логическую связь между идентифицированными полетными ситуациями космического аппарата и выработкой программ управления, обеспечивающих оперативную корректировку параметров движения аппарата и состояний бортовой аппаратуры. В базу знаний входит и база данных – совокупность данных, где информация может быть представлена в двух основных параметрах, представляющих собой множество событий  $S$  в виде объектов  $O$ , атрибутов  $A$  и их значений. Например: в качестве события может выступать значения углов рыскания, крена или тангажа в системе управле-

ния движением космического аппарата. Атрибутом является управляющий угол, значение – определенное значение в градусах, а объектом может выступать система управления движением  $U$ . В базе данных содержатся аналитические зависимости между измеряемыми параметрами, характеризующими текущие положения космического аппарата (например, кажущаяся скорость  $V_s$ ), и векторы состояния управляемого объекта.

Логические решающие правила связаны между собой в виде «если  $S$ , то  $U$ » и формируются исходя из анализа известных нештатных ситуаций, которые описываются в эксплуатационной документации на отдельно взятый космический аппарат. Диапазон логических решающих правил зависит:

- от формирования новых программ управления, которые не предусмотрены в эксплуатационной документации;

- имитации различных нештатных ситуаций и выработки различных программ управления.

В этих двух случаях происходит расширение логических решающих правил  $S(U)$  в условиях детерминированной модели состояний космического аппарата.

Существуют неопределенные полетные ситуации, для которых нельзя заранее скорректировать программу управления. Например, при вариации плотности атмосферы из-за вспышек на Солнце условия полета космического аппарата могут отличаться от номинальных до 50 % по значительному числу параметров: крутизне траектории, изменению высоты полета, скорости полета и т. д. Для этих случаев логические решающие правила выражаются в виде конечных аналитических или логических зависимостей, позволяющих определять командные воздействия на систему, соответствующие текущим полетным ситуациям, выполняемые в определенной последовательности. На различных этапах программы полета в процессе информационного взаимодействия базы знаний с машиной логических заключений решающие правила могут добавляться и совершенствоваться в зависимости от идентификации вновь возникающих полетных ситуаций. Для осуществления эффективного автономного управления необходимо стремиться к созданию совокупности решающих правил, охватывающей максимально возможные полетные ситуации, что дает возможность наиболее

рационального выполнения целевых функций космических миссий.

*Машина логических заключений* осуществляет ряд важных функций по взаимодействию с другими блоками системы автономного управления космического аппарата. Машина логических заключений состоит из модуля диагностики текущих состояний космического аппарата и модуля поиска решений по управлению космическим аппаратом. При помощи модуля диагностики текущих состояний на основе измерительной информации осуществляется сравнение реальных состояний аппарата с номинальными. После сравнения определяются отклонения текущих координат движения космического аппарата и нештатно работающие звенья бортовой аппаратуры. В результате выявленной информации модуль диагностики формирует логические заключения о необходимости корректирующих воздействий для штатного функционирования космического аппарата. В случае штатной работы бортовой аппаратуры формируются логические заключения при отсутствии выправляющих воздействий для корректировки состояния космического аппарата. Модуль поиска решений по управлению космическим аппаратом на основании информации, содержащейся в базе знаний, реализует многоитерационный поиск нужных комбинаций решающих правил, направленных на восстановление штатного режима полета космического аппарата. После этого реализуется информационный обмен между машиной логических заключений и блоком моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата. В блок моделирования передается информация о рекомендуемых программах управления, составленных в виде последовательности логических решающих правил. Из этого блока в машину логических заключений поступают данные о прогнозировании траекторий движения космического аппарата в случае отработки сформированных корректирующих программ, и при удовлетворительных результатах прогнозирования принимается окончательное заключение об исполнении разработанных программ управления.

*Блок моделирования и прогнозирования* обеспечивает выполнение заключительной стадии формирования решений по управлению космическим аппаратом. Результаты прогноза параметров движения КА после реализации рекомендо-

ванных командных воздействий сравниваются с эталонными, соответствующими номинальным режимам полета и содержащимися в бортовом компьютере блока. Применительно к рассмотрению наиболее динамичных этапов миссий дальнего космоса – движению космического аппарата в атмосфере, учитывая высокий уровень неопределенностей полетных ситуаций, обуславливаемых как возможными погрешностями работы бортовых систем, так и неточностью знаний параметров атмосферы, представляется практически невозможным обеспечение высокоточного совпадения прогнозируемых и номинальных траекторных параметров. В этих условиях предпочтительным является выбор решений по управлению космическим аппаратом, соответствующих не столько наименьшим отклонениям сравниваемых параметров, сколько реализации качественных тенденций изменения характера траекторий полета, например изменение крутизны траекторий движения, интенсивности гашения скорости космического аппарата и др.

Блок выполняет также важные функции при парировании нештатных ситуаций, вызванных нарушением работоспособности бортовой аппаратуры космического аппарата. Технология его работы и структуры построения заключается в следующем. В оперативной памяти бортовой системы хранятся данные о параметрах бортовых систем (состав и функциональные режимы), телеметрическая информация о состоянии бортовой аппаратуры космического аппарата (номинальные и допустимые значения телеметрических параметров) и предполагаемые к выдаче на борт КА программы управления (включая ограничения на последовательность выдачи команд и временные интервалы между командами).

Номинальное состояние бортовых систем зависит от режимов выдаваемых командных воздействий, которые определяет блок моделирования и прогнозирования. При этом данный блок выполняет моделирование функционирования бортовых систем при отсутствии ошибок в управлении, случайных возмущающих факторов и неисправностей в работе аппаратуры, как бы имитируя идеальное функционирование бортовых систем. В результате этих процедур при помощи блока моделирования и прогнозирования получается последовательность «эталонных» значений телеметрических параметров в процес-

се имитации подаваемых на борт космического аппарата командных воздействий  $U(t)$ .

С целью диагностики работоспособности бортовой аппаратуры в процессе полета космического аппарата проводится детальный сравнительный анализ эталонных вариантов телеметрических параметров с реальными, получаемыми в сеансах связи с космическим аппаратом и с помощью проводимых измерений. Это позволяет определить те элементы, которые являются причиной нарушения нормального функционирования бортовой системы, таким образом можно предотвратить негативную тенденцию в работе бортовой аппаратуры и заранее парировать нештатную ситуацию (или вовсе ее избежать). Например, быстрый разряд химической батареи или уменьшение мощности входных сигналов при передаче информации с борта космического аппарата на командно-измерительную станцию. При оценке работоспособности бортовой аппаратуры определяются интервал времени ее нормальной работы без использования корректирующих управляющих воздействий и причины негативных тенденций. Также выявляется взаимосвязь процессов, при которой работа одного процесса влечет за собой изменение другого процесса, в том числе и в негативную сторону.

В результате проведенных оценочных процедур работоспособности бортовой аппаратуры дается объективная оценка ее работы с предполагаемой динамикой развития процессов на борту космического аппарата и прогнозируется время нормальной работы элементов аппаратуры, выявляются «проблемные» звенья в бортовых системах космического аппарата.

Подводя итог, можно заключить, что предлагаемый методический подход для обеспечения принятия решений в процессе автономного управления космическими аппаратами позволит провести идентификацию прогнозируемых состояний работоспособности бортовых систем, которая выражается в выявлении или отсутствии отклонений контролируемых параметров от номинальных значений. Проведен детальный анализ работоспособности отдельных блоков, входящих в состав бортовой системы, в результате чего определяются те элементы, которые являются причиной отклонений реальных состояний бортовой аппаратуры от номинальных. Приведены методические обоснования структурного построения системы автономного управления и

принципы формирования логических решающих правил, а также выработки решений по управлению космическим аппаратом. В рамках предложенной структуры при рациональном взаимодействии структурных элементов системы автоматического управления принципиально может быть обеспечена выработка рекомендаций по принятию решений в различных полетных ситуациях: при восстановлении работоспособности бортовой аппаратуры; выявлении опасных сближений космического аппарата с фрагментами техногенного происхождения; полете космического аппарата в атмосферах в условиях неопределенности их параметров и др.

### 3. Формальная постановка задачи

Для безопасного целевого функционирования космического аппарата его бортовая система должна выполнять следующие функции:

- восстанавливать работоспособность бортовой аппаратуры после парирования неисправности при автономном функционировании космического аппарата;

- на основе управляющих воздействий корректировать траектории полета космического аппарата при отклонении траектории его движения от номинальной, а также отдельные параметры;

- моделировать прогноз движения с целью выявления признаков возникновения негативных тенденций и вырабатывать решения по управлению космическим аппаратом для их устранения и др.

Приведем формальную постановку исследуемой задачи для предлагаемого подхода к принятию автономных решений по управлению космическим аппаратом и введем следующие обозначения:

$X_p = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n\}$  – вектор текущего состояния космического аппарата в текущий момент времени. Значения  $x_i$  представляют собой траекторные параметры движения космического аппарата, параметры состояния отдельных элементов бортовых систем, данные об околоземном пространстве и т. д., то есть являются реальными или текущими параметрами движения космического аппарата;

$X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n\}$  – вектор значений параметров  $x_k$  при штатной работе космического аппарата на прогнозируемый интервал времени;



$x_{k\min}, x_{k\max}$  – минимально и максимально допустимые значения  $k$ -го параметра;

$S_k(u)$  – логические решающие правила, устанавливающие логические или функциональные соотношения между событиями  $S$ , характеризующие состояния космического аппарата и его бортовой аппаратуры, зависящие от управляющих воздействий и полетных ситуаций;

$J = \sum_{k=1}^n a_k (x_{kp} - x_{kp})^2$  – критерий оптимальности, характеризующий различие между реальными и прогнозируемыми (номинальными) векторами  $X_p$  и  $X_n$ ;

$a_k$  – весовые коэффициенты, устанавливающие приоритетность каждого из компонент вектора целей.

Для формулировки задачи принятия решений по управлению космическим аппаратом положим, что при сравнении реального вектора текущего состояния космического аппарата  $X_p$ , идентифицируемого на основе получаемой телеметрической информации и обработанных изменений бортовой аппаратурой данных, с соответствующим вектором прогнозируемого (желаемого) состояния  $X_n$  выявляются отклонения компонент  $x_k = x_{kp} - x_{kn}$  и устанавливается факт наличия или отсутствия нештатных ситуаций и признаков возникновения негативных тенденций функционирования космического аппарата.

Из общей совокупности параметров  $x_k (i = 1, 2, \dots, n)$  осуществляется выборка тех значений параметров, для которых справедливы неравенства  $x_{kp} > 0,8x_{k\max}$  и  $x_{kp} < 1,2x_{k\min}$ , и с их учетом формируется критерий оптимальности  $J$ .

Из всей совокупности параметров  $x_k$ , логические решающие правила  $S_k(u)$  определяют такую программу управления, при которой обеспечивается минимум функционала  $J$  на последующем временном интервале  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ . Правильность выбора программ подтверждается путем оценки результатов прогнозирования параметров движения космического аппарата, полученных после подачи командных воздействий.

Исходя из постановки задачи система управления космическим аппаратом должна обеспечивать выполнение следующих функций:

- определение таких полетных ситуаций, при которых выявляются признаки отклонения текущих параметров траекторий от прогнозируемых;

- выработка предложений по принятию решений по управлению космическим аппаратом и

подача необходимых корректирующих воздействий для устранения нештатных ситуаций;

- имитация траекторий движения космического аппарата с целью отработки правильности принятия решений по управлению космическим аппаратом.

Анализ возможных полетных ситуаций, влияющих на содержание и оперативность выработки управляющих решений, позволяет «группировать» состояние системы исходя из статуса состояния системы в текущий момент времени:

- «штатные ситуации»: характеризующие работоспособность космического аппарата параметры  $x_{ip}$  находятся в допустимых пределах и в допустимом диапазоне значений  $1,2x_{k\min} < x_{kp} < 0,8x_{k\max}$ ;

- «опасные ситуации»: характеризующие работоспособность космического аппарата параметры  $x_{ip}$  находятся в допустимых пределах, но достаточно близко к граничным значениям  $x_{kp} < 1,2x_{k\min}, x_{ip} > 0,8x_{k\max}$ ;

- «аварийные ситуации»: часть параметров  $x_{kp}$ , характеризующих работоспособность космического аппарата, вышла за пределы допустимых значений  $x_{kp} < x_{k\min}, x_{kp} > x_{k\max}$ .

Состояние системы можно сгруппировать по оперативности принятия решений и определить исходя из двух вариантов:

- «без резерва времени» – ситуации, требующие выработки и реализации решений по управлению космическим аппаратом с помощью командных воздействий немедленного исполнения. К таким случаям относятся практически все *аварийные ситуации*, а также *опасные ситуации* с высоким уровнем динамики нарастания негативных тенденций;

- «с резервом времени» – ситуации, предполагающие выработку наилучшей из допустимых стратегий, направленных на перемещение параметров  $x_k$  от границ допустимых значений. К ним относятся практически все *опасные ситуации*.

Решение формализованной постановки задачи предполагает необходимость в разработке новых методических подходов к построению алгоритмов автономного управления космическим аппаратом. В основу этих подходов положены оригинальные технологии рационального выполнения операций управления, методы аналитического моделирования траекторий полета аппаратов ближнего и дальнего космоса.

Формализованная постановка задачи базируется на методическом подходе к структурному построению системы автономного управления космическим аппаратом, основанной на оригинальных принципах элементной декомпозиции структурного состава, выявлении областей рационального применения отдельных элементов, интеграции их взаимодействия в обеспечение принятия эффективных решений по управлению космическим аппаратом.

## Заключение

Разработаны методические принципы формирования автономного управления, заключающиеся: 1) в обеспечении идентификации полетных ситуаций бортовыми средствами в условиях ограниченных возможностей наземного контура управления; 2) формировании логических решающих правил, направленных на обеспечение максимального охвата возможных полетных ситуаций в процессе реализации космических миссий; 3) оперативной выработке решений по управлению космическим аппаратом; 4) обязательном проведении оценки корректности выработанных корректирующих программ путем прогнозирования параметров движения космического аппарата и работоспособности бортовой аппаратуры после исполнения управляющих воздействий.

Предложен и обоснован методический подход к новому структурному построению системы автономного управления космическим аппаратом. Новизной структурного построения является то, что наряду с использованием традиционных блоков (базы знаний и машины логических заключений) вводятся новые элементы – блок идентификации полетных ситуаций и блок моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата. Блок идентификации полетных ситуаций выполняет функции регулирования работы измерительной аппаратуры с целью оперативного получения и обработки необходимой информации для выявления первичных признаков отклонения состояний космического аппарата и функционирования бортовых систем от номинальных режимов. База знаний включает в себя базу данных и решающие правила, определяющие логические соотношения между идентифицированными полетными ситуациями и действиями, направленными на достижение эффективного управления космиче-

ским аппаратом. Машина логических заключений во взаимодействии с другими блоками системы вырабатывает рекомендации по принятию решений по управлению космическим аппаратом. Блок моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата является контролирующим элементом системы, определяющим правильность рекомендуемых программ управления.

Приведена формальная постановка задачи автономного принятия решений по управлению космическим аппаратом. Путем сравнения реального вектора текущего состояния космического аппарата  $X_p$ , идентифицируемого на основе получаемой телеметрической информации и обработанных измеренных данных, с соответствующим вектором прогнозируемого (номинального) состояния  $X_{п}$  выявляются отклонения компонентов  $x_k = x_{kp} - x_{kп}$  и устанавливается факт наличия или отсутствия нештатных ситуаций и признаков возникновения негативных тенденций функционирования космического аппарата. Из общей последовательности параметров  $x_k (i = 1, 2, \dots, n)$  осуществляется выборка тех составляющих, отклонения которых превышают допустимые значения и с их учетом формируется критерий достижения целевых функций  $J$ . Из всей совокупности логических решающих правил  $S_k(u)$  составляется такая программа управления, при которой обеспечивается минимум функционала  $J$  на последующем временном интервале  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ . Правильность выбора программ подтверждается путем оценки результатов прогнозирования параметров движения космического аппарата, полученных после подачи командных воздействий.

## Список литературы

1. Ботанов А.Ф., Воронцов В.А., Графодатский О.С., Иванов М.А., Крайнов А.М., Лемешевский С.А., Маров М.Я., Хаханов Ю.А. Перспективы исследования атмосферы и поверхности Марса, Венеры, Луны с помощью мобильных средств // К.Э. Циолковский. Проблемы и будущее российской науки и техники: материалы 52-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2017. С. 35–37.
2. Хартов В.В., Можина Н.В., Кудрявцев Ю.Е., Прокопенко О.Е., Михайлов В.М., Райкунов К.Г. Сотрудничество АО «ЦНИИмаш» и АО «НПО Лавочкина» при реализации проекта по исследованию Марса «Экзомарс» //

Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2022. № 2 (56). С. 57–64. <https://www.doi.org/10.26162/LS.2022.56.2.005>

3. Яковлева Д.М. Проектирование автоматической межпланетной станции для исследования Венеры // Гагаринские чтения – 2020: сборник тезисов докладов. М., 2020. С. 735–736.

4. Шеремет А.А., Воронцов В.А. Проектный облик вертолета для исследования планеты Венера в составе спускаемого аппарата в проекте «Венера-Д» // Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: в 4 томах. Т. 2. М., 2021. С. 250–252.

5. Мишурова А.В., Донсков А.В., Васильева П.Н. Парирование нештатных ситуаций при управлении полетом пилотируемых космических аппаратов // Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники: материалы 51-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2016. С. 124.

6. Соловьев С.В. Нештатные ситуации в космической технике и принципы их парирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 97–103. <https://www.doi.org/10.37882/2223-2966.2021.02.28>

7. Беляева Е.К., Муртазин Р.Ф. Парирование нештатных ситуаций при полете на полярную окололунную орбиту // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: в 4 т. Т. 3. М., 2021. С. 13–14.

8. Шульгин В.А. Нечеткая логическая модель в системе автоматического управления технологическим процессом // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: материалы I Всероссийской научной конференции. Тольятти, 2017. С. 353–360.

9. Подиновская О.В., Подиновский В.В. Анализ иерархических многокритериальных задач принятия решений методами теории важности критериев // Проблемы управления. 2014. № 6. С. 2–8.

10. Смоленцева Т.Е., Сумин В.И., Ирхин В.П., Шатовкин Р.Р. Обоснование архитектуры системы управления на основе иерархических многоуровневых систем // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2017. № 3. С. 142–147.

11. Титов Н.А., Макрушин С.В. Технология создания доменной базы знаний вопрос-ответной системы на основе крупномасштабной универсальной базы знаний // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9. № 1. С. 115–124.

12. Борисов А.Н. Построение интеллектуальных систем, основанных на знаниях, с повторным использованием компонентов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2014. № 4. С. 97–102.

13. Williams B.C., Pandurang Nayak P. A reactive planner for a model-based execution // IJCAI'97: Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, California, 1997. Vol. 2. Pp. 1178–1185.

14. Поспелов Г.С., Эрлих. А.И., Солодов В.М., Вен В.Л. Проблемы программно-целевого планирования и управления. М.: Наука. 1981. С. 29.

15. Куликовский Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М.: Наука, 1967. 379 с.

16. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 615 с.

17. Красильщиков М.Н., Серебряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.

18. Макарова И.М., Лохина В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 375 с.

19. Aarup M., Arentoft M.M., Parrod Y., Stader J., Stokes I. OPTIMUM-AIV: a knowledge-based planning and scheduling system for spacecraft AIV // Knowledge Based Scheduling / ed. by M. Fox, M. Zweben. San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1994. Pp. 451–469.

20. Соколов Н.Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания. 2007. № 6. С. 16–20.

21. Лебедева Т.Г., Осипов Г.С. Архитектура и управляемость дискретных автоматических систем, основанных на знаниях // Известия Российской академии наук: теория и системы управления. 2000. № 5. С. 703–709.

22. Осипов Г.С., Жилыкова Л.Ю., Виноградов А.Н. Динамические интеллектуальные системы. Представление знаний и основные алгоритмы // Моделирование целенаправленного поведения. Известия Российской академии наук: теория и системы управления. 2002. № 6. С. 119–127.

23. Bocharov L.A., Sokolov N.L., Udalo V.A. Organization of an intellectual searching to support vehicles control // Second International Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control. Turkey, 2003. Pp. 172–175.

## References

1. Botanov AF, Vorontsov VA, Grafodatsky OS, Ivanov MA, Krainov AM, Lemeshevsky SA, Marov MYa, Khakhanov YuA. Prospects for studying the atmosphere and surface of Mars, Venus, and the Moon using mobile devices. *K.E. Tsiolkovsky. Problems and the Future of Russian Science and Technology: Materials of 52 Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga; 2017. p. 35–37. (In Russ.)
2. Khartov VV, Mozhina NV, Kudryavtsev YuE, Prokopenko OE, Mikhailov VM, Raikunov KG. Cooperation between JSC “TSNIIMASH” and “Lavochkin Association”, JSC in the implementation of the exomars Mars exploration project. *Vestnik NPO Imeni S.A. Lavochkina*. 2022;(2):57–64. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.26162/LS.2022.56.2.005>
3. Yakovleva DM. Designing an automatic interplanetary station for the study of Venus. *Gagarin Readings – 2020: Collection of Abstracts*. Moscow; 2020. p. 735–736. (In Russ.)
4. Sheremet AA, Vorontsov VA. Conceptual design of the helicopter dedicated for Venus exploration as a part of “Venera-D” descent vehicle. *Academic Readings on Astronautics Dedicated to the Memory of S.P. Korolev and Other Outstanding Domestic Scientists – Pioneers of Space Exploration: Collection of Abstracts* (vol. 2). Moscow; 2021. p. 250–252. (In Russ.)
5. Mishurova AV, Donskov AV, Vasileva PN. Parrying emergency situations when controlling the flight of manned spacecraft. *Ideas K.E. Tsiolkovsky in Innovations in Science and Technology: Materials of the 51st Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga; 2016. p. 124. (In Russ.)
6. Soloviev SV. Emergency situations in space technology and the principles of their parry. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2021;(2):97–103. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.37882/2223-2966.2021.02.28>
7. Belyaeva EK, Murtazin RF. Parrying emergency situations during a flight to a polar circumlunar orbit. *XLV Academic Readings on Astronautics Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Domestic Scientists – Pioneers of Space Exploration: Collection of Abstracts* (vol. 3). Moscow; 2021. p. 13–14. (In Russ.)
8. Shulgin VA. Fuzzy logical model in automatic control system of technological process. *Proceedings of the I All-Russian Scientific Conference*. Togliatti; 2017. p. 353–360. (In Russ.)
9. Podinovskaya OV, Podinovskiy VV. Analysis of hierarchical multicriteria decision-making problems by methods of criteria importance theory. *Control Sciences*. 2014;(6):2–8. (In Russ.)
10. Smolentseva TE, Sumin VI, Irkhin VP, Shatovkin RR. Justification of the architecture of the control system based on hierarchical multi-level systems. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2017;(3):142–147.
11. Titov NA, Makrushin SV. Technology for creating a domain knowledge base of a question-answer system based on a large-scale universal knowledge base. *Computational Nanotechnology*. 2022;9(1):115–124. (In Russ.)
12. Borisov AN. Ontology-based intelligent system construction through component reuse. *Systems Open Semantic Technologies for Intelligent Systems*. 2014;(4):97–102. (In Russ.)
13. Williams BC, Pandurang Nayak P. A reactive planner for a model-based execution. *IJCAI'97: Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (vol. 2). Menlo Park, California; 1997. p. 1178–1185.
14. Pospelov GS, Erlikh AI, Solodov VM, Ven VL. *Problems of program-targeted planning and management*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. (In Russ.)
15. Kulikovskiy R. *Optimal and adaptive processes in automatic control systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1967. (In Russ.)
16. Lebedev AA, Chernobrovkin LS. *Flight dynamics of unmanned aerial vehicles*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1972. (In Russ.)
17. Krasilshchikov MN, Serebryakov GG. *Control and guidance of unmanned maneuverable aircraft based on modern information technologies*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2003. (In Russ.)
18. Makarova IM, Lokhina VM. *Intelligent automatic control systems*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2001. (In Russ.)
19. Aarup M, Arentoft MM, Parrod Y, Stader J, Stokes I. OPTIMUM-AIV: a knowledge-based planning and scheduling system for spacecraft AIV. In: Fox M, Zweben M. (eds.) *Knowledge Based Scheduling*. San Mateo, California: Morgan Kaufmann; 1994. p. 451–469.
20. Sokolov NL. The basic principles of diagnostics of the operability of the onboard equipment of automatic spacecraft and the development of recommendations for the elimination of emergency situations. *Successes of Modern Natural Science*. 2007;(6):16–20. (In Russ.)
21. Lebedeva TG, Osipov GS. Architecture and controllability of discrete automatic systems based on knowledge. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences: Theory and Control Systems*. 2000;(5):703–709. (In Russ.)
22. Osipov GS, Zhilyakova LYu, Vinogradov AN. Dynamic intelligent systems. Knowledge representation and basic algorithms. *Modeling of Purposeful Behavior. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2002;(6):119–127. (In Russ.)
23. Bocharov LA, Sokolov NL, Udaloy VA. Organization of an intellectual searching to support vehicles control. *Second International Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control*. Turkey; 2003. p. 172–175.

### Сведения об авторах

**Орлов Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2733-4479, Scopus Author ID: 57193905914, eLIBRARY SPIN-код: 5313-6772; orlov-da@rudn.ru

**Купреев Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8657-2282, Scopus Author ID: 57201885865, eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

**Самусенко Олег Евгеньевич**, кандидат технических наук, директор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

**Мельников Виталий Михайлович**, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru

**Буркова Ирина Владимировна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова, Российская академия наук, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65; ORCID: 0000-0002-4671-0847, eLIBRARY SPIN-код: 8047-7930; irbur27@gmail.com

### About the authors

**Dmitry A. Orlov**, Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2733-4479, Scopus Author ID: 57193905914, eLIBRARY SPIN-code: 57193905914; orlov-da@rudn.ru

**Sergei A. Kupreev**, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8657-2282, e-LIBRARY SPIN-code: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

**Oleg E. Samusenko**, Ph.D of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

**Vitaly M. Melnikov**, Academician of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics and International Academy of Informatization, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru

**Irina V. Burkova**, Doctor of Sciences (Techn.), leading researcher, Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St, Moscow, 117997, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4671-0847, eLIBRARY SPIN-code: 8047-7930; irbur27@gmail.com