

УДК 519.8

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В СИНЕРГЕТИЧЕСКИ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ

В.С. Ковтун¹

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, 4А

E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rsce.ru

Аннотация. Рассмотрено использование нового методологического когнитивно-вариабельного синергетического² (КВС) подхода к анализу проблематики теории системных исследований, проводимых на борту автоматических космических аппаратов (АКА) [1]. В методологической основе КВС-подхода лежат кибернетическая [2] и синергетическая [3] теории управления динамическими системами, а также методология проактивного управления функционированием сложных технических объектов (СЛО), базирующаяся на концепции комплексного моделирования СЛО. Известны результаты ранее проведенного морфологического анализа проблематики теории системно-кибернетических исследований движения динамических систем, представленные в виде морфологического дерева, которое содержит четыре ветви (моделирование – анализ – наблюдение – выбор) и листья (частные задачи) [4]. Число задач определено взаимодействием управляющей системы (среды) с четырьмя типами воздействий возмущающей среды – детерминированной, стохастической, целенаправленной и с неизвестными характеристиками – при формировании входных воздействий на систему управления. В основе КВС-подхода лежит использование при управлении динамическими системами нового типа среды – синергетически возмущающей. Для отображения новой среды и задач на морфологическом дереве анализа проблематики дополнительно к существующим задачам системно-кибернетических исследований вводятся новые листья – частные задачи системно-синергетических исследований. Парадигма анализа проблематики сформирована на основе знаний, опыта управления и системных исследований, направленных на решение проблемы обеспечения ресурсами бортовых систем (БС) АКА и устойчивости их функционирования в процессе полета.

Целеполагание нового методологического подхода к анализу проблематики теории системных исследований направлено на рациональное использование основных структурно-функциональных ресурсов БС, получение синергетических ресурсов и предотвращения отказов, вызванных расчетными и нерасчетными аномальными процессами. Далее синергетическим будет называться такой вид ресурсов, который формируется спонтанной самоорганизацией процессов в системах управления и трансформируется в целенаправленную самоорганизацию в объективно суще-



© Автор(ы), 2024

¹ Владимир Семенович Ковтун, кандидат технических наук, главный специалист по верификации и сертификации космической техники.

² Когнитивно-вариабельный синергетический – «знание вариантов самоорганизации»; когнитивный – от лат. *cognitio* – знание, познание; вариабельный – от англ. *variable* – изменчивый, способный иметь варианты; синергетический – от греч. *συν* – приставка со значением совместности + *ἐργον* – деятельность).

ствующих многоместных отношениях, описывающих синергетические взаимодействия и взаимосвязи при движении процессов в условиях синергетически возмущающей внешней среды [5, 6].

Ключевые слова: *возмущающая среда, морфологический анализ, кибернетическая теория управления, синергетическая теория управления, когнитивно-вариабельный синергетический подход, автоматический космический аппарат, синергетические ресурсы.*

Введение

При системно-кибернетическом подходе к проектированию и разработке бортовых систем алгоритмы и методы управляющих систем (управляющих сред) создаются для управления функционированием динамических систем (объектов управления) в условиях стационарного характера движения процессов и при детерминированном состоянии возмущающей среды [3]. В наземных комплексных испытаниях систем управления не учитываются нестационарные движения, обусловленные синергетическими явлениями, приводящими к появлению новых связей в управляющей и возмущающей средах. Дальнейшее ресурсное обеспечение систем управления строится поддержанием их надежности путем сохранения неизменности параметров состояния и управления, predeterminedных техническими условиями эксплуатации. Создаются квазизамкнутые системы управления, предполагающие стационарное движение в объектах управления на всем интервале эксплуатации. В общесистемном подходе к созданию управляющих систем должно быть учтено воздействие всех параметров (связей) управляющей и возмущающих сред, но некоторые факторы не учитываются преднамеренно (как величины более высоких порядков малости), а остальные неизвестны на момент создания систем.

При системно-синергетическом подходе алгоритмы и методы, разработанные для управляющих систем, корректируются по результатам мониторинга их состояния из-за возникновения новых связей в условиях нестационарного характера движения процессов в динамических системах. Расход и регенерация ресурса – это изменение вещественной формы материального объекта, зависящее от взаимодействия физических полей и отображаемое свойствами, оцениваемыми параметрическими характеристиками процессов. Испытания, проводимые с материальными объектами АКА на протяжении всего их жизненного цикла, есть не что иное, как силовые взаимодействия информационно-энергетических полей, определенные связями между процессами. При этом синергетические явления в БС и их естественное ресурсное обеспечение зависят от данных взаимодействий.

В обоих подходах к управлению динамическими системами движение описывается дифференциальными уравнениями, а управление – интегралами движения. Принципиальное различие заключается в поиске интегралов движения с параметрами «неизменных связей» в динамической системе – кибернетическая теория управления, и преднамеренном или случайном введении интегралов движения в структуру динамической системы в процессе ее функционирования – синергетическая теория управления. Изначально планируемое «стационарное движение» постепенно трансформируется из-за диссипации внутренней энергии в объекте управления в «нестационарное движение» за пределами некоторого интервала времени, когда «проинтегрированная ошибка отступления от системного подхода» выводит работу системы управления за рамки заданных условий

эксплуатации. Если этот интервал больше или равен запланированному сроку эксплуатации системы управления, то задача системой выполнена, иначе – нет. Принципиальная разница в рассматриваемых подходах к управлению: в кибернетике свойства рассматриваются априори для стационарного движения процессов в системах управления, а в синергетике – апостериори для нестационарного движения процессов в системах управления.

Таким образом, надежностью систем управления подтверждается их ресурсное обеспечение при стационарном движении процессов в объектах управления (кибернетическая теория управления – КТУ). В ином случае ресурсное обеспечение зависит от живучести – свойства систем управления выполнять свои функции в условиях нестационарного движения процессов в объектах управления со связями, изменяющимися во времени (синергетическая теория управления – СТУ).

В.Н. Калининым, одним из основоположников школы системно-кибернетических исследований динамических систем в ВКА им. А.Ф. Можайского, проведен морфологический анализ проблематики системно-кибернетических исследований с учетом воздействия на системы управления четырех типов возмущающей среды: детерминированной (α), стохастической (β), целенаправленной (γ) и с неизвестными характеристиками (δ) [3]. Результаты исследований представлены в виде морфологического дерева с четырьмя ветвями, отображающими фундаментальные проблемы (моделирование – анализ – наблюдение – выбор), которые лежат в основе системно-кибернетических исследований, и листьями-задачами, решение которых на различных этапах жизненного цикла АКА позволяет обеспечить оптимальное управление сложными динамическими системами, включающее в себя и обеспечение надежности систем.

Родоначальник синергетической концепции теории управления динамическими системами в России А.А. Колесников полагал, что синергетику необходимо рассматривать в контексте развития системно-кибернетического подхода, «...она отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т.е. представляет собой симбиоз кибернетики и синергетики» [4]. В отличие от классической кибернетики, где рассматриваются стационарные движения нелинейных процессов в открытых динамических системах, в синергетике изучаются нестационарные движения процессов с возникновением кооперативных, когерентных связей, которые формируют новые структурные и функциональные свойства самоорганизующихся систем.

На основе знаний и опыта управления АКА как сложными техническими системами на базе синергетической теории управления разработан когнитивно-вариабельный синергетический (КВС) подход к решению задач системных исследований и управления, обеспечивающий живучесть систем при нестационарном движении процессов в динамических системах. В рамках этого подхода для исследования нестационарных нелинейных процессов вводится понятие среды пятого типа – «синергетически возмущающей» («сигма среда»- σ), в которую погружены системы управления. В результате на четырех ветвях морфологического дерева, представляющего результаты анализа проблематики теории системно-кибернетических исследований, формируются новые листья-задачи системно-синергетических исследований.

Целью решения этих задач является обеспечение живучести бортовых систем в условиях нестационарного движения процессов в объектах управления с получением дополнительно к номинальным структурно-материальным ресур-

сам бортовых систем, синергетических ресурсов, а также предотвращение непредвиденных отказов за счет превентивных мер, разрабатываемых на базе системных исследований кооперативных, когерентных и самосогласованных изменений состояний (движений) динамических систем, вызванных новыми связями.

Формирование синергетически возмущающей среды

Формирование синергетически возмущающей среды производится путем изменения состава существующей внешней среды, воздействующей на систему управления образовавшимися энергетическими, вещественными и информационными связями, возникающими при спонтанном или целенаправленном переходе от стационарного движения динамических систем к нестационарному движению в результате взаимодействия систем.

При разработке системы управления любой алгоритм управления строго и недвусмысленно определен в каждом конкретном случае (выполняется свойство детерминированности) на протяжении всего срока службы квазизамкнутой системы при стационарном движении процессов. На весь жизненный цикл техническими условиями эксплуатации определены многоместные отношения между прямыми и обратными связями в системе управления, учитывающие одновременное воздействие на объект управления множества управляющих (УВ) $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и возмущающих воздействий (ВВ) $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$ [3, 5].

Однако в любой момент времени в силу различных причин объективного и субъективного характера может быть осуществлен переход от стационарного к нестационарному движению процессов в объекте управления. Этот переход проиллюстрирован одним из многочисленных примеров управления реальными бортовыми системами геостационарного АКА с фазированной антенной решеткой (ФАР) [7], которая представлена как объект управления (ОУ1). При разработке квазизамкнутой системы управления для ОУ1 управляющей подсистемой УП1 формируется воздействие U_1 в виде электрических УВ для питания токовых контуров в отдельных модулях ФАР. В качестве факторов внешней детерминированной возмущающей среды, воздействующих на ФАР, учитываются: ВВ потока солнечного излучения, падающего на поверхность АКА, E_C ; ВВ ионизирующего излучения космического пространства, Φ_e , Φ_p ; ВВ от радиационных поглощенных доз электронов (D_e), протонов (D_p) и суммарной дозы ($D_{\text{сум}}$). При этом собственный магнитный момент ФАР за счет симметрично расположенного на панелях контуров разнонаправленного протекания тока в приеме-передающих модулях ФАР, состоящих из панелей, взаимно скомпенсирован и равен нулю. Таким образом инициируется квазистационарное движение электрических и электромагнитных процессов в модулях ФАР.

Для поддержания ориентации аппарата в качестве исполнительных органов системы управления движением применяются электродвигатели-маховики (ЭДМ) (ОУ2). Управление системой ЭДМ штатно осуществляется от управляющей подсистемы УП2 прямоугольно-частотными импульсами, определяющими направление и скорость вращения маховиков. При этом систему управления погружают в детерминированную возмущающую среду, в которой компонентами возмущающего момента являются моменты от сил гравитации и светового давления. Двигатели-маховики парируют действия указанных внешних моментов на корпус АКА (поддерживая тем самым ориентацию) и накапливают кинетический

момент до предельного значения в области располагаемого значения. Системы управления, включающие указанные ОУ, вещественно и функционально объединены корпусом АКА.

О стихийном спонтанном формировании синергетически возмущающей среды наблюдатель судит по заметному увеличению интенсивности накопления кинетического момента в системе ЭДМ при поддержании заданной орбитальной ориентации АКА. Согласно закону управления кинетическим моментом АКА в условиях воздействия внешних моментов [8], причиной является увеличение главного вектора момента внешних возмущающих сил, действующих на корпус аппарата. Гравитационную составляющую момента можно принять за постоянную величину (для примера будем рассматривать АКА – геостационарный спутник связи (ГСС)). Аэродинамическая составляющая момента работает только на малых высотах и для ГСС равна нулю. Момент от сил светового давления существенно меняется только в период высокой солнечной активности. Моменты, создаваемые метеорными потоками и частицами космического мусора, непостоянны, и их можно относительно легко определить по результатам внешних наблюдений за космическим пространством. Таким образом, при отсутствии солнечной активности увеличение могло произойти только за счет магнитной составляющей главного вектора возмущающего момента, имеющей тот же порядок величин, что и гравитационная составляющая. Расчетными методами с использованием синергетических наблюдений [9] определяют величину и направление действия магнитного возмущающего момента [10]. Далее необходимо установить систему и/или ее элементы, в которой произошло формирование собственного магнитного момента. Кроме рассмотренной системы электропитания ФАР таким местом на борту АКА (например) могут быть токовые контуры на панелях солнечных батарей (СБ) [10]. После определения места формирования и параметров собственного магнитного момента от ФАР или СБ с использованием специальных тестовых синергетических наблюдений [10] (определения места и характера воздействия возмущающей системы на среду) производится оценивание влияния указанной возмущающей среды на работу остальных систем (воздействия возмущенной среды на системы).

Кроме дополнительного возмущающего момента, воздействующего на корпус аппарата, особое внимание необходимо обратить на устройства, содержащие постоянные магниты и электромагниты (например, электроклапаны с магнитными катушками и др.). Взаимодействие их с собственным магнитным моментом на борту аппарата будет вызывать появление дополнительных механических нагрузок в виде действующих механических моментов в местах крепления устройств и т.д. При этом, несмотря на небольшие порядки малости величин указанных моментов, из-за длительного воздействия они могут существенно влиять на ресурс или приводить к отказам элементов систем, например путем разрушения целостности микросхем, не рассчитанных на дополнительную механическую нагрузку.

В общем случае свое влияние синергетически возмущающая среда может оказывать и на возмущающие факторы, которые воздействовали на систему управления до ее формирования. Так, например, в результате влияния возмущающего момента, сформированного взаимодействием приобретенного магнитного момента с магнитным полем постоянного магнита или электромагнита, может произойти изменение конфигурации привода, встроенного в подвижные элемен-

ты конструкции аппарата, за счет непредвиденного его движения. Это изменит тензор инерции аппарата, что повлияет на значение гравитационного момента.

Наблюдается влияние собственных магнитных моментов на борту АКА на характер воздействия ионизирующего излучения космического пространства (протонов и электронов высоких энергий) в элементах радиотехнических изделий и т.д. Необходимо отметить также, что рассмотрен пример одинарного формирования на борту АКА синергетически возмущающей среды (от одной системы). Синергетически возмущающая среда может формироваться и более сложно, многокомпонентно от нескольких систем, с наложением нескольких процессов. Таким образом, необходимо проводить оценку изменения всех факторов внешней среды при их взаимодействии с факторами синергетически возмущающей среды, тем самым формируя новое множество воздействий внешней возмущающей среды:

$$\Xi^{\sigma} = \{\xi_1^{\sigma}, \dots, \xi_m^{\sigma}\}.$$

Формирование множества полностью согласуется с системным подходом к созданию и эксплуатации динамических систем (объектов управления), в основе которого выделяются два основных правила [2]:

- все объекты рассматриваются как системы;
- учитываются все факторы воздействия систем на среду и среды на системы, где среда – совокупность элементов, окружающих систему и не входящих в ее состав, но оказывающих на нее воздействие.

Синергетические взаимосвязи и взаимодействия, возникающие при совместной работе нескольких объектов управления, т. е. в действующей системе, влияют на окружающую среду, которая при этом становится синергетически возмущенной, т. е. на нее воздействует система. Но, в свою очередь, эта среда, являясь синергетически возмущенной системой, воздействует на смежные системы управления и для них уже является синергетически возмущающей.

Погружение системы управления в синергетически возмущающую среду

Погружение системы управления в синергетически возмущающую среду производится путем целенаправленного включения во множества элементов входных воздействий $(B \times B)V^{\sigma}$ элементов (связей) этой среды

$$V^{\sigma} \subseteq B(U) \times B(\Xi^{\sigma}),$$

где $B(U)$ – булеан множества управляющих воздействий, $B(\Xi^{\sigma})$ – булеан множества возмущающих воздействий.

Запись $B \times B$, проведенная через декартовое произведение булеанов (B) рассматриваемых множеств, – это самый общий случай, т. к. булеан включает в свой состав как пустое множество, так различные подмножества множества, от которого берется булеан. При этом имеют право на существование не только парные воздействия – один элемент из одного множества, а другой из другого. Бывают и другие $B \times B$ как более простые, так и более сложные. Например, UB есть, а VB нет, и наоборот. Постоянно наблюдается несколько видов возмущающих воздействий. Для UB также можно предусмотреть такую ситуацию.

Разработка математической модели, учитывающей погружения систем управления в синергетически возмущающую среду, позволяет выстраивать новые отношения между системными процессами в нестационарных режимах их

функционирования. Формально отношения можно задавать различным образом: перечислением, графом, сетью, алгебраическими равенствами и неравенствами и т. д. В частности, задать такие отношения можно взвешенным функциональным мультиграфом, вершины которого определяют процессы, взвешенные ресурсами элементов системы, а дуги – отношения между процессами, заданные входными воздействиями ($B \times B$) на элементы систем [5].

Если, например, базовые системные процессы (БП) на борту АКА, погруженные в синергетически возмущающую среду, рассматривать в виде множества $\Pi^\sigma = \{\Pi_j^\sigma, j = 1, 2, \dots, J\}$, где j – обозначение текущего номера БП, то график бинарных отношений между элементами множества имеет вид

$$R_j^\sigma \subseteq \Pi_j^\sigma \times \Pi_j^\sigma, \quad j = 1, 2, \dots, J.$$

При этом между подмножествами пар бинарных отношений БП производится взаимодействие через $B \times B$ V_j^σ , которые определяются декартовым произведением булеанов множеств $UB(U_j)$ и $VB(\Xi_j^\sigma)$:

$$V_j^\sigma \subseteq B(U_j) \times B(\Xi_j^\sigma), \quad \langle \Pi_j, r(V_j^\sigma) \Pi_j \rangle, \quad r(V_j^\sigma) \in R_j^\sigma.$$

Введение мультиграфов для описания отношений между процессами при исследовании систем управления позволяет использовать при построении математических моделей класс матриц инцидентий. При этом в каждом из мультиграфов установлены материальные, энергетические и информационные связи между процессами в объектах управления. Кроме них существуют связифакторы, оказывающие внешнее синергетическое влияние на основные процессы [5].

Далее приведен пример процесса погружения ранее рассмотренной системы управления ЭДМ в синергетически возмущающую среду, сформированную системой управления ФАР.

Среда становится синергетически возмущенной в случае нарушения электрообеспечения одного или нескольких контуров цепей питания, расположенных на панелях ФАР. Причиной могут быть удары мелких частиц космического мусора, порождающие плазму, которая вызывает короткие замыкания или разрывы в электрических соединениях. Процесс стационарного движения в ФАР переходит в стадию нестационарного стихийного движения, которое характеризуется появлением собственного (нескомпенсированного) магнитного момента на борту АКА. Этот момент, взаимодействуя с магнитным полем Земли (МПЗ), воздействует в виде возмущающего момента на корпус АКА. Для поддержания требуемой ориентации АКА система управления ЭДМ, помимо парирования действия гравитационного момента и момента от сил светового давления, вынуждена осуществлять парирование действия магнитного возмущающего момента. Таким образом, система ЭДМ принудительно стихийно переходит в нестационарный режим работы в результате появления на борту АКА воздействия от синергетически возмущенной среды.

На борту возник случай спонтанно самоорганизованного управления БС в условиях синергетически возмущающей среды. Действие среды носит стихийный характер, который идентифицируется как аномальный процесс. В результате действия дополнительного возмущающего магнитного момента на корпус АКА происходит ускоренный расход ресурса ЭДМ. Кроме того, система разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента, содержащая магнитные исполни-

тельные органы (МИО), становится менее эффективной (не справляется), так как кинетический момент накапливается быстрее противодействующего ему разгрузочного момента. Это приводит к вынужденному применению реактивных двигателей (РД) для указанной разгрузки ЭДМ, тем самым производится нерасчетный расход рабочего тела.

В данном случае парирование негативного действия синергетически возмущающей среды является одним из примеров целенаправленного управления, которое производится через синергетические наблюдения с целью определения мест разрыва контуров и дальнейшего отключения от электропитания панелей, содержащих неуравновешенные магнитные моменты. Если самоорганизация синергетически возмущающей среды приводит не к ускорению накопления кинетического момента в системе ЭДМ, а к его замедлению, указанные отключения не производят. При этом контролируют процесс разгрузки и в случае перехода от разгрузки к накоплению кинетического момента в результате действия синергетической составляющей магнитного управляющего момента производят отключения магнитонеуровновешенных контуров.

Другим способом целенаправленного погружения управляющей системы ЭДМ в синергетически возмущенную среду является наведенное движение тока в контурах, расположенных на панелях ФАР. Его можно организовать таким образом, что магнитные моменты будут однонаправлены в двух вариантах с разными знаками ($\pm$) векторов в связанном базисе АКА. Известно, что кинетический момент, накопленный в системе ЭДМ, неизменен в инерциальном пространстве. Необходимо определить управляющий магнитный момент от взаимодействия магнитных моментов с МПЗ при его расположении в том же базисе инерциального пространства и далее направить вектор управляющего магнитного момента противоположно вектору накопленного кинетического момента в системе ЭДМ за счет разворота токовых контуров [7]. В таком случае будет осуществляться разгрузка системы ЭДМ от накопленного кинетического момента, т. е. управление U_2 токовыми контурами ФАР (см. [7]) выполняет функцию МИО. Для прекращения действия управляющего магнитного момента на корпус АКА необходимо выполнить разнонаправленные развороты токовых контуров, обеспечивающих «магнитонейтральную» ФАР. Таким образом, функционирующая ФАР может одновременно играть роль управляющей системы по разгрузке ЭДМ от накопленного кинетического момента через приложение и снятие действия разгрузочного магнитного момента.

Синергетически возмущающую среду (σ) позволяет выделить в отдельный вид возмущающих сред то обстоятельство, что она существует в условиях проявления системных законов самоорганизации при нестационарном движении процессов, имеющих динамическую природу, т. е. проявляющихся при возникновении новых синергетических взаимосодействий, изменяющихся со временем. До этого нестационарное движение динамических систем при возникновении новых синергетических взаимосодействий, изменяющихся со временем, как и сами синергетические взаимосодействия, не рассматривались в качестве формирователей возмущающей среды.

Из приведенного примера следует, что синергетически возмущающая среда описывается на основе апостериорной информации о состоянии динамических систем после изменения стационарного характера движения процессов в одной из систем управления на нестационарный. В этом она существенно отличается от других видов сред, формируемых на основе априорных сведений о них [3, 11].

При этом формирование синергетически возмущающей среды производится с использованием синергетических наблюдений, в конкретном примере за магнитными моментами, возникающими на борту АКА.

Получить максимально полную информацию о характеристике объекта управления и проконтролировать ее достоверность позволяет сопоставление вычислений по измеренным параметрам процессов в различных системах, одновременно функционирующих на борту АКА по различным физическим законам. Если значения параметров, рассчитанные разными способами, равны, то это дает полную гарантию их достоверности на основе сходимости процессов разной природы при синергетическом взаимодействии систем.

При недостаточности бортовых измерений для получения достоверной информации указанным способом исследования переносятся на физическое макетирование ситуации. Для этого используется материальное (предметно-стендовое) моделирование работы бортовых систем. На основе натурных исследований создается математическая модель реального объекта путем ее верификации через оценивание – установление степени соответствия математической модели объекта значениям показателей натурной модели. В этом случае о достоверности свидетельствует полное соответствие показателей движения процессов, приобретенных предметно-модельным путем, информации о движении процессов в работающих БС. Верифицированная натурно-математическая модель используется для прогноза работы БС.

Статистические и вероятностные модели здесь не работают. Следовательно, синергетически возмущенная среда не относится к стохастически возмущенной, так как не может быть представлена множеством допустимых значений, имеющих вероятностный характер.

Далее рассмотрено существующее различие между целенаправленностью действий на динамическую систему: с одной стороны детерминированной внешней среды (типа α) и/или целенаправленной возмущающей среды (типа γ), и с другой стороны – синергетически возмущающей среды. В том и другом случае целенаправленность – это функциональная тенденция, ориентированная на достижение системой некоторого состояния, выражаемого целью. В первом случае целенаправленности цель задается извне, а способы достижения цели формируются управляющей подсистемой. Во втором случае целенаправленность – это способность к выбору в зависимости от внутренней цели: «...цель выступает как определяющая сущность процесса, а его истинное понимание состоит в самоуправлении и самоорганизации в соответствии с поставленной целью» [4].

На основе вышеизложенного становится очевидным, что синергетически возмущающую среду нельзя отнести к индифферентному типу и неизвестной среде (тип δ). Для системы управления, погруженной в синергетически возмущающую среду, важно, известна или неизвестна среда. В конкретном случае, какими бы ни были причины, приводящие к нестационарности движения, их надо распознать по совокупности вновь проявивших себя признаков.

Выводы: вновь введенная синергетически возмущающая среда не соответствует ни одному из существующих до этого способов описания разновидностей возмущающей среды; математические модели (методы), построенные на априорных сведениях о внешней среде, не могут быть использованы для решения исследовательских задач, связанных с синергетически возмущающей средой и построенных на синергетических наблюдениях.

Особенности построения и разновидности задач системных исследований в условиях синергетически возмущающей среды

В [3] обозначены четыре фундаментальные проблемы системных исследований (ветви морфологического дерева), в которых представлены разновидности частных задач (листьев) с учетом возмущающих сред четырех типов: детерминированной (α), стохастической (β), целенаправленной (γ) и с неизвестными характеристиками (δ), стационарно воздействующих на движение динамических систем. При этом на основе проведенного анализа отмечается, «...что при всем калейдоскопическом разнообразии задач, возникающих при изучении тех или иных реальных объектов, каждая из этих задач может быть отнесена к одной из четырех фундаментальных проблем (моделирование – анализ – наблюдение – выбор), лежащих в основе системно-кибернетических исследований».

При погружении управления динамическими системами в синергетически возмущающую среду (σ) появляются новые частные задачи, которые дополняют задачи системно-кибернетических исследований динамическими связями от синергетических взаимодействий. Далее на примерах исследований единства процессов самоорганизации и управления БС АКА раскрывается техническая целесообразность решений такого рода задач по четырем фундаментальным проблемам, направленным на получение синергетических ресурсов и повышение устойчивости функционирования систем.

Первая проблема – моделирование (А). Заключается в построении модели изучаемого реального объекта управления в системно-кибернетических терминах, «... в виде некоторой абстрактной системы, отображающей все свойства изучаемого объекта, взаимодействующего со средой, и позволяющей получить необходимую информацию об этом объекте» [3].

При проведении системно-кибернетических исследований выделяются два вида моделей – концептуальные (А1) и математические (А2). В свою очередь, концептуальные подразделяются на два типа моделей – интуитивные и логиковербальные, а математические включают в себя два типа моделей – аналитические и алгоритмические (или имитационные) [3]. При рассмотрении в моделировании динамических систем синергетической составляющей к 8 морфологическим разновидностям концептуальных $A1\alpha$, $A1\beta$, $A1\gamma$, $A1\delta$ и математических $A2\alpha$, $A2\beta$, $A2\gamma$, $A2\delta$ моделей для определенных ранее типов возмущающих сред добавляются еще два вида моделей, учитывающих синергетически возмущающую среду: $A1\sigma$; $A2\sigma$.

Примером концептуальной интуитивной синергетической модели может служить модель вариабельной системы – регулятора процессов [7], представленная множеством понятий когнитивно-синергетического подхода к системным исследованиям характеристик БС АКА как открытых, нелинейных сложных технических систем и связей между ними. Модель обуславливает создание и функционирование систем управления БС, одновременно выполняющих при синергетическом взаимодействии несколько функций. Рассмотренная синергетическая энергетическая взаимосвязь между двумя системами управления в виде магнитных моментов токовых контуров в цепях электропитания приемо-передающих модулей ФАР, взаимодействующих с МПЗ и кинетическим моментом в системе ЭДМ, позволяет использовать систему управления (СУ) ФАР в качестве МИО системы управления движением и навигации (СУДН). Тем самым СУ ФАР наделена свойством вариабельности, позволяющим ей стать системой-регулятором сразу для двух физических процессов: управления радиосигналами спутниковой

связи в ФАР и управления кинетическим моментом в системе ЭДМ. Получен дополнительный функциональный синергетический ресурс исполнительных органов СУДН для разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента, который может заменить или дополнить существующий.

Примером концептуального логико-вербального моделирования служит метамодель развивающейся текущей ситуации на борту АКА, обусловленная самоорганизацией БС и содержащая информацию о потенциально существующих возможностях управления состоянием аппарата в различных условиях реализации номинальных и аномальных процессов [5]. Создание концептуальной метамодели позволяет перейти от предметной формализованной модели к следующим этапам моделирования – формально-математическому и материально-функциональному моделированию, в ходе которых учитываются индивидуальные особенности движения процессов на борту АКА. При этом расчет ресурсного обеспечения производится на основе комплексного анализа первичных причинно-следственных топологических и функциональных номинальных связей между БС и их элементами, а также синергетических свойств, выявленных в результате реализации на практике двойственных взаимосвязанных процессов декомпозиции-агрегирования (объединения, укрупнения) тех или иных бортовых подсистем в БС. Наличие синергетических свойств позволяет использовать созданные на их основе синергетические ресурсы для дублирования существующих и создания новых структурно-функциональных, материальных и энергетических ресурсов БС.

К синергетически-аналитическим относится расчетная модель определения расхода рабочего тела (РТ) в электроракетных стационарных плазменных двигателях по значениям разрядных тока и напряжения [12]. Моделирование позволяет верифицировать процесс расхода РТ электроракетных двигателей из объемов хранения и подачи, тем самым проводить контроль герметичности объемов по допустимому уровню микротечи. Синергетические информационные взаимосвязи между процессами позволяют получить синергетический ресурс РТ, сохраняющий структурно-функциональные и материальные ресурсы за счет исключения из применения негерметичных объемов.

Математическое моделирование синергетических температурных воздействий на энергопроизводящий процесс в электрохимических аккумуляторах (ЭХБ) АКА [13] является примером алгоритмического типа модели. Моделирование позволяет определять тепловую мощность холодильника, которую необходимо подводить для поддержания оптимальной температуры в зоне электрохимической реакции ЭХБ. В результате эксплуатации аккумуляторов в оптимальном температурном диапазоне продлевается длительность их работы при сохранении разрядной энергоемкости. Тем самым формируется синергетический ресурс ЭХБ.

Вторая проблема – анализ (В). Заключается в исследовании свойств, присущих рассматриваемой системе. В этой проблеме выделяются три подпроблемы [3].

В1. Анализ структуры системы. Предметом анализа структуры синергетической системы является исследование кооперативного и когерентного поведения ее компонентов. Вводится дополнительный вид структурного анализа $B1\sigma$ в синергетически возмущающей среде. Примером такого вида исследований может служить рассмотренная ранее структура системного построения ФАР космического базирования для решения задач обеспечения радиолокации и персональ-

ной спутниковой связи [6]. Структурные системные перестроения конфигурации ФАР в процессе эксплуатации позволяют использовать ее за счет синергетической информационной и энергетической взаимосвязи между различными системными процессами в качестве МИО системы управления ориентацией АКА для разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента. Синергетический ресурс сохраняет материальный ресурс РТ ракетных двигателей (РД) за счет «безрасходного» выполнения динамического режима разгрузки ЭДМ, т. е. выполнения динамической операции без использования РД.

В2. Исследование свободных движений и реакций системы. В СТУ предметом анализа являются поведение и свойства синергетических динамических систем при их самоорганизации в отсутствие внешних управляющих воздействий. При этом на первый план выдвигаются исследования обмена динамических систем с внешней средой энергией, веществом и информацией. Системные законы самоорганизации имеют динамическую природу, т. е. формируют нестационарные движения динамических систем при появлении синергетических взаимодействий, изменяющихся со временем. Вследствие этого наряду с существующими морфологическими вариантами задач анализа при системно-кибернетических исследованиях $B2\alpha$, $B2\beta$, $B2\gamma$, $B2\delta$ появляется новый вариант синергетического анализа свободных движений и реакций системы в синергетически возмущающей среде $B2\delta$. Примером данного вида анализа являются исследования дуговых разрядных процессов в анод-катодном промежутке электроракетного стационарного плазменного двигателя (СПД) [12]. Анализу подвергаются аномальные синергетические явления в виде бросков разрядного тока (тока анода) (БТА), вызванных уменьшением электрического сопротивления анод-катодного промежутка. При этом анализ выявляет причины аномалии, вызывающей уменьшение сопротивления. Реакция системы электроракетных двигателей на события БТА защищает аппаратуру питания и управления СПД от аномально больших токов. Синергетический ресурс аппаратуры питания и управления увеличивает продолжительность работы ее элементов (электронных радиоизделий) за счет сокращения времени аномальных режимов работы.

В3. Исследование вынужденных движений и реакций системы. В КТУ центральное место занимает анализ множеств достижимости, исследование топологической структуры которых позволяет оценить такие свойства системы, как управляемость, чувствительность и др. [3]. В СТУ изначально создаются избыточные степени свободы, определяющие дополнительные возможности в свойствах будущей системы, а затем эти степени свободы редуцируются в процессе управления, перенацеливая движения систем на желаемые диссипативные структуры, представляющие собой некоторые динамические состояния – аттракторы систем [4]. При этом свойства и направление этого процесса определяются не только внешними управляющими воздействиями, но и внутренней динамикой нелинейной системы, зависящей от синергетических взаимодействий и информационных взаимосвязей между элементами системы. В СТУ априорная информация о системе и среде требует постоянного обновления. Поэтому целесообразно установить различия между четырьмя морфологическими вариантами проблемы анализа $B3\alpha$, $B3\beta$, $B3\gamma$, $B3\delta$ системно-кибернетических исследований и новым вариантом $B3\sigma$ системных исследований в синергетически возмущающей среде.

Примером может служить анализ «множества достижимости» проведения маневров АКА на витке с использованием тяговых модулей (ТМ), содержащих

электроракетные стационарные плазменные двигатели (СПД). Каждый ТМ рассматривается как уникальное устройство, в СПД которого расход РТ зависит от многих степеней свободы разрядного процесса. При этом макроскопические свойства синергетически сложного разрядного процесса в СПД определяются двумя электродинамическими параметрами порядка – разрядными напряжением и током. Задачей анализа является определение пороговой чувствительности расхода РТ по электродинамическим параметрам, обеспечивающим удельный импульс тяги. Целью анализа является минимизация расхода РТ путем выбора на маневр группы ТМ, СПД которых на момент включения обладают максимальным удельным импульсом тяги, и тем самым поддержание максимального синергетического ресурса РТ [1]. При этом синергетический ресурс РТ, использованный для выполнения динамической части программы полета АКА, заменяет и тем самым сохраняет материальный ресурс РТ, который был бы израсходован в тех же целях без применения предлагаемого метода выбора ТМ на маневр, включающего исследование вынужденных движений и реакций ТМ при функционировании в составе системы электроракетных двигателей.

Третья проблема – наблюдение (С). «...Заключается в поиске алгоритма наблюдения через оценивание состояния динамической системы в заданный момент времени на основе регистрации и исследования реакции системы» [3].

Если обозначить этот алгоритм через A_0 , то в общем виде его можно рассматривать как отображение A_0 : «реакция» $\rightarrow$ «состояние, t_H ».

В рамках рассматриваемой проблемы выделяют две подпроблемы [3]:

С1. Наблюдение состояния динамической системы при отсутствии управляющего воздействия – свободной реакции системы:

A_{0CB} : «свободная реакция» $\rightarrow$ «состояние, t_H ».

С2. Наблюдение состояния динамической системы при известном (заданном или подлежащем выбору в интересах задачи наблюдения) управляющем (тестовом) воздействии – вынужденной реакции системы:

A_{0BH} : «вынужденная реакция» $\rightarrow$ «состояние, t_H ».

В прикладных задачах наблюдения важную роль играет также выбор момента времени оценки состояния t_H . Рассматриваются три варианта этого задания.

В первом из них $t_H = t_0$ – оценка состояния системы в начальный момент времени. Во втором при $t_H = t$ – оценка текущего состояния динамической системы. В третьем $t_H > t$ – оценка состояния системы в будущем, это задача прогнозирования.

Различают два вида алгоритма наблюдений: 1) системно-кибернетические A_0 , построенные на оценивании соответствия объекта нормам по измеренным параметрам процессов в системных объектах; 2) системно-синергетические A_0^s – оценивание параметров процессов, недоступных измерениям в одних системных объектах, связанных с внешней средой, по измерениям параметров процессов, отражающих физические, энергетические и материальные воздействия и отображающих информационные взаимодействия в других системных объектах, связанных с первыми объектами и внешней средой [8]. Принципы построения соответствующих алгоритмов наблюдения существенно отличаются друг от друга. В связи с этим различают и соответствующие три варианта проблемы наблюдения.

Первый вариант (C0) – оценка начального состояния динамической системы. Различают две версии варианта этой проблемы: первая C01 – исследование свободной реакции системы, а вторая C02 – исследование вынужденной реакции, которая является ответом либо на известное управляющее воздействие, либо на специально организуемое исследователем (наблюдателем) тестовое воздействие.

Оценка начального состояния при $t_H = t_0$:

– оценивание начального состояния при исследовании свободной реакции динамической системы. Варианты решения задач этого задания при системно-кибернетических наблюдениях C01 α , C01 β , C01 γ , C01 δ начального состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения задачи для динамической системы, погруженной в синергетически возмущающую среду C01 σ . Примером могут служить наблюдаемые начальные условия по накопленному вектору кинетического момента $K(t_0)$ в системе электродвигателей маховиков (свободной реакции системы) на момент включения тяговых модулей (ТМ) системы электроракетных двигателей для проведения маневра. От начальных условий зависит выбор состава ТМ при выполнении динамической операции [1]. Начальные условия зависят от внешних силовых факторов, воздействующих на АКА. Синергетически возмущающей является среда орбитального полета, в которой на АКА действуют моменты от внешних сил (гравитационных, светового давления и других), приводящих к накоплению кинетического момента в процессе поддержания орбитальной ориентации с использованием системы ЭДМ. По значению параметра порядка – вектору кинетического момента $K(t_0)$ в системе ЭДМ – на основе математического моделирования можно оценивать внешние возмущения, действующие на АКА. По результатам наблюдения указанных начальных условий производится выбор ТМ, обеспечивающих совмещение режимов коррекции орбиты и разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента [14]. Тем самым приобретает синергетический ресурс по РТ за счет исключения режима специально выделяемой разгрузки ЭДМ с использованием РД;

– оценивание начального состояния при исследовании вынужденной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях C02 α , C02 β , C02 γ , C02 δ начального состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду C02 σ . Примером наблюдения, относящегося к типовому варианту решения задачи C02 σ , является принудительный выбор вектора кинетического момента $K'(t_0)$ в системе ЭДМ в качестве начального условия для проведения маневра на ТМ [15], от которого зависит продолжительность их работы. Для этого использовались направленные действия управляющих моментов, обусловленных силами светового давления на поверхность СБ и взаимодействием магнитного поля Земли с собственным магнитным моментом СБ [16]. Критерием оценочного суждения по результатам наблюдения было число включений ТМ. Целью решения задачи являлось получение синергетического ресурса в системе электроракетных двигателей путем минимизации числа включений ТМ при проведении маневров с соблюдением одних и тех же условий приобретения характеристической скоро-

сти АКА, т. е. на выполнение одной и той же динамической операции меньшим расходом ресурса.

Второй вариант (C1) – оценка текущего состояния при $t_H = t$. Различают две версии варианта этой проблемы: первая C11 – исследование свободной реакции системы, а вторая C12 – исследование вынужденной реакции:

– оценивание текущего состояния при исследовании свободной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях C11 α , C11 β , C11 γ , C11 δ текущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду C11 σ . Наблюдение, относящееся к типовому варианту C11 σ , раскрывается в методе синергетических наблюдений собственного магнитного момента солнечных батарей для разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента. Производятся синергетические наблюдения магнитных моментов $\vec{L}_m$ токовых контуров СБ посредством измерения суммарного вектора кинетического момента аппарата. Целью наблюдений является определение величины и направления собственного магнитного момента СБ для применения управляющего момента $\vec{M}_m$ от взаимодействия $\vec{L}_m$ с МПЗ при разгрузке ЭДМ от накопленного кинетического момента [10]. Наблюдения проводятся в режиме поддержания штатной орбитальной ориентации АКА – геостационарного спутника связи. Назначаются два интервала измерений, на которых осуществляются измерения текущих значений векторов кинетического момента в системе ЭДМ. Первый интервал измерений выбирается на теневой, а другой – на освещенной Солнцем части орбиты. Разница в значениях кинетического момента позволяет за счет специальной математической обработки динамических параметров АКА вынести оценочные суждения о величине и направлении $\vec{L}_m$, формируемых токовыми контурами СБ. В последующем «безрасходная» разгрузка ЭДМ от накопленного кинетического момента позволяет получить синергетический ресурс РТ РД за счет замены их применения в этих же целях;

– оценивание текущего состояния при исследовании вынужденной реакции динамической системы. Варианты решения при системно-кибернетических наблюдениях C12 α , C12 β , C12 γ , C12 δ текущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду C12 δ . Вынужденной реакцией системы управления движением АКА следует считать разгрузку системы ЭДМ от накопленного кинетического момента с использованием РД, так как при достижении предельных значений области S располагаемых его значений система ЭДМ перестает быть работоспособной. При системно-кибернетических наблюдениях разгрузку осуществляют при достижении годографом текущих значений вектора-функции кинетического момента системы ЭДМ, поверхности области S . Таким образом, наблюдение ведется с учетом причинного способа самоорганизации разгрузки СГ. Если решать эту же задачу в синергетически возмущающей среде, за счет учета взаимосвязей и взаимодействий бортовых систем, а также наблюдения за влиянием на процесс накопления кинетического момента факторов внешней среды, то разгрузку необходимо проводить направляемым (целевым) способом. При этом необходимо либо исключить применение в этих целях

РД и использовать моменты внешних сил [16], либо использовать РД с максимальными значениями коэффициентов эффективности разгрузочных моментов [1]. В каждом случае будет получен синергетический ресурс РТ, использованный для выполнения динамической части программы полета АКА, заменяющий и тем самым сохраняющий материальный ресурс РТ, который был бы израсходован в тех же целях.

Третий вариант (C2) – оценка будущего состояния при $t_H > t$. Различают две версии варианта этой проблемы: первая C21 – исследование свободной реакции системы, а вторая C22 – исследование вынужденной реакции:

– оценивание будущего состояния при исследовании свободной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях C21 α , C21 β , C21 γ , C21 δ будущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду C21 σ . В рамках решения задачи C21 σ разработан метод поддержания трехосной ориентации АКА с ЭДМ и целевой нагрузкой в виде бортового радиотехнического комплекса спутниковой связи [16]. Техническим результатом метода является сохранение штатной ориентации АКА в условиях отсутствия информации от приборов, измеряющих параметры углового движения АКА. Таким образом, обеспечивается синергетический ресурс по продолжительности работы гироскопических измерителей вектора угловой скорости, звездных и других датчиков внешней информации;

– оценивание будущего состояния при исследовании вынужденной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях C22 α , C22 β , C22 γ , C22 δ будущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду C22 σ . Примером решения задачи типа C22 σ служит модернизированный метод поддержания трехосной ориентации системой управления движением АКА с ЭДМ и целевой нагрузкой [17, 18]. В отличие от ранее рассмотренных действий метода решения задачи C21 σ , для обеспечения поддержания устойчивой трехосной ориентации АКА в орбитальной системе координат выполняется смещение кинетического момента ЭДМ, ось вращения которого направлена по оси OZ и в штатной ориентации совпадает с направлением вектора орбитальной угловой скорости. Для этой цели включением РД создается такой управляющий момент вынужденной реакции динамической системы, наличие которого приводит к изменению (смещению) кинетического момента по указанной оси на требуемую величину в пределах области S располагаемого кинетического момента в системе ЭДМ. В результате ось OZ становится стабилизированной осью, относительно которой строится гироскопическая орбита для управления АКА [8]. При этом поддержание ориентации становится более устойчивым, что приводит к увеличению продолжительности интервалов управления угловым движением АКА по прогнозируемым значениям кинетического момента ЭДМ. Тем самым уменьшается число необходимых корректировок расхождений между прогнозируемыми и реальными значениями кинетического момента ЭДМ. В свою очередь, это приводит к увеличению синергетического ресурса приборов, участвующих в измерении параметров углового движения АКА, по числу включений и продолжительности работы.

Четвертая проблема – выбор (D). Заключается в целенаправленном выборе тех или иных альтернативных элементов, определяющих свойства и поведение рассматриваемой системы [3]. Проблема делится на две подпроблемы (D1, D2).

D1. Выбор структурных характеристик (параметров) системы для обеспечения желательных свойств системы.

К настоящему времени структура процесса управления космическими полетами, в том числе АКА, достаточно детально проработана и подтверждена на практике, а для ее реализации созданы средства и методы, образующие контуры системы управления полетом [19]. Информационное обеспечение процесса в контуре управления полетом, включающее планирование полета, реализацию разработанного плана, контроль (наблюдение) полета, принятие решения по результатам контроля и реализацию принятого решения, гарантирует желательные свойства АКА как сложной технической системы. При этом выбор структурных и ресурсных характеристик АКА напрямую зависит от информационно-командного обеспечения.

Ресурсное обеспечение полета зависит от того, как спланированы входные воздействия на БС с учетом управляющих и возмущающих воздействий. Использование системно-кибернетических исследований БС установлены четыре множества решений задач планирования, определяющих выбор структурно-функциональных характеристик систем управления полетом при входных воздействиях в составе вариантов детального плана полета АКА $D1\alpha$, $D1\beta$, $D1\gamma$, $D1\delta$ в зависимости от того, в какую возмущающую среду «погружено» планирование орбитального полета. Каждое из множеств детального плана является функциональным. При этом можно провести оценивание элементов множеств по некоторому критериальному правилу. В данном случае оценивание производится по ресурсному обеспечению полета, а критерием является располагаемое полетное время (РПВ)¹) [20].

В зависимости от вариантов детального плана в условиях космического полета АКА присутствуют постоянные входные воздействия на процессы в БС, приводящие к изменению показателей равномерности и интенсивности выработки ресурсов систем [21]. Управление ресурсами бортовых систем АКА на n -х этапах, $\mathcal{E}_n = 1, 2, \dots, \mathcal{E}_N$, $[t_0, t_k] \mathcal{E}_n$, для наглядности представлено в виде линейных ориентированных графов (орграфов – org) по числу компонент множества интегрального полетного ресурса (ИПР)

$$R_S = \{G, W_a, W_{sb}, R_u, R_a, R_c, R_h, R_z, R_b, R_d, R_e, R_f, R_k\}, \quad (1)$$

включающего ресурсы бортовых систем управления движением и навигации (R_u), бортовых цифровых вычислений (R_a), управления бортовой аппаратурой (R_c), обеспечения теплового режима (R_h), ориентации СБ (R_z), служебного канала управления (R_b), объединенной двигательной установки (R_d), энергоснабжения (R_e), сбора бортовой информации (R_f) и элементов конструкции (R_k) аппарата; рабочего тела электроракетных двигателей (G), генераторов (W_{sb}) и аккумуляторов электроэнергии (W_a) (рис. 1).

¹ Располагаемое полетное время – интервал полетного времени АКА или его системы, в течение которого обеспечивается выполнение номинальной программы полета до полного расхода ресурса аппарата или системы [20].

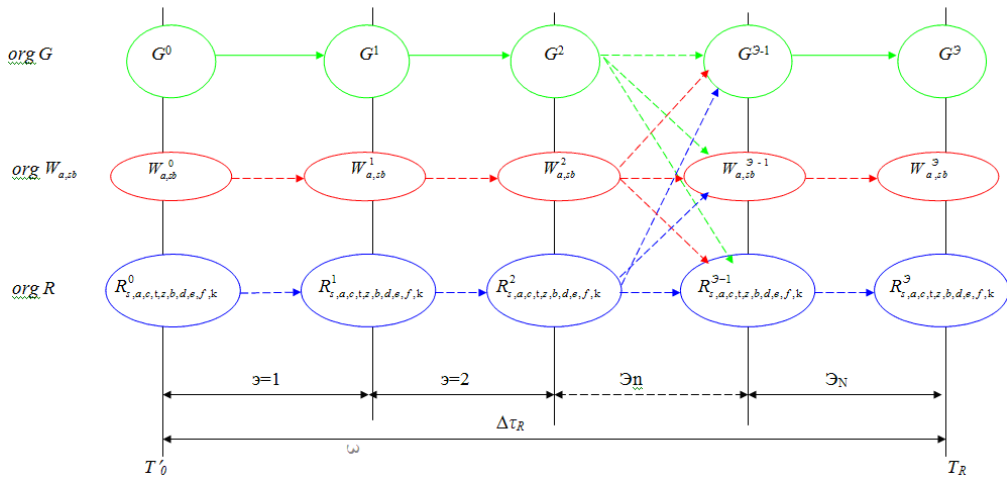


Рис. 1. Линейный оргграф расхода полетного ресурса АКА: переходными стрелками между линиями оргграфов условно показаны направления возможного перераспределения ресурсов БС при погружении управления полетом в синергетически возмущающую среду

Если проводить отсчет РПВ с начала штатной эксплуатации аппарата на орбите T_0 и вести до расчетного момента завершения его полета T_R , то первоначальный прогноз на успешную реализацию программы полета (ПП) зависит от выполнения условий по РПВ, определяемому по каждой системе $(\Delta\tau_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)})$, а также по энергоресурсам $(\Delta\tau_{W_{a, sb}})$ и РТ $(\Delta\tau_G)$:

$$(\Delta\tau_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)}, \Delta\tau_G, \Delta\tau_{W_{a, sb}}) \geq \Delta\tau_R, \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)} = \Delta\hat{\tau}_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)} - \Delta\tilde{\tau}_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)}, \quad \Delta\tau_G = \Delta\hat{\tau}_G - \Delta\tilde{\tau}_G,$$

$$\Delta\tau_{W_{a, sb}} = \Delta\hat{\tau}_{W_{a, sb}} - \Delta\tilde{\tau}_{W_{a, sb}}, \quad \Delta\tau_R = T_R - T_0,$$

где $\Delta\hat{\tau}_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)}$, $\Delta\hat{\tau}_G$, $\Delta\hat{\tau}_{W_{a, sb}}$ – запасы располагаемого полетного времени по ресурсам бортовых систем, РТ и источникам электроэнергии на момент отделения аппарата от ракеты; $\Delta\tilde{\tau}_{r(s,a,c,t,z,b,d,e,f,k)}$, $\Delta\tilde{\tau}_G$, $\Delta\tilde{\tau}_{W_{a, sb}}$ – израсходованная часть располагаемого полетного времени по ресурсам бортовых систем, РТ и источникам электроэнергии на этапе тестовых проверок до ввода аппарата в штатную эксплуатацию.

При этом определяется множество начального ИПР на момент времени T_0 :

$$R_s^0 = \{G, W_a, W_{sb}, R_s, R_a, R_c, R_h, R_z, R_b, R_d, R_e, R_f, R_k\}^0.$$

По завершении n -го этапа управления (ϑ_n) производится количественная накопительная оценка изменения ресурсных показателей множества (1) (см. рис. 1):

$$\Delta R^{\vartheta_n} = \{G, W_a, W_{sb}, R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}\}^{\vartheta_n}.$$

Далее определяется множество остаточного ИПР в конце каждого этапа:

$$\Delta R_{\Sigma}^{\vartheta_n} = \{G^0 - G^{\vartheta_n}, W_a^0 - W_a^{\vartheta_n}, W_{sb}^0 - W_{sb}^{\vartheta_n}, R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^0 - R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^{\vartheta_n}\}^{\vartheta_n}. \quad (3)$$

По значениям элементов множества (3) и коэффициентам расхода ресурса $(k_G, k_{W_a}, k_{W_{sb}}, k_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k})$ на единицу полетного времени определяют текущее РПВ по РТ, источникам электроэнергии и ресурсам БС:

$$\Delta \tau_G^{\mathfrak{Z}_n} = \frac{1}{k_G} (G^0 - G^{\mathfrak{Z}_n}) \quad ; \quad \Delta \tau_{W_a}^{\mathfrak{Z}_n} = \frac{1}{k_a} (W_a^0 - W_a^{\mathfrak{Z}_n}) \quad ; \quad \Delta \tau_{W_{sb}}^{\mathfrak{Z}_n} = \frac{1}{k_{sb}} (W_{sb}^0 - W_{sb}^{\mathfrak{Z}_n}) \quad ;$$

$$\Delta \tau_{R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}}^{\mathfrak{Z}_n} = \frac{1}{k_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}} (R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^0 - R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^{\mathfrak{Z}_n}) .$$

Линии орграфов отображают состояние остаточных полетных ресурсов динамических систем, бортовой энергетики и РТ по РПВ, при этом наглядно проявляются орграфы минимальных рангов критического пути, определяющие РПВ АКА:

$$\text{org}(\tau_{\min}^{\mathfrak{Z}_n}) = \min(\Delta \tau_G^{\mathfrak{Z}_n}, \Delta \tau_{W_a}^{\mathfrak{Z}_n}, \Delta \tau_{W_{sb}}^{\mathfrak{Z}_n}, \Delta \tau_{R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}}^{\mathfrak{Z}_n}) . \quad (4)$$

Для увеличения длины орграфа критического пути по РПВ на этапе $\mathfrak{Z}_n$ вводится множество вариантов детального плана полета АКА, «погруженного» в синергетически возмущающую среду $D1 \sigma$. При этом производится формирование критерия управления РПВ для орграфа минимального ранга согласно постулату С.В. Микони: «...критерий можно рассматривать как цель, измеряемую в некоторой шкале» [22].

В качестве примера рассматривается формирование критерия минимизации затрат РТ (G) электроракетных двигателей на этапе за счет синергетического ресурса для увеличения критического пути РПВ АКА. Для этого производится:

1. Построение интервальной шкалы $G(\tau)$ оценки прогноза расхода РТ G_x на момент времени τ_x окончания этапа планирования ПП от начального момента времени τ_{x0} , с определением начального ресурсного запаса РТ ΔG_x :

$$G_x = G_{x0} - k_g(\tau) \Delta \tau, \quad G(\tau) \in [G_x, G_{x0}], \quad \Delta G_x = G_{x0} - G_0; \quad \Delta \tau = \tau_x - \tau_{x0},$$

где G_{x0} – масса РТ в баллонах хранения на момент начала прогноза τ_{x0} ; G_0 – остаток РТ в элементах конструкции средств хранения и подачи («незабор») на момент завершения эксплуатации электроракетной двигательной установки АКА; $k_g(\tau) = \hat{k}_g(\tau) \vee \tilde{k}_g(\tau)$ – коэффициент расхода РТ на выполнение ПП в единицу полетного времени с применением $\tilde{k}_g(\tau)$ или без применения $\hat{k}_g(\tau)$ методов управления БС в синергетически возмущающей среде с целью получения синергетического ресурса

$$\hat{k}_g(\tau) = \frac{\Delta \hat{G}_x}{\Delta \tau}, \quad \tilde{k}_g(\tau) = \frac{\Delta \tilde{G}_x}{\Delta \tau},$$

где $\Delta \hat{G}_x$, $\Delta \tilde{G}_x$ – затраты РТ на интервале $\Delta \tau$ при выполнении ПП без использования и с использованием указанных методов управления БС.

2. Постановка однокритериальной задачи минимизации расхода РТ относительно нижней границы шкалы для $m-x$ вариантов плана ПП за счет использования методов получения синергетического ресурса РТ:

$$k_{g_m}(\tau) \rightarrow \min, \quad k_{g_m}(\tau) \in [\tilde{k}_{g_m}(\tau), \hat{k}_g(\tau)]_m, \quad m \in \overline{1, M} .$$

Минимизация коэффициента расхода РТ $k(\tau)_{g_m} \rightarrow \min$ за счет получения синергетического ресурса отвечает требованию целевой функции критерия максимизации $\Delta G_x \rightarrow \max$ ресурсного запаса РТ по завершению работы на интервале $\Delta \tau$.

При выполнении динамической операции на этапе без расхода РТ $\Delta \tilde{G}_x = 0$ продолжительность критического пути орграфа РПВ по рассматриваемому ресурсному параметру увеличится на время продолжительности этапа. В противном случае значение указанного времени будет прямо пропорционально количеству сохраненного на этапе РТ.

В процессе полета АКА происходит постепенное перераспределение остаточных полетных ресурсов (3) (см. рис. 1). В результате очередные компоненты ИПР (1) начинают формироваться в виде орграфов критического пути. Для них аналогичным образом производится постановка однокритериальных задач получения синергетического ресурса для увеличения РПВ АКА.

Таким образом осуществляется последовательная процедура формирования многокритериальной оценки эффективности управления РПВ АКА с учетом синергетического ресурсного потенциала по всем параметрам ИПР на последовательные однокритериальные оценки.

D2. Проблема управления: выбор управляющего воздействия из заданного множества допустимых альтернатив для обеспечения желательного процесса управления. С системно-кибернетической точки зрения «...проблему управления D2 можно интерпретировать как нахождение совокупности двух (!) алгоритмов, первый из которых является алгоритмом наблюдения, т. е. позволяет по зафиксированной реакции определить состояние системы в требуемые моменты времени, а второй является собственно алгоритмом управления и определяет управляющее воздействие как функцию времени и указанного состояния» [3].

Алгоритм управления может быть представлен в виде следующего отображения:

$A_c : \text{«состояние»} \rightarrow \text{«управляющее воздействие»}.$

Решение проблемы управления D2 производится в виде пары алгоритмов $\langle A_o, A_c \rangle$ наблюдения A_o и управления A_c в зависимости от четырех типов возмущающей среды, разделенных по множествам задач D2 α , D2 β , D2 γ , D2 δ .

В случае применения системно-синергетического подхода к проблеме D2 ее решение производится в виде пары алгоритмов $\langle A_o^\sigma, A_c^\sigma \rangle$ синергетических наблюдений A_o^σ [9] и варибельного управления A_c^σ [20].

Синергетические наблюдения позволяют за счет учета информационно-энергетических взаимосвязей заменять измеряемые параметры одних систем вычисляемыми параметрами на основе измерений в других системах. В случае недостаточного количества измеренной информации в БС для анализа процессов при выполнении номинальных операций информация дополняется наблюдениями в специально созданных контролируемых условиях функционирования систем (тестовых проверках БС). При этом учитываются как структурные взаимоотношения между системами, так и энергетические и информационные взаимосвязи между разными физическими процессами на борту АКА (электродинамическими, бародинамическими, механическими, электрическими, магнитодинамическими и др.).

Синергетические наблюдения являются новым методом научного исследования свойств бортовых процессов, позволяющим проводить наблюдения за функционированием БС и расходом бортовых ресурсов КА в условиях недостатка информации, а также верифицировать значения параметров через другие, измеренные во взаимосвязанных физических процессах.

В отличие от КТУ, где система управления рассматривается как совокупность управляющей подсистемы и объекта управления – динамической системы, в СТУ объект управления (т. е. динамическая система) одной системы управления может выступать в роли управляющей подсистемы в другой системе управления [7]. Принцип варибельности построения системы управления заключается в том, что ее управляющая подсистема может одновременно управлять несколькими динамическими системами за счет существующих между ними синергетических информационно-энергетических связей, т. е. движение одной динамической системы является управляющим воздействием для другой. В условиях космического полета это позволяет получать синергетический ресурс систем управления по продолжительности работы за счет выявления дополнительных функциональных резервов для управляющих подсистем.

Таким образом, в условиях «погружения» систем управления БС АКА в синергетически возмущающую среду необходимо проводить их дополнительные исследования решением частных задач множества $D2\sigma$. При этом вводится обобщенное понятие регулятора движения процессов в динамической системе, которым является материальный объект, управляющий этим процессом через воздействие в условиях влияния синергетически возмущающей среды. Материальным объектом может быть управляющая подсистема или объект управления смежной системы.

При проведении морфологической структуризации системных исследований по проблеме $D2$ второй элемент пары алгоритмов $\langle A_o, A_c \rangle$ зависит от взаимосвязи движения и реакции системы. В [3] подвергаются структуризации два варианта этой подпроблемы управления – $D2p$ и $D2s$.

Взаимосвязь движения и реакции системы на практике фиксируется измерительными устройствами. Это означает, что искомый алгоритм управления A_o зависит от состава применяемых измерителей. Вследствие этого решение рассматриваемых подпроблем управления $D2p$ и $D2s$ обычно производится с учетом принципа разделения на два этапа: на первом из них решается проблема наблюдения – задача нахождения алгоритма A_o , а на втором – строится алгоритм управления A_c в предположении, что состояние системы известно. Этапы реализуются последовательно друг от друга, после чего их результаты объединяются.

Вариант $D2p$ программного управления «...основан на предположении, что состояние системы точно известно в некоторый начальный момент времени и управляющее воздействие формируется как некоторая функция этого состояния и времени» [3]. С учетом вариантов возмущающей среды решение проблемы программного управления динамической системой представлено в КТУ четырьмя морфологическими разновидностями множеств задач: $D2p\alpha$, $D2p\beta$, $D2p\gamma$, $D2p\delta$.

Использование КВС подхода к морфологическому анализу проблематики теории системных исследований предполагает формирование пятой разновидности множества задач программного управления $D2p\sigma$. Связано это с тем, что их

решение производится в виде пары алгоритмов $\langle A_o^\sigma, A_c^\sigma \rangle$ синергетических наблюдений A_o^σ [9] и варибельного управления A_c^σ [20]. С помощью синергетических наблюдений формируются начальные условия, с учетом которых производится выбор варианта управления динамической системой. Например, от начальных условий по вектору кинетического момента в системе ЭДМ при проведении маневра с использованием системы электроракетных двигателей с осями тяг, расположенных под углом к осям связанного базиса, зависит выбор номера двигателя для первоначального включения и последующих включений на маневре [15]. При этом указанные начальные условия формируются по результатам синергетических наблюдений за воздействием на АКА внешних возмущающих моментов, парирование которых осуществляется системой ЭДМ при поддержании заданной ориентации аппарата. Дальнейшее управление кинетическим моментом в системе ЭДМ в процессе проведения маневра осуществляется с учетом начальных условий.

Вариант D2s управления при полной информации о состоянии объекта управления «...формируется ... как управление с обратной связью – как функция текущего состояния» [3]. С учетом вариантов возмущающей среды решение проблемы управления при полной информации о состоянии объекта управления представлено в КТУ четырьмя морфологическими разновидностями множеств задач: $D2s\alpha$, $D2s\beta$, $D2s\gamma$, $D2s\delta$.

Использование синергетических наблюдений при формировании закона управления приводит к формированию пятой разновидности множества задач $D2s\sigma$.

При этом синергетические наблюдения позволяют обеспечить регулирование процессов в объектах управления с учетом полной информации об их состоянии. Связано это с использованием для оценивания одного и того же объекта управления информационных и энергетических его взаимосвязей со смежными, одновременно работающими системами. Например, параметрами порядка, по которым ведется управление стационарным электроракетным плазменным двигателем, являются разрядные ток и напряжение [9]. При этом произвести косвенную оценку технического состояния двигателя можно по измеренным значениям ускорения, которое приобретает АКА от воздействия тяги двигателя; по измерениям параметра кинетического момента в системе ЭДМ при взаимодействии момента от тяги двигателя с управляющим моментом, создаваемым ЭДМ [1]; по изменению бародинамических параметров (давлению и температуре) газообразного рабочего тела в расходной емкости, из которой производится забор, позволяющих определять секундный массовый расход РТ в двигателе для оценки его тяги. Получить максимально достоверную (полную) информацию о номинальной производящей характеристике объекта управления – тяге электроракетного двигателя – и проконтролировать ее значения позволяет сопоставление вычислений по измеренным параметрам процессов в различных системах, одновременно функционирующих на борту АКА по различным физическим законам. Если значения тяги, рассчитанные разными способами, равны, то это дает полную (абсолютную) гарантию достоверности контролируемого параметра. Далее по тяге и ее удельному импульсу проводится оптимизация управления по критерию расхода массы рабочего тела на выполнение типовой динамической полетной операции – проведение маневра АКА [1].

В результате проведенного анализа проблематики теории системных исследований АКА в синергетически возмущающей среде представлено морфологическое дерево, содержащее четыре ветви (моделирование – анализ – наблюдение – выбор) (рис. 2), на которых находятся 15 листьев – частных σ -задач, представляющих системно-синергетические исследования.

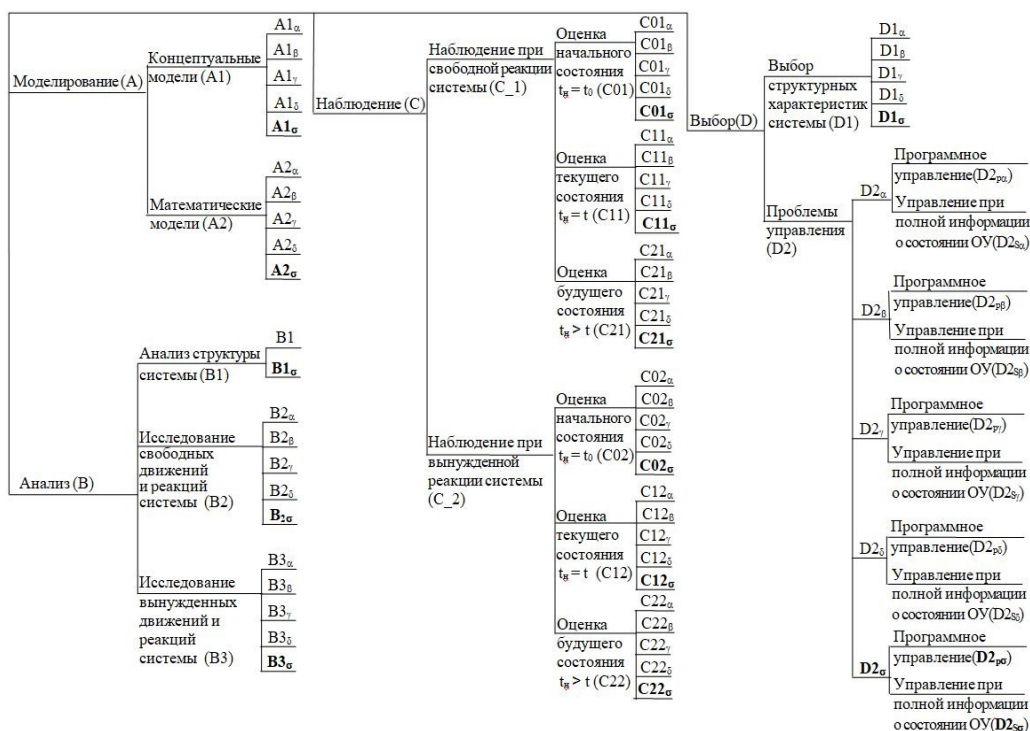


Рис. 2. Морфологическое дерево анализа системно-кибернетических и системно-синергетических исследований систем управления АКА

При проведении системно-кибернетических исследований число листьев – частных задач будет зависеть от степени структуризации априорных сведений о внешней среде. В данном случае морфологическая структура включает 57 таких задач. Следуя методике структуризации морфологического дерева, предложенной В.Н. Калининым [3], возмущающую среду с неизвестными характеристиками (δ) можно рассматривать как среду с нечетким описанием ($\delta 1$), с неизвестностью ($\delta 2$), с комбинированным описанием неопределенных факторов ($\delta 3$) и т. д., как это предлагается в монографии [11]. При многообразии динамических систем различной природы исследователь может для достоверного анализа оправданно проводить дополнительную декомпозицию представленных системно-кибернетических исследовательских задач-листьев на сохраненных ветвях морфологического дерева.

Выводы

В качестве итога морфологической структуризации проблематики теории системных исследований движения динамических систем в АКА отмечается, что морфологическая схема проведения системно-кибернетических исследований, представленная в виде дерева, имеющего четыре ветви (моделирование – ана-

лиз – наблюдение – выбор) с размещением 57 листьев – частных задач, дополнена 15 системно-синергетическими частными задачами при управлении динамическими системами в условиях синергетически возмущающей «сигма-среды», включающими: моделирование $A1\sigma$, $A2\sigma$; анализ $B1\sigma$, $B2\sigma$; $B\sigma$; наблюдение $C01\sigma$, $C02\sigma$; $C11\sigma$, $C12\sigma$; $C21\sigma$, $C22\sigma$; выбор $D1\sigma$, $D2\sigma$; $D2p\sigma$, $D2s\sigma$.

В развитие математической теории динамических систем применительно к управлению полетом АКА производится перевод управления из стохастически возмущающей в синергетически возмущающую среду. Переход осуществляется за счет синергетических наблюдений, позволяющих, с одной стороны, перевести множество допустимых ВВ стохастической среды во множество известных синергетических ВВ, и с другой стороны, дополнить их новыми синергетическими ВВ, которые до этого относились к среде с неизвестными характеристиками. При этом максимально достоверную информацию о процессах, происходящих в БС, позволяет получить идентификация параметров порядка самоорганизации движения динамических систем, которая производится на основе разных физических принципов.

Решение новых задач по каждому из объектов управления (динамических систем), которыми являются бортовые системы АКА, позволяет вывести ресурсное обеспечение полета на новый уровень, дополнив его на базе существующего структурно-функционального ресурса синергетическими ресурсами, а также обеспечив предупреждение отказов бортовых систем в условиях развития в них аномальных расчетных и нерасчетных процессов. Ощутимым результатом в ресурсном обеспечении полета АКА явилось наличие представленных в статье синергетических ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковтун В.С., Платонов В.А., Богачёв А.В. Методика обеспечения полета автоматических космических аппаратов «Ямал» синергетическим ресурсом рабочего тела электроракетных двигателей // Космическая техника и технологии. 2023. № 4 (43). С. 88–103.
2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М., 2005. 291 с.
3. Калинин В.Н. Морфологический анализ проблематики теории системных исследований // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 1 (24). С. 89–107.
4. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006.
5. Ковтун В.С. Когнитивная агрегативно-потокковая метамодель процесса управления полетом автоматического космического аппарата // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. Т. 28, №3. С. 35–60. doi: org/10.14498/tech.2020.3.3.
6. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14, № 4. С. 17–37.
7. Ковтун В.С., Павлов А.Н. Когнитивно-синергетический подход к проектированию автоматических космических аппаратов с бортовыми системами, обладающими свойствами вариабельности // MMRIST 2020. Модели и методы исследования информационных систем на транспорте 2020. Санкт-Петербург. Сборник материалов семинара опубликован в CEUR под номером 2803 (urn:nbn:de:0074-2803-0).
8. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 594 с.
9. Ковтун В.С. Метод проведения синергетических наблюдений процессов на борту космического аппарата // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 995–1002. doi: 17586/0021-3454-2020-63-11-995-1002.

10. Патент RU 2176972 C1. МКИ В 64 G 1/24 / *Ковтун В.С., Банит Ю.Р.* Способ определения магнитного момента солнечных батарей космического аппарата с системой силовых гироскопов // Изобретения. 2001. № 35.
11. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
12. *Ковтун В.С., Севастьянов Д.Н., Пищулин В.А., Фомин Л.В., Бедин Б.И.* Определение расхода ксенона в электроракетных плазменных двигателях при эксплуатации космического аппарата «Ямал» // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 59–66.
13. *Ковтун В.С., Лобанов В.Б., Городецкий А.А.* Моделирование тепловых процессов, протекающих в никель-водородных аккумуляторных батареях с общим корпусом при эксплуатации космического аппарата на геостационарной орбите // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 4. С. 22–40.
14. Патент RU 2112713 C1. МКИ В 64 G 1/24 / *Ковтун В.С., Платонов В.Н.* Способ управления космическим аппаратом с помощью реактивных исполнительных органов при поддержании заданной ориентации // Изобретения. 1998. № 16.
15. *Ковтун В.С.* Методы управления геостационарным спутником с помощью маховиков и электроракетных плазменных двигателей // Космонавтика и ракетостроение. 2009. № 55. С. 60–68.
16. Патент RU 2196710 C2. МКИ В 64 G 1/28, 1/44 / *Богачев А.В., Ковтун В.С., Платонов В.Н.* Способ формирования управляющих моментов на космический аппарат с силовыми гироскопами и поворотными солнечными батареями и система для его осуществления // Изобретения. 2003. № 2.
17. Патент RU 2341419 C2. В64 G 1/28 / *Банит Ю.Р., Ковтун В.С., Беляев М.Ю., Платонов В.Н.* Способ поддержания трехосной ориентации космического аппарата с силовыми гироскопами и целевой нагрузкой // Изобретения. 2008. № 35.
18. Патент RU 2356802 C2. МПК В64 G 1/00/ *Платонов В.Н., Беляев М.Ю., Банит Ю.Р., Ковтун В.С.* Способ поддержания трехосной ориентации космического аппарата с силовыми гироскопами и целевой нагрузкой // Изобретения. 2009. № 15.
19. *Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами. Ч. 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 477 с.
20. *Ковтун В.С.* Применение методик переменного управления полетом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 4 (97). С. 143–157.
21. *Ковтун В.С., Павлов А.Н., Соколов Б.В., Павлов Д.А., Воротягин В.Н.* Методика оперативной оценки интенсивности и равномерности расходования ресурсов бортовых систем автоматических космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 4. С. 62–68.
22. *Микони С.В.* Теория принятия управленческих решений. СПб., М., Краснодар: Лань, 2015.

Статья поступила в редакцию 01 марта 2024 г.

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF SYSTEM STUDIES OF AUTOMATIC SPACE APPLICATIONS IN A SYNERGETICALLY DISTURBING ENVIRONMENT

V.S. Kovtun¹

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia)
4A, Lenin st., Korolev, Moscow Region, 141070, Russian Federation

E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rsce.ru

Abstract. *The article considers the use of a new methodological cognitive-variable synergetic (CVS) approach to the analysis of the problems of the theory of systems research conducted on board automated spacecraft (AS) [1]. The methodological basis of the CVS approach is based on cybernetic [2] and synergetic [3] theories of dynamic systems management, as well as the methodology of proactive management of the functioning of complex technical objects (STO), based on the concept of integrated modeling of STO [2]. The results of the previously conducted morphological analysis of the problems of the theory of systemic cybernetic studies of the movement of dynamic systems are known, presented in the form of a morphological tree containing four branches (modeling-analysis-observation-choice) and leaves (particular tasks) [4]. The number of tasks is determined by the interaction of the control system (environment) with four types of effects of the disturbing environment – deterministic, stochastic, purposeful and with unknown characteristics – in the formation of input effects on the control system. The CVS approach is based on the use of a new type of environment in the management of dynamic systems – synergetically disturbing. To display the new environment and tasks on the morphological tree of problem analysis, in addition to the existing tasks of systemic cybernetic research, new leaves are introduced – particular tasks of systemic synergetic research. The paradigm of problem analysis is formed on the basis of knowledge, management experience and system research aimed at solving the problem of providing resources for on-board AS systems and the stability of their functioning during flight.*

The goal-setting of a new methodological approach to the analysis of the problems of the theory of systems research is aimed at the rational use of the main structural and functional resources of the BS, obtaining synergetic resources and preventing failures caused by calculated and non-calculated abnormal processes. Further, synergetic will be called such a type of resources that is formed by spontaneous self-organization of processes in management systems and transformed into purposeful self-organization in objectively existing multi-place relationships describing synergetic interactions and interrelations during the movement of processes in a synergetically disturbing external environment [5,6].

Keywords: *disturbing environment, morphological analysis, cybernetic control theory, synergetic control theory, cognitive variable synergetic approach, automatic spacecraft, synergetic resources.*

REFERENCES

1. Kovtun V.S., Platonov V.A., Bogachyov A.V. Metodika obespecheniya polyota avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov «Yamal» sinergeticheskimi resursami rabochego tela elektroraketnykh dvigatelej [Methodology for ensuring the flight of Yamal automatic spacecraft with a synergetic resource of the working fluid of electric rocket engines] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2023. № 4(43). Pp. 88–103. (In Russian).



© The Author(s), 2024

¹ Vladimir S. Kovtun (PhD. Sci. (Techn.)).

2. *Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Intellektual'nye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoj dinamikoj slozhnyh tekhnicheskikh obektov [Intelligent technologies for monitoring the state and management of structural dynamics of complex technical objects]. M., 2005. 291 p. (In Russian).
3. *Kalinin V.N.* Morfoloicheskij analiz problematiki teorii sistemnyh issledovanij [Morphological analysis of the problems of the theory of systemic research] // Trudy SPIIRAN. 2013. Vyp. 1 (24). Pp. 89–107. (In Russian).
4. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods of control of complex systems: theory of system synthesis]. M.: KomKniga, 2006. (In Russian).
5. *Kovtun V.S.* Kognitivnaya agregativno-potokovaya metamodel' processa upravleniya polyotom avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata [Cognitive aggregative-streaming meta-model of the flight control process of an automatic spacecraft] // Vestn. Samarsk. gosud. un-ta. Ser. Tekhnich. nauki. 2020. V. 28, № 3. Pp. 35–60. doi: org/10.14498/tech.2020.3.3. (In Russian).
6. *Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V.* Bajpasnost' kak atribut zhivuchesti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov v anomal'nyh polyotnyh situacijah [Bypass As an attribute of survivability of automatic spacecraft in abnormal flight situations] // Vestn. Samarsk. gosud. aerokosmich. un-ta. 2015. V. 14, № 4. Pp. 17–37. (In Russian).
7. *Kovtun V.S., Pavlov A.N.* Kognitivno-sinergeticheskij podhod k proektirovaniyu avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov s bortovymi sistemami, obladayushchimi svojstvami variabel'nosti [Cognitive synergetic approach to the design of automatic spacecraft with onboard systems with variability properties] // MMRIST 2020. Modeli i metody issledovaniya informacionnyh sistem na transporte 2020. Sankt-Peterburg. Sbornik materialov seminarov opublikovan v CEUR pod numerom 2803 (urn:nbn:de:0074-2803-0). (In Russian).
8. *Rauschenbach B.V., Tokar E.N.* Upravlenie orientaciej kosmicheskikh apparatov [Spacecraft orientation control]. M.: Nauka, 1974. 594 p. (In Russian).
9. *Kovtun V.S.* Metod provedeniya sinergeticheskikh nablyudenij processov na bortu kosmicheskogo apparata [Method of conducting synergetic observations of processes on board a spacecraft] // Izv. Vuzov. Priborostroenie. 2020. V. 63, № 11. Pp. 995–1002. doi: 17586/0021-3454-2020-63-11-995-1002. (In Russian).
10. Patent RU 2176972 S1. MKI B 64 G 1/24 / *Kovtun V.S., Banit Yu.R.* Sposob opredeleniya magnitnogo momenta solnechnyh batarej kosmicheskogo apparata s sistemoj silovyh giroskopov [A method for determining the magnetic moment of solar panels of a spacecraft with a system of power gyroscopes] // Izobreteniya. 2001. № 35. (In Russian).
11. *Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Kvalimetriya modelej i polimodel'nyh kompleksov [Qualimetry of models and polymodel complexes]. M.: RAN, 2018. 314 p. (In Russian).
12. *Kovtun V.S., Sevastyanov D.N., Pishchulin V.A., Fomin L.V., Bedin B.I.* Opredelenie rashkoda ksenona v elektroraketnyh plazmennyyh dvigatelyah pri ekspluatatsii kosmicheskogo apparata «Yamal» [Determination of xenon consumption in electric rocket plasma engines during spacecraft operation Yamal] // Izvestiya RAN. Energetika. 2009. № 1. Pp. 59–66. (In Russian).
13. *Kovtun V.S., Lobanov V.B., Gorodetsky A.A.* Modelirovanie teplovyh processov, protekayushchih v nikel'-vodorodnyh akkumulyatornyh batareyah s obshchim korpusom pri ekspluatatsii kosmicheskogo apparata na geostacionarnoj orbite [Modeling of thermal processes occurring in nickel-hydrogen batteries with a common body during operation of a spacecraft in geostationary orbit] // Izvestiya RAN. Energetika. 2007. № 4. Pp. 22–40. (In Russian).
14. Patent RU 2112713 S1. MKI B 64 G 1/24 / *Kovtun V.S., Platonov V.N.* Sposob upravleniya kosmicheskim apparatom s pomoshch'yu reaktivnyh ispolnitel'nyh organov pri podderzhanii zadannoj orientatsii [A method for controlling a spacecraft using reactive actuators while maintaining a given orientation] // Izobreteniya. 1998. № 16. (In Russian).
15. *Kovtun V.S.* Metody upravleniya geostacionarnym sputnikom s pomoshch'yu mahovikov i elektroraketnyh plazmennyyh dvigatelej [Methods of controlling a geostationary satellite using flywheels and electric rocket plasma engines] // Kosmonavtika i raketostroenie. 2009. № 55. Pp. 60–68. (In Russian).
16. Patent RU 2196710 S2. MKI B 64 G 1/28, 1/44 / *Bogachev A.V., Kovtun V.S., Platonov V.N.* Sposob formirovaniya upravlyayushchih momentov na kosmicheskij apparat s silovymi giroskopami i povorotnymi solnechnymi batareyami i sistema dlya ego osushchestvleniya [Method of generating control moments for a spacecraft with power gyroscopes and rotary solar panels and a system for its implementation] // Izobreteniya. 2003. № 2. (In Russian).
17. Patent RU 2341419 S2. B64 G 1/28 / *Banit Yu.R., Kovtun V.S., Belyaev M.Yu., Platonov V.N.* Sposob podderzhaniya tryohosnoj orientatsii kosmicheskogo apparata s silovymi giroskopami

- i celevoj nagruzkoj [A method for maintaining the triaxial orientation of a spacecraft with power gyroscopes and a target load] // Izobreteniya. 2008. № 35. (In Russian).
18. Patent RU 2356802 S2. MPK V64 G 1/00/ *Platonov V.N., Belyaev M.Yu., Banit Yu.R., Kovtun V.S.* Sposob podderzhaniya tryohosnoj orientacii kosmicheskogo apparata s silovymi giroskopami i celevoj nagruzkoj [A method for maintaining the three-axis orientation of a spacecraft with power gyroscopes and a target load] // Izobreteniya. 2009. № 15. (In Russian).
 19. *Solovyov V.A., Lysenko L.N., Lyubinsky V.E.* Upravlenie kosmicheskimi polyotami [Space Flight Control]. Ch.1. M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2009. 477 p. (In Russian).
 20. *Kovtun V.S.* Primenenie metodik variabel'nogo upravleniya polyotom avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya racional'nogo ispol'zovaniya resursov bortovyh sistem [Application of methods of variable flight control of automatic spacecraft for the rational use of onboard systems resources] // Kosmonavtika i raketostroenie. 2017. № 4 (97). Pp. 143–157. (In Russian).
 21. *Kovtun V.S., Pavlov A.N., Sokolov B.V., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N.* Metodika operativnoj ocenki intensivnosti i ravnomernosti raskhodovaniya resursov bortovyh sistem avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov [Methodology for the operational assessment of the intensity and uniformity of the expenditure of resources onboard systems of automatic spacecrafts] // Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina. 2020. № 4. Pp. 62–68. (In Russian).
 22. *Mikoni S.V.* Teoriya prinyatiya upravlencheskih reshenij [Theory of managerial decision-making]. SPb., M., Krasnodar: Lan', 2015. (In Russian).

Original article submitted 01.03.2024