

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 004.9: 629.78 EDN QVHNQC

Анализ задач управления космическими аппаратами
и системный подход к их решению

В. К. Ларин, к. т. н., larin.vk@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены три вида задач обеспечения управления полетом космическими аппаратами (КА): командно-программное, баллистико-навигационное и информационно-телеметрическое в качестве объекта анализа задач управления КА. Представлена схема предметной области основных видов решения задач управления КА: методов, моделей и обобщенной технологии в формате базовых частей — постановки задачи, алгоритма, программы и проведения расчетов.

Для каждого вида обеспечения представлены формы выдачи данных, используемых в цикле управления КА.

Автором проведен анализ параметров решения задач управления КА на предмет определения степени структуризации последних. Результаты анализа показали, что ошибки, допущенные в одной составляющей части решения, переводят соответствующую задачу в разряд слабоструктурированных. При этом формат решения из формализованного переходит в эвристический.

Дано определение системного подхода для исследования информационных объектов и его основные задачи: декомпозиция, анализ и синтез систем, приводится краткое описание методологии системного подхода и его этапов.

Для решения слабоструктурированных задач баллистико-навигационного обеспечения рекомендуется использовать системно-элементный и системно-структурный подходы, причем в первом случае рассматриваются элементы объекта, а во втором — их структурные связи.

Ключевые слова: анализ систем, слабоструктурированные задачи, моделирование, эвристические методы, измерительная задача, предметная область, степень структуризации, информационные параметры

Для цитирования: Ларин В.К. Анализ задач управления космическими аппаратами и системный подход к их решению. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2024. Т. 11. № 3. С. 14–22.

Analysis of Problems of Spacecraft Control and System
Approach to Their Solution

V. K. Larin, *Cand. Sci. (Engineering)*, larin.vk@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper analyzes three types of spacecraft flight control problems: command-program, ballistic-navigation and information-telemetric. A diagram of the scope of the main types of solutions to the spacecraft control problems is presented: methods, models and generalized technology in the format of basic parts – the problem statement, the algorithm, the program and the calculations.

For each type of support, data output formats used in the spacecraft control cycle are presented.

The author analyzed the parameters for solving spacecraft control problems to determine how well-structured they are. The results of the analysis showed that errors made in one component of the solution transfer the corresponding task to the category of weakly structured. At the same time, the format of the solution goes from formalized to heuristic.

A definition of a systems approach for the study of information objects and its main tasks are given: decomposition, analysis and synthesis of systems, as well as a brief description of the methodology of the system approach and its stages.

To solve weakly structured problems of ballistic-navigation support, it is recommended to use system-elemental and system-structural approaches. In the first case, the elements of the object are considered, and in the second, their structural connections.

Keywords: system analysis, semi-structured problems, modeling, heuristic methods, measurement task, subject area, degree of structuredness, information parameters

For citation: Larin V.K. Analysis of Problems of Spacecraft Control and System Approach to their Solution. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 14–22. (in Russian)

Введение

Управление КА в полете осуществляется в основном с использованием трех видов обеспечения: командно-программного, баллистико-навигационного и информационно-телеметрического.

Большинство задач указанных видов обеспечения КА относится к формализованным задачам, которые имеют количественный результат. Однако в силу методической сложности решения, а также недостаточной точности элементов, участвующих в вычислительном процессе, могут происходить сбои решения. Для выхода из подобных ситуаций целесообразно производить анализ задач управления КА с целью определения причин сбоя и формирования путей его блокирования.

Задачи этих видов обеспечения могут быть реализованы с помощью существующих математических и эвристических методов в зависимости от степени структуризации.

В данной статье рассмотрены вопросы анализа большинства задач обеспечения управления КА на предмет их разделения на формализованные и неформализованные задачи независимо от функциональной принадлежности, а также определения подхода к их решению. В качестве практического приложения рассмотрены задачи БНО.

Данные вопросы становятся актуальными в случаях нештатных ситуаций, характеризующихся

недостатком информации о функционировании бортовой аппаратуры, а также больших ошибок определения пространственного положения КА.

Структура предметной области, содержащей соответствующие методы, модели и технологии решения задач управления КА с учетом степени структуризации, приведена на схеме (рис. 1).

На рис. 1 использованы следующие термины и сокращения:

задачи управления КА — задачи управления КА в формате программно-математического обеспечения;

K_c — коэффициент структуризации;

метод — способ решения задачи в зависимости от степени структуризации. Форма представления может быть аналитической или вербальной;

математический (метод) — используется для решения формализованных задач ($K_c = 1$);

эвристический (метод) — используется для решения неформализованных задач ($K_c < 1$);

«модель — упрощенная форма представления реального объекта с сохранением основных его свойств;

математическая (модель) — представление объекта в виде математических зависимостей (например, орбитальное движение КА в виде системы дифференциальных уравнений движения);

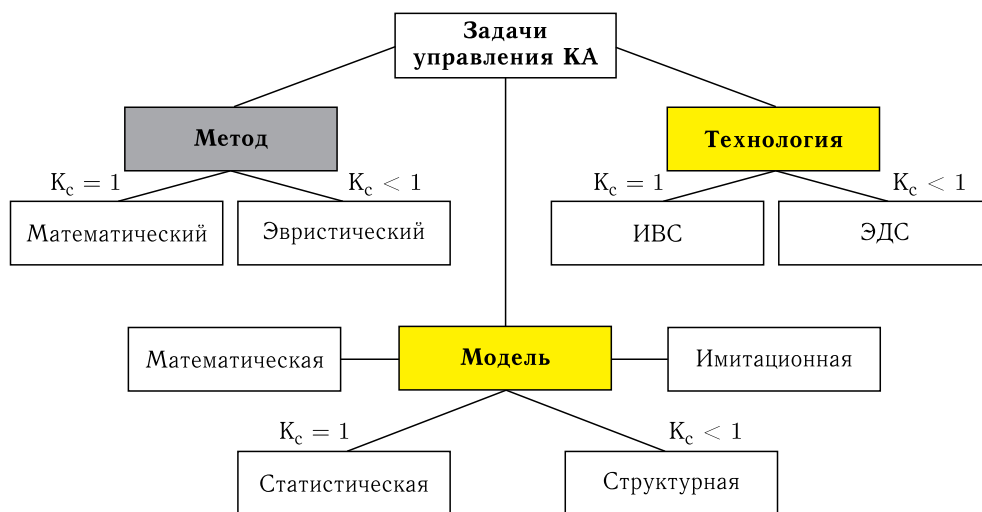


Рис. 1. Схема предметной области элементов решения задач управления КА [1]
 Fig. 1. Diagram of the elements in the scope of solving spacecraft control problems [1]

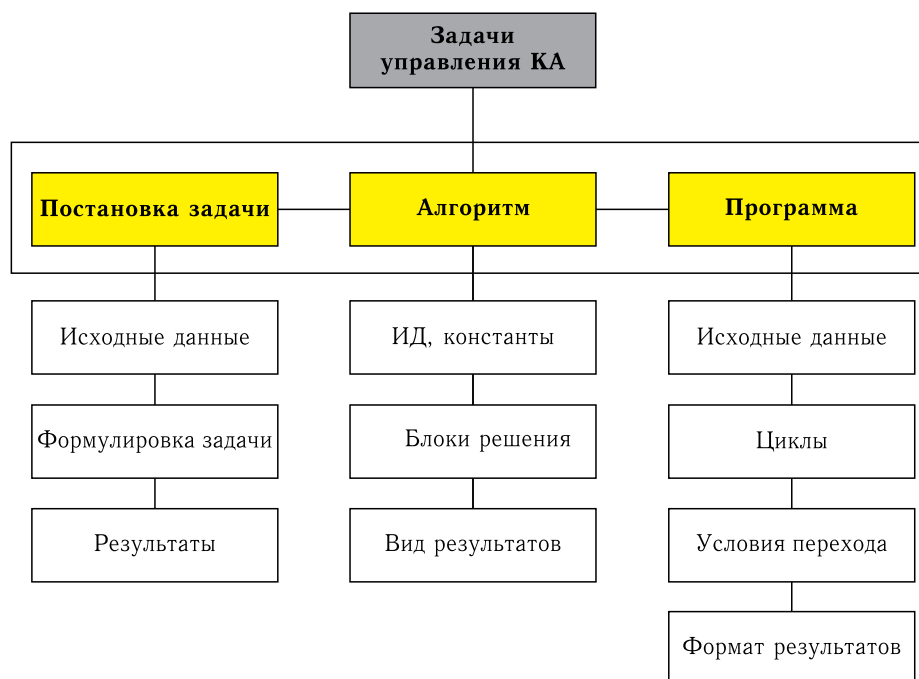


Рис. 2. Схема обобщенной технологии решения задач управления КА
 Fig. 2. Diagram of a generalized technology for solving spacecraft control problems

статистическая (модель) — математический алгоритм обработки случайных величин;

структурная (модель) — схематическое (или аналитическое) представление связей элементов объекта;

имитационная (модель) — программно-математическое представление основных функциональных свойств объекта» [2];

технология — последовательность операций создания реального объекта;

ИВС — информационно-вычислительная система (используется для решения формализованных задач);

ЭД — экспертно-диагностическая система (используется для решения неформализованных задач).

Описание предметной области дает информацию только о существующих способах решения задачи.

Учитывая, что под технологией понимается последовательность операций, выполнение которых приводит к результату, следующим шагом является построение обобщенной технологической схемы, независимо от степени структуризации рассмат-

риваемой системы и ее функциональных свойств. Данная схема приведена на рис. 2.

На схеме верхний ряд элементов, заключенных в рамку, представляет собой последовательность необходимых элементов, определяющую обобщенную технологию решения задачи.

Таким образом, под *обобщенной технологией решения задачи* понимается последовательность следующих базовых операций: постановка задачи, построение алгоритма, разработка программы и проведение расчетов.

Каждый базовый элемент состоит из определенного набора частей, а именно:

- «постановка задачи» — содержит исходные данные (состав в общем виде), формулировку задачи (основное содержание — что дано, что требуется найти), результат (общий вид результата решения задачи);
- «алгоритм» (соответствует функциональному назначению задачи) — исходные данные (физические параметры, характеризующие функции системы, перечень констант), вид результатов (форма и последовательность расположения данных);

- «программа» (запись алгоритма на языке команд используемого языка программирования) — исходные данные (численные значения физических параметров и констант), циклы (повторяющийся расчет какой-либо величины, заканчивающийся по выполнению заданного условия), условие перехода (математическое выражение сравнения двух величин, при выполнении которого происходит переход расчетов на следующий блок программы), формат результатов (вид, размерность и точность результатов решения);
- «расчет» (получение результата путем исполнения программы с использованием ЭВМ или сервера) — включает базу данных (БД) (хранилище данных в определенной форме, функционирующее под управлением СУБД, функции — хранение, обработка и выдача данных), архив (форма хранения данных в памяти ЭВМ в виде файлов).

Для определения возможности использования обобщенной технологии при реализации задач управления КА рассмотрим их функциональное назначение и условия перехода в разряд слабоструктурированных задач [3].

Задачи управления КА разделяются на следующие виды обеспечения: командно-программное (КПО), баллистико-навигационное (БНО) и информационно-телеметрическое обеспечения (ИТО).

Каждый вид обеспечения характеризуется следующими набором параметров, представленных в определенной форме.

Командно-программное обеспечение (КПО)

Команда на включение устройства содержит: условный номер бортового устройства, дату, московское время включения (при необходимости время выключения) устройства. Сокращенная запись команды — У№У-Д- $t_{\text{моск}}$ (вкл)- $t_{\text{моск}}$ (выкл).

Баллистико-навигационное обеспечение (БНО)

Задачи БНО функционально разделяются на три части:

А. Обработка измерительной информации (определение параметров орбиты).

В. Динамические операции (коррекция орбиты, спуск КА с орбиты).

С. Расчет стандартных баллистических данных, необходимых для расчета команд управления КА.

Результатом решения задач «А» являются кинематические параметры движения КА на заданный момент времени (момент пересечения траектории КА плоскости экватора) и уточненные значения возмущающих ускорений, входящих в модель движения КА:

$$D, t, N_v, V_x, V_y, V_z, x, y, z, a_i (i = 1, 2, \dots).$$

Результатом решения задач «В» являются параметры динамических операций (коррекция, спуск), а именно дата, времена включения, выключения двигательной установки (ДУ), продолжительность работы ДУ, величины импульсов коррекции (спуска):

- коррекция орбиты — $D, t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}, \Delta t_i \cdot \Delta V_i$;
- спуск с орбиты — $D, t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}, \Delta t_i \cdot \Delta V_i$.

В состав задач части «С» входят следующие подзадачи:

- расчет времени и координат входа и выхода КА из тени Земли — $t_{\text{вх}}, (r, V)_{\text{вх}}, t_{\text{выкл}}, (r, V)_{\text{вых}}$;
- расчет трассы полета — t_i, h_i, B_i, L_i (геодезические координаты на заданные моменты времени);
- расчет целеуказаний для наблюдения КА с измерительного пункта — D, t, A, γ, l (дата, московское время, азимут, угол места, расстояние до КА);
- расчет прогноза движения КА (кинематические параметры в гринвичской системе координат и оскулирующих элементов орбиты на момент пересечения КА плоскости экватора) — $t_0, x, y, z, V_x, V_y, V_z; t_0, a, e, i, \omega, \Omega, \tau$, где t_0 — московское время; a — большая полуось орбиты; e — эксцентриситет орбиты; i — наклонение орбиты к плоскости экватора; ω — положение перигея; Ω — долгота восходящего узла орбиты; τ — время прохождения перигея орбиты.

Информационно-телеметрическое обеспечение (ИТО)

Информационно-телеметрическое обеспечение включает следующие функциональные операции:

«прием информации с борта КА, первичную обработку и регистрацию на наземных пунктах телеметрической (ТМ) информации;

передачу ТМ-информации в центр управления полетом (ЦУП) и центры обработки;

обработку ТМ-информации в ЦУПе и представление ее в виде, удобном для последующего анализа;

анализ ТМ-данных о состоянии и функционировании бортовых систем КА и медицинском состоянии экипажа (для пилотируемых КА).

Телеметрическая информация и результаты траекторных измерений являются исходными данными для оценки качества выполнения заданного технологического цикла управления КА.

Средства измерительных пунктов на основе исходной технологической информации (рабочие литеры частот бортовой аппаратуры, номера кодов командной информации, баллистические данные об орбите КА и т.п.) осуществляют поиск, захват сигнала с КА при входе его в зону радиовидимости и переход в режим устойчивого сопровождения для проведения информационного обмена и траекторных измерений» [4].

Телеметрическую информацию невозможно оценить с помощью информационных параметров устройства, поскольку его измеренное значение, не соответствующее норме, может оказаться реальным на данный момент времени.

Телеметрия не оказывает физического воздействия на систему, она лишь представляет информацию о ее состоянии на текущий момент времени. По ней невозможно определить степень структуризации объекта и предпринять какие-либо действия, поэтому в дальнейшем ИТО не рассматривается [5].

Формальным условием перехода задачи в ряд слабоструктурированных является выполнение следующих соотношений для коэффициента структуризации K_c :

$N_c = n, N_{nc} = 0, K_c = 1$ — задача структурированная (1),

$N_c = 0, N_{nc} = p, K_c = 0$ — задача неструктурированная,

$N_c = n, N_{nc} = p, 0 < K_c < 1$ — задача слабоструктурированная,

где $N_c(n)$ — число структурированных блоков задачи;

$N_{nc}(p)$ — число неструктурированных блоков задачи:

$$K_c = \frac{N_c}{N_c + N_{nc}}.$$

Для определения K_c задач КПО и БНО необходимо проанализировать конечные результаты их решения на предмет соответствия (несоответствия) допустимым значениям.

В данном случае нет необходимости определять точное значение K_c по числу информационных параметров [], достаточно знать предельные значения n и p (0 или 1) и воспользоваться соотношениями (1). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Соответствие предельных значений K_c степени структуризации

Вариант	n	p	$n + p$	K_c	Степень структуризации
1	1	0	1	1	Структурированная
2	0	1	0	0	Неструктурированная
3	1	1	2	$> 0; < 1$	Слабоструктурированная

Следующим этапом является анализ результатов решения задач обеспечения управления КА и определение степени их структуризации:

$$У№У-Д-t_{\text{моск}}(\text{вкл})-t_{\text{моск}}(\text{выкл})-\Delta t.$$

В представленном выражении наиболее весомым параметром с точки зрения степени структуризации является «У№У». Ошибка в номере устройства может привести к сбою работы бортовой аппаратуры.

Баллистико-навигационное обеспечение (БНО)

А. $D, t, N_B, V_x, V_y, V_z, x, y, z, a_i (i = 1, 2, \dots)$.

В представленном выражении изменение любого параметра может привести к изменению

пространственного положения орбиты КА. Отличие от действительного положения будет зависеть от величины такого изменения.

В. Коррекция орбиты — $D, t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}, \Delta t_i, \Delta V_i$;
спуск с орбиты — $D, t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}, \Delta t_i, \Delta V_i$.

В случае коррекции орбиты ошибка в одном из параметров приводит к изменению орбиты КА.

В случае спуска КА с орбиты ошибка в одном из параметров приводит к смещению координат точки посадки КА.

С. Анализ подзадач, входящих в состав стандартной баллистической информации, показал, что ошибки, допущенные в расчетах моментов времени входа-выхода из тени Земли, координат трассы полета КА, элементов прогноза движения КА, не оказывают особого влияния на процесс управления КА и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Из перечисленных выше подзадач «С» необходимо учесть вероятность появления ошибок в расчете целеуказаний для пунктов наблюдения КА, поскольку это может привести к потере связи с КА (и, как худший вариант, — самого КА).

D, t, A, γ, l .

Результаты анализа задач управления КА на предмет определения их степени структуризации (с учетом данных табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Определение степени структуризации задач управления КА

Элементы решения	n	p	$n + p$	K_c	Степень структуризации
КПО					
У№У	3	1	4	0,25	СС
БНО					
А. $D, t, N_b, V_x, V_y, V_z, x, y, z$	9	1	10	0,10	СС
В(к) — $D, t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}, \Delta t_i \cdot \Delta$	5	1	6	0,16	СС
В(с) — $D, t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}, \Delta t_i \cdot \Delta V_i$	5	1	6	0,16	СС
С. D, t, A, γ, l	5	1	6	0,16	СС

Примечание. СС — слабоструктурированная (задача).

Как видно из табл. 2, ошибки, допущенные хотя бы в одном из параметров результата решения, переводят соответствующую задачу в разряд слабоструктурированных задач. При этом изменяется формат решения — с формализованного на эвристический. В связи с этим наиболее целесообразно рассмотреть системный подход решения слабоструктурированных задач [6].

Понятие о системном подходе решения проблем

Системный подход представляет собой «совокупность методологических положений, предполагающих рассмотрение объекта исследования как целого (системы), а каждого его элемента — в связи и взаимодействии с другими элементами» [7].

Технологическая последовательность этапов решения проблемы с использованием системного подхода представлена на рис. 3.

Одной из центральных задач БНО является задача обработки измерительной информации с целью уточнения параметров орбиты КА (далее «измерительная задача», ИЗ). Абстрактное рассмотрение измерительных задач не позволяет найти универсальный способ решения. Предварительно необходимо привязать ИЗ к конкретной предметной области путем использования классификационной таблицы, что значительно сужает круг поиска метода решения.

Как правило, искомые характеристики в задачах БНО должны иметь числовые значения, следовательно, общей проблемой можно считать нахождение формального решения ИЗ, а в случаях сбоя — определение возможного диапазона формального решения или причин сбоя.

Большинство авторов определяют понятие «задача» как некоторый неизвестный объект, исходя из лингвистического значения слова «задача-загадка», целью которой является нахождение характеристик объекта при известных исходных данных и условиях.

Для решения данной проблемы с использованием системного подхода предлагается расширить понятие «задача» путем включения в него процедуры «решения».



Рис. 3. Технология системного подхода решения проблем
 Fig. 3. Technology of a system approach to problem solving

Тогда под термином «задача» будем понимать систему, состоящую из трех составных частей: постановочной, методической и технологической.

В частности, постановочная часть состоит из подсистем цели, входных и выходных данных и условий достижения решения. Методическая часть — из метода, алгоритма и программы. Технологическая часть представлена ИВС, адаптированной к решению конкретной задачи (или ЭДС в случае слабоструктурированности задачи).

Данное положение подтверждается практикой использования БНО, где вся работа строится и оценивается по полученным результатам решения задачи, процесс получения которой состоит из постановки, программно-методического определения и расчетов.

Системный подход основывается на реализации основных задач системного анализа:

задачи декомпозиции, которая означает представление системы в виде подсистем, состоящих из

более мелких элементов. Для реализации данной задачи целесообразно использовать методы структурного анализа;

задачи анализа, заключающейся в нахождении различного рода свойств системы, ее элементов и окружающей среды в целях определения закономерностей поведения системы. Основой решения данной задачи является определение информационных параметров в блоках структуры, а также анализ связей между блоками алгоритма задачи;

задачи синтеза, которая состоит в том, чтобы на основе знаний о системе, полученных при решении первых двух задач, создать модель системы, определить ее структуру, параметры, обеспечивающие эффективное функционирование системы, решение задачи и достижение поставленных целей.

Решение задачи может быть представлено в виде структурно-технологической модели с описанием условий перехода между блоками системы.

Таким образом, решение ИЗ с использованием системного подхода сводится к последовательному выполнению следующих этапов:

- классификация ИЗ,
- анализ частей структуры ИЗ БНО,
- определение степени структурированности ИЗ,
- выбора метода решения ИЗ,
- разработка технологии решения ИЗ.

Методология системного подхода включает четыре этапа:

- изучение целей и функций объекта, его взаимодействия с окружающей средой (другими объектами) — изучение объекта как целого;
- расчленение объекта на элементы (подсистемы); определение роли, места и функций элементов (подсистем) исходя из целей и функций целого, определение основных отношений и связей между элементами (подсистемами);
- изучение свойств элементов, отношений между ними и законов, управляющих поведением элементов;
- синтез свойств и поведения объекта из свойств и поведения его частей, позволяющий определить законы, управляющие поведением объекта, обеспечивающие выполнение им своих функций и достижение целей.

Варианты системного подхода решения ССЗ

Методология системного анализа базируется на системном подходе (СП) к рассмотрению изучаемой проблемы. Традиционный путь научного исследования предполагает разделение объекта на части и изучение каждой из частей по отдельности. В противоположность этому СП предполагает рассмотрение исследуемого объекта как системы [8].

«Системно-элементный подход направлен на определение составляющих систему элементов.

Системно-структурный подход направлен на определение связей между компонентами системы, обеспечивающих ее целенаправленное функционирование.

Системно-функциональный подход направлен на изучение поведения системы во внешней среде.

Системно-генетический подход направлен на изучение системы с точки зрения ее развития во времени.

Системно-коммуникативный подход направлен на изучение взаимодействия системы с внешними системами.

Системно-управленческий подход направлен на изучение системы с точки зрения обеспечения ее целенаправленного функционирования в условиях внутренних и внешних возмущений.

Системно-информационный подход изучает процессы передачи, получения, хранения и обработки данных внутри системы и в связях с внешней средой» [9].

В практике решения слабоструктурированных задач БНО используются два подхода: системно-элементный и системно-структурный подходы [10].

Заключение

В качестве объекта анализа задач управления КА рассмотрены три вида обеспечения управления полетом КА: командно-программное, баллистико-навигационное и информационно-телеметрическое.

Представлена схема предметной области основных видов решения задач управления КА: методов, моделей и обобщенной технологии в формате базовых частей — постановки задачи, алгоритма, программы и проведения расчетов.

Для каждого вида обеспечения представлены формы выдачи данных, используемых в цикле управления КА.

Проведен анализ параметров решения задач управления КА на предмет определения степени структуризации последних. Результаты анализа показали, что ошибки, допущенные в одной составляющей части решения, переводят соответствующую задачу в разряд слабоструктурированных. При этом формат решения из формализованного переходит в эвристический.

Дается определение системного подхода для исследования информационных объектов и его основные задачи: декомпозиция, анализ и синтез систем.

Приводится краткое описание методологии системного подхода и его четырех этапов.

Для решения слабоструктурированных задач БНО рекомендуется использовать системно-элементный и системно-структурный подходы. При этом в первом случае рассматриваются элементы объекта, а во втором — их структурные связи.

Список литературы

1. Информационные технологии управления. Учеб. пособие для вузов / Под ред. профессора Г. А. Титоренко. 2-е изд., доп. М: ЮНИТИ–ДАНА, 2003. 439 с.
2. Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Системный анализ навигационно-баллистического обеспечения в практике применения передовых космических технологий, 2019. С. 16–18.
3. Ларин В.К. Информационные системы для управления КА. Учеб. пособие. М.: МФТИ, 2020. 260 с.
4. Махалов Д. А. Разработка комплекса моделей и методик автоматизированного анализа телеметрической информации в реальном масштабе времени для пилотируемых орбитальных станций с использованием специализированного языка программирования. Дисс. ...канд. техн. наук: 2.3.1.: М.: ФГБУ «Московский авиационный институт», 2023. 208 с.
5. Романов В.Н. Системный анализ для инженеров. СПб: СЗГЗТУ, 2006, 186 с.
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. Учеб. для вузов. СПб: Питер, 2000. 384 с.
7. Белякова Н.В. Теория систем и системный анализ. Учеб. пособие. СПб.: Астерион, 2017. 222 с.
8. Стримовская А.В. Формирование системы показателей оценки эффективности транспортировки в цепях поставок. Дисс. ...канд. экон. наук: 08.00.05. М.: Нац. исслед. ун-т «Высш. шк. экономики», 2017. 180 с.
9. Саликов Ю.А., Кузьменко Н.И. Применение системного подхода в анализе процессов формирования и функционирования территориальных образований // Вестник ВГУИТ, 2020. Т. 82, № 1, С. 273–282.
10. Ларин В.К. Построение прототипа экспертно-диагностической системы анализа траекторной измерительной информации КА. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4. Вып. 1. С. 53–60.

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.04.2024
Дата принятия рукописи
в печать 01.07.2024