

МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПРОЦЕССАМИ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. С. КОВТУН

*Ракетно-космическая корпорация „Энергия“ им. С. П. Королёва,
141070, г. Королёв, Московская обл., Россия
E-mail: kovtun_v11@mail.ru*

Рассматривается метод наблюдения за состоянием бортовых систем космических аппаратов (КА), базирующийся на основных принципах синергетического подхода к управлению полетом КА. Для синергетических наблюдений за БС вводится постулат о „взаимосвязи всех протекающих на борту процессов“. На его основе производится поиск на борту КА таких физических процессов в его „основных бортовых системах“, измеряемые параметры которых позволяют, с учетом внешних факторов, произвести оценку параметров технического состояния „сопредельных (смежных) систем“, а также анализ расхода ресурсов в основных и сопредельных системах. В качестве примера рассматривается метод определения величины и локализации собственного магнитного момента солнечных батарей на основе измерений и вычислений угловой скорости КА и кинетического момента силовых гироскопов в системе управления движением с учетом внешних возмущающих моментов.

Ключевые слова: *космический аппарат, методика, синергетическое наблюдение, система силовых гироскопов, измеряемая информация, объект управления, физический процесс*

Введение. Наблюдение за состоянием бортовых систем (БС) относится к одной из четырех фундаментальных проблем, лежащих в основе системно-кибернетических исследований [1] процессов на борту космических аппаратов (КА). Основным способом оценивания работы БС является сбор, обработка и анализ измеряемых параметров подсистем из состава БС путем реализации соответствующих процессов мониторинга их состояния [2]. Однако не все процессы в БС можно оценить на основе измерительной информации, поступающей от систем мониторинга. Не всегда также можно оценить работу БС с помощью вычисляемых параметров. В таких случаях для оценки предлагается использовать метод научного исследования, базирующийся на изучении КА как единой сложной технической системы, состоящей из развивающихся открытых нелинейных систем, постоянно обменивающихся энергией, веществом и информацией между собой и внешней средой. Данный метод базируется на основных принципах синергетического подхода к управлению полетом КА. Для синергетических наблюдений за БС вводится постулат о „взаимосвязи всех протекающих на борту процессов“ [3].

На практике выполняя операции наблюдения за происходящими на борту КА процессами, тем самым осуществляют контроль функционирования и состояния таких материальных объектов управления (ОУ) КА, как электронные устройства элементов БС, конструкционные элементы, электрические кабели, солнечные батареи, баки и магистрали подачи рабочего тела (РТ) в электроракетные двигатели и др. Многообразие материальных объектов на борту КА и их многочисленные взаимосвязи позволяют проводить синергетические наблюдения за процессами в случаях частичного и полного отсутствия или недостатка измерительной информации в одних ОУ за счет измерения параметров процессов, характеризующих работу других ОУ.

Синергетическое наблюдение — это оценивание недоступных непосредственным измерениям параметров процессов в одних материальных объектах по измерениям параметров процессов, отражающих физические энергетические воздействия и отображающих информационные взаимодействия в других материальных объектах, связанных с первыми объектами.

Содержание текущего наблюдения за поведением параметров процессов сводится к выполнению операций по контролю изменения параметров ОУ в режиме реального времени. Кроме текущего, применяется статистическое наблюдение за поведением параметров процессов — это научно организованный сбор и оценивание данных о процессах с помощью учета каждого случая изменения их параметров.

Синергетические наблюдения невозможны без вычислительного процесса, так как необходимо с использованием уравнений математической физики и результатов натурных испытаний провести взаимное отображение множеств измеряемых параметров одних процессов в множества вычисляемых параметров других процессов. Как показано в работе [4], при наблюдении за состоянием ОУ (в данном случае конкретных БС КА) производится наблюдение за требуемыми параметрами вычислительного процесса — входными и выходными операндами используемых вычислительных модулей, а также проверяется соответствие их значений заранее заданным эталонным значениям. Метод проведения синергетических наблюдений — это способ получения информации о процессах в сопредельных ОУ на борту КА, недоступной непосредственному измерению и приобретаемой путем вычислений по измерениям в узловых ОУ с учетом внешних факторов. Целью разрабатываемого методического обеспечения синергетических наблюдений за процессами является получение недостающей информации и оценивание влияния синергетических явлений на расход бортовых ресурсов КА. Кроме того, проводимое оценивание ориентировано на решение задач рационального использования бортовых ресурсов посредством конструктивного учета эмерджентных свойств БС, обусловленных синергетическими явлениями [5].

Метод синергетических наблюдений за бортовыми процессами. Разработка предлагаемого метода проводилась на основе сценария анализа результатов выполнения этапов общего плана полета КА [2]. Наиболее часто общий план делится по годам, кварталам, месяцам, неделям, суткам. План самой низкой квантификации является детальным, включающим полетные операции.

На каждом из этапов после выполнения плана производится анализ измерительной информации в целях определения технического состояния ОУ и установление местоположения дефекта в случае неправильного функционирования объекта. Одним из основных параметров при проведении указанного анализа является расход бортовых ресурсов при функционировании ОУ. При этом для каждой БС, задействованной на этапе выполнения программы полета, устанавливается допустимый („эталонный“) расход встроенных структурных и функциональных ресурсов системы, массы РТ для электроракетного двигателя (ЭРД) и топлива для жидкостных ракетных двигателей, мощности бортовых источников электроэнергии. Построение синергетических наблюдений на этапе включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Наблюдение за целевыми базовыми процессами (БП) [6]. По результатам текущих и статистических наблюдений формируется общая постановка задачи для проведения синергетических наблюдений за бортовыми процессами на системном уровне. В качестве БП рассматриваются агрегаты системных процессов, предназначенные для исследования основных свойств КА, выявленных при выполнении полетных операций [5]. Для примера выбран сценарий наблюдения за БП „Управление движением центра масс КА“ и „Управление движением относительно центра масс“. В качестве ОУ рассматривается геостационарный спутник связи (ГСС) „Ямал“, в котором основными „движителями“ являются тяговые модули (ТМ). Каждый из тяговых модулей содержит ЭРД в виде стационарного плазменного двига-

теля (СПД) и блок газораспределения, РТ которых является ксенон [7]. В объединенной двигательной установке имеются также реактивные газовые двигатели (ГД), работающие на том же РТ, что и ТМ. Для управления ориентацией ГСС „Ямал“ используются одноступенные силовые гироскопы (СГ) — маховики [8].

Пусть на основе очередных (за квартал) статистических наблюдений за функционированием объединенной двигательной установки было выявлено, что расход РТ при выполнении общего плана полета существенно увеличился (на ~5 %, пример из практики управления) по сравнению с предыдущими квартальными периодами наблюдений. Характерным событием на интервале наблюдения являлась „высокая активность Солнца“. Таким образом, сформирована *постановка задачи*: определить, какие процессы на системном уровне привели к увеличению расхода РТ и связано ли это событие со „вспышкой на Солнце“.

Шаг 2. Наблюдение за системными процессами. Наблюдению подлежат параметры, определяющие физические энергетические воздействия и информационные взаимодействия в системных процессах, объединенных в агрегаты БП.

Решение задачи. Расход РТ в стационарном плазменном и газовом двигателях при формировании тяги напрямую зависит от секундного массового расхода в двигателях и продолжительности их работы. При наблюдении за расходом РТ рассматриваются процессы, протекающие в системе электроракетных двигателей и в объединенной двигательной установке, включающей, кроме блоков ТМ и ГД, систему средств хранения и подачи (СХП) РТ. Для решения задачи при каждом включении i -го ТМ определяется секундный массовый расход \dot{m}_i РТ по электродинамическим параметрам СПД и значению вектора тяги $|\mathbf{F}_i|$ при номинально установленных конструктивных и энергетических характеристических коэффициентах двигателя [9] с использованием следующей формулы:

$$\dot{m}_i = 1,1 |\mathbf{F}_i|^2 / 2\alpha \left[\eta \cos^2 \beta \right] = 1,1 |\mathbf{F}_i|^2 / 2\alpha \left[\eta \cos^2 \beta (U_p - U_k) I_p \right]_i,$$

где α — коэффициент, определяющий степень ионизации атомов ксенона; η — тяговый КПД СПД; $\cos \beta$ — значение осредненного косинуса угла расходимости ионного потока из анодного пространства СПД; U_p — напряжение разряда СПД; U_k — прикатодное падение напряжения; I_p — ток разряда СПД.

Значения U_k , η и $\cos \beta$ определяются при наземных проверочных испытаниях и заносятся в паспортные данные каждого ТМ в зависимости от выработки ресурса по продолжительности работы и числу включений.

Количественный расход РТ определяется за время работы ТМ по секунднему массовому расходу. При этом вектор \mathbf{F}_i является параметром, вычисляемым по данным радиоконтроля орбиты ГСС до и после маневра [10], а электродинамические параметры разрядных напряжений U_p и тока I_p измеряются на борту и телеметрируются в ЦУП.

Таким образом, для указанных наблюдений не требуются дополнительные эксперименты и параметры других смежных систем. Такие наблюдения являются „прямыми“, зависящими от параметров, непосредственно предназначенных для управления процессом маневра ГСС и его контроля, и они не относятся к классу „синергетических наблюдений“.

Расчет расхода РТ проводится также с использованием других выражений математической физики, учитывающих реальное состояние бародинамических параметров газа ксенон в объемах системы СХП до и после маневра [11]:

$$m_{1,2} = \frac{V}{2B(T_{1,2})k_2} \left(\left(1 + \frac{4k_2 B(T_{1,2})P_{1,2}}{k_1 T_{1,2}} \right)^{1/2} - 1 \right),$$

где V — объем емкости, м³; $T_{1,2}$ — температура ксенона в емкости до и после маневра, К; $P_{1,2}$ — давление ксенона в емкости до и после маневра, Па; $B(T_{1,2})$ — второй вириальный коэффициент газа ксенон для температур $T_{1,2}$, м³/моль; $k_1 = R/\mu$; $k_2 = 1/\mu$; μ — молярная масса ксенона; R — газовая постоянная.

По одним и тем же измеряемым параметрам определяется масса ксенона в емкости до маневра (m_1) и после маневра (m_2), осуществляемых на ТМ. Разность этих значений определяет расход. При этом для автоматизированного оценивания в качестве входных операндов используются параметры давления и температуры, измеренные датчиками контроля, установленными в емкости хранения РТ. Таким образом, производится прямое наблюдение за расходом РТ с использованием физических принципов, отличных от применяемых при первоначальных наблюдениях.

Синергия, в одном из определений понимаемая как „сотрудничество“, здесь используется для верификации метода контроля расхода РТ путем сравнения показателей расхода, вычисленных по электродинамическим параметрам СПД и по бародинамическим параметрам газа в расходной емкости. Переход от прямых наблюдений к синергетическим происходит при отказе датчиков контроля. Так, например, при отказе датчиков давления и температуры в расходной емкости системы СХП синергетические наблюдения за расходом РТ из этой системы можно выполнять по электродинамическим параметрам ТМ, данным радиоконтроля орбиты ГСС и данным о продолжительности работы ТМ. При этом используя каскадный и параллельный способы подключения расходных емкостей системы СХП к работающим ТМ с учетом циклограмм их наддува газом, можно контролировать и герметичность емкостей по прямым наблюдениям за параметрами работающих ТМ [7,11].

В случае потери информации при передаче на Землю аналогичным образом можно вести синергетические наблюдения за электродинамическими параметрами ТМ по датчикам давления и температуры, установленным в расходной емкости РТ. При этом определяется секундный массовый расход из объема системы СХП по бародинамическим параметрам ксенона и продолжительности расхода. Далее по регулировочным характеристикам блока автоматики управления ТМ устанавливаются значения разрядного тока и напряжения в СПД по секунднему массовому расходу и номинальному давлению РТ на входе в СПД [7,12]. При отказе самих датчиков разрядного тока и напряжения в указанном блоке управление СПД невозможно, так как не осуществляется автоматическая регулировка газоразрядного процесса в двигателе.

Один из способов определения среднего значения тяги P_d ГД — использование данных разгрузки кинетического момента ΔH_d , накопленного силовым гироскопом: $\Delta H_d : P_d = \Delta H_d / l_d \Delta t$, где l_d — плечо силы тяги ГД, Δt — продолжительность разгрузки [8]. Далее определяются: $\Delta M_{d_j} = (m_2 - m_1)_j$ — расход массы РТ по изменению бародинамических параметров газа в расходном объеме системы СХП в начале и в конце работы каждого j -го ГД; $\dot{m}_{d_j} = \Delta M_{d_j} / \Delta t_j$ — средний секундный массовый расход РТ из магистрали на интервале Δt_j работы ГД; $J_{d_j} = P_{d_j} / \dot{m}_{d_j}$ — средние значения удельного импульса тяги ГД.

При работе ГД ведется одновременное управление движением центра масс и относительно центра масс КА. Изменение параметров движения КА после разгрузки СГ контролируется наземными средствами радиоконтроля орбиты с последующими баллистическими расчетами, позволяющими определить значение силы тяги ГД [10]. Прямые наблюдения за расходом РТ в системе СХП производятся по бародинамическим параметрам ксенона. Если значения удельных импульсов тяги известны на основе паспортных данных каждого двигате-

ля и они верифицированы в процессе полета, то синергетические наблюдения за расходом РТ можно проводить, используя значение тяги и данные о продолжительности работы ГД.

Анализ результатов наблюдений показал, что „активность Солнца“ не привела к изменению удельных импульсов тяги СПД и ГД. Следовательно, повышенный расход РТ не связан с изменением основных рабочих параметров двигателей. При этом было установлено, что к повышенному расходу РТ на контролируемом временном интервале привели более частые включения ГД для разгрузки накопленного СГ кинетического момента.

При поддержании орбитальной ориентации ГСС с использованием системы СГ суммарный вектор кинетического момента спутника $\mathbf{G}(t)$ определяется как сумма векторов кинетических моментов корпуса $\mathbf{K}(t)$ и системы СГ $\mathbf{H}(t)$ [8]:

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{K}(t) + \mathbf{H}(t), \quad \mathbf{G}(t) = \mathbf{G}_0(t) + \int_0^t \mathbf{M}_B(t) dt,$$

где $\mathbf{G}_0(t)$ — начальные значения вектора $\mathbf{G}(t)$; $\mathbf{M}_B = \mathbf{M}_{sd} + \mathbf{M}_{gE} + \mathbf{M}_{gM} + \mathbf{M}_{gS} + \mathbf{M}_{mm}$ — главный вектор внешнего момента; \mathbf{M}_{sd} — момент силы светового давления \mathbf{F}_{sd} ; \mathbf{M}_{gE} , \mathbf{M}_{gS} , \mathbf{M}_{gM} — моменты от гравитационных сил Земли, Солнца и Луны соответственно; $\mathbf{M}_{mm} = \mathbf{L}_{cm} \times \mathbf{V}_E$ — магнитный момент, где \mathbf{L}_{cm} — собственный магнитный момент ГСС, \mathbf{V}_E — вектор индукции магнитного поля Земли.

Вектор кинетического момента корпуса ГСС $\mathbf{K}(t) = \mathbf{I} \cdot \mathbf{W}_{orb}$, где \mathbf{I} — тензор инерции ГСС, \mathbf{W}_{orb} — вектор орбитальной угловой скорости ГСС, который измеряется датчиком угловой скорости и сохраняется постоянным на всех интервалах поддержания орбитальной ориентации. Поэтому при анализе динамики процесса можно рассматривать одну из составляющих вектора $\mathbf{G}(t)$, а именно $\mathbf{H}(t)$. Таким образом, накопление постоянной составляющей кинетического момента в системе СГ [13] происходит под действием вектора \mathbf{M}_B . При этом скорость накопления кинетического момента до предельного значения области располагаемых значений в системе СГ зависит от значений составляющих вектора. Математическое моделирование составляющих вектора \mathbf{M}_B , по известным выражениям [14], позволяет установить наличие магнитного возмущающего момента \mathbf{M}_{mm} за счет появления собственного магнитного момента ГСС \mathbf{L}_{cm} , для определения местоположения которого в спутнике проводились специальные эксперименты по определению несбалансированных токовых контуров на борту ГСС, создающих указанный момент. Предполагалось наличие собственного магнитного момента в солнечной батарее (СБ). Для подтверждения версии был проведен специальный натурный эксперимент на борту спутника [15]. При этом производилась оценка степени накопления кинетического момента в системе СГ путем сравнения его значений на двух полетных интервалах с ориентацией и без ориентации СБ на Солнце. В результате эксперимента подтверждено наличие собственного магнитного момента СБ. После статистической обработки результатов была определена его величина. Тем самым установлено, что увеличение расхода РТ связано с появлением собственного магнитного момента в СБ, который является результатом воздействия на нее протонов и электронов высоких энергий, связанных солнечной активностью. В свою очередь, это приводит к увеличению скорости накопления кинетического момента в СГ и более частым включениям ГД для его разгрузки.

Синергетические наблюдения за расходом РТ на борту были проведены с помощью эксперимента, создающего специальные контролируемые условия наблюдения. Задача, поставленная на *шаге* 1 методики, решена путем наблюдения за процессами на системном

уровне. В случае необходимости более глубокой детализации анализа осуществляются наблюдения за процессами в элементах БС и во внутриэлементных устройствах.

Определение собственного магнитного момента СБ дает возможность осуществлять прогноз изменения суммарного вектора $\mathbf{G}(t)$ ГСС с учетом его взаимодействия с магнитным полем Земли. Это позволяет обеспечить рациональное расходование РТ при выполнении полетной операции путем использования магнитного момента в совокупности с другими моментами внешних сил для управления движением относительно центра масс без разгрузки системы СГ с помощью ГД [16].

Заключение. Учет взаимосвязей, характеризующихся измеряемыми параметрами процессов, позволяет заменять измеряемые параметры одних систем вычисляемыми параметрами на основе измерений в других системах. Недостаточное количество измерительной информации для анализа процессов в БС восполняется наблюдениями в специально созданных контролируемых условиях их функционирования (тестовых проверках БС). При этом учитываются как структурные взаимоотношения между системами, так и энергетические и информационные взаимосвязи между разными физическими процессами на борту КА (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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин В. Н. Морфологический анализ проблематики теории системных исследований // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 1(24). С. 89—107.
2. Кравец В. Г., Любинский В. Е. Основы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
3. Ковтун В. С., Фролов И. В. Методы варибельного анализа и синтеза сложного процесса управления системой электроракетных двигателей космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2016. № 4(15). С. 47—67.
4. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
5. Ковтун В. С. Постановка задачи варибельного управления полетом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 1(94). С. 13—23.
6. Ковтун В. С. Стратификация сложного процесса управления полетом космического аппарата // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 4. С. 78—88.
7. Ганзбург М. Ф., Кропотин С. А., Мурашко В. М., Попов А. Н., Севастьянов Н. Н., Смоленцев А. А., Соколов А. В., Соколов Б. А., Сухов Ю. И. Итоги десятилетней эксплуатации электроракетных двигательных установок в составе телекоммуникационных космических аппаратов „Ямал-200“ на геостационарной орбите // Космическая техника и технологии. 2015. № 4(11). С. 25—39.
8. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 594 с.
9. 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“ // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 59—66.
10. Чернявский Г. М., Бартенев В. А., Малышев В. А. Управление орбитой стационарного спутника. М.: Машиностроение, 1984. 144 с.
11. Калинин Д. А., Ковтун В. С. Определение герметичности системы хранения и подачи газообразного рабочего тела ракетных двигателей в процессе эксплуатации КА // Изв. РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 132—141.

12. Ковтун В. С., Фролов И. В., Ганзбург М. Ф., Пищулин В. А. Обеспечение функционирования электроракетных двигателей в условиях аномального проявления разрядного тока // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 98—111.
13. Пат. 2112713 РФ, С1, МКИ В 64 G 1/24. Способ управления космическим аппаратом с помощью реактивных исполнительных органов при поддержании заданной ориентации / В. С. Ковтун, В. Н. Платонов // Б.И. 1998. № 16.
14. Банит Ю. Р., Беляев М. Ю., Добринская Т. А., Ефимов Н. И., Сазонов В. В., Стажков В. М. Определение тензора инерции международной космической станции по телеметрической информации М., 2002. (Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша РАН; № 57).
15. Пат. 2176972 РФ, С1, МКИ В 64 G 1/24. Способ определения магнитного момента солнечных батарей космического аппарата с системой силовых гироскопов / В. С. Ковтун, Ю. Р. Банит // Б.И. 1998. № 16.
16. Пат. 2196710 РФ, С2, МКИ В 64 G 1/28, 1/44. Способ формирования управляющих моментов на космический аппарат с силовыми гироскопами и поворотными солнечными батареями и система для его осуществления / А. В. Богачев, В. С. Ковтун, В. Н. Платонов // Б.И. 2003. № 2.

Сведения об авторе

Владимир Семёнович Ковтун — канд. техн. наук; РКК „Энергия“ им. С. П. Королёва; главный специалист по системному проектированию; E-mail: kovtun_v11@mail.ru

Поступила в редакцию
02.10.2020 г.

Ссылка для цитирования: Ковтун В. С. Метод проведения синергетических наблюдений за процессами на борту космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 995—1002.

METHOD FOR CONDUCTING SYNERGETIC OBSERVATIONS OF PROCESSES ON BOARD A SPACECRAFT

V. S. Kovtun

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation „Energiya“,
141070, Korolev, Moscow area, Russia
E-mail: kovtun_v11@mail.ru

A method for monitoring the state of onboard systems of spacecraft, based on the basic principles of a synergistic approach to spacecraft flight control, is considered. For synergistic observations of the onboard systems state, the postulate is introduced about the interconnection of all processes occurring on board. On its basis, a search is carried out on board the spacecraft for such physical processes in its main onboard systems, the measured parameters of which allow, taking into account external factors, to assess the parameters of the technical state of adjacent systems, as well as to analyze resources consumption in the main and adjacent systems. As an example, a method is considered for determining the magnitude and localization of the intrinsic magnetic moment of solar batteries based on measurements and calculations of the spacecraft angular velocity and the kinetic moment of power gyroscopes in the motion control system with the account for external disturbing moments.

Keywords: spacecraft, methodology, synergistic observation, system of power gyroscopes, measured information, control object, physical process

REFERENCES

1. Kalinin V. *Informatics and Automation* (SPIIRAS Proceedings), 2013, no. 1(24), pp. 89–107. (in Russ.)
2. Kravets V.G., Lyubinsky V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi polotami* (Fundamentals of Space Flight Control), Moscow, 1983, 224 p. (in Russ.)
3. Kovtun V.S., Frolov I.V. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, no. 4(15), pp. 47–67. (in Russ.)
4. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh ob"yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
5. Kovtun V.S. *Cosmonautics and rocket Engineering*, 2017, no. 1(94), pp. 13–23. (in Russ.)
6. Kovtun V.S. *Cosmonautics and rocket Engineering*, 2012, no. 4, pp. 78–88. (in Russ.)
7. Ganzburg M.F., Kropotin S.A., Murashko V.M., Popov A.N., Sevast'yanov N.N., Smolentsev A.A., Sokolov A.V., Sokolov B.A., Sukhov Yu.I. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 4(11), pp. 25–39. (in Russ.)

8. Raushenbakh B.V., Tokar E.N. *Upravleniye oriyentatsiyey kosmicheskikh apparatov* (Spacecraft Attitude Control), Moscow, 1974, 594 p. (in Russ.)
9. Kovtun V.S., Sevastianov D.N., Fomin L.V., Bedin B.I. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2009, no. 1, pp. 43–49. (in Russ.)
10. Chernyavskiy G.M., Bartenev V.A., Malyshev V.A. *Upravleniye orbitoy statsionarnogo sputnik* (Stationary Satellite Orbit Control), Moscow, 1984, 144 p. (in Russ.)
11. Kalinkin D.A., Kovtun V.S. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2007, no. 3, pp. 132–141.
12. Kovtun V.S., Frolov I.V., Ganzburg M.F., Pishulin V.A. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2016, no. 5, pp. 98–111. (in Russ.)
13. Patent RU 2112713 C1, B 64 G 1/24, *Sposob upravleniya kosmicheskim apparatom s pomoshch'yu reaktivnykh ispolnitel'nykh organov pri podderzhanii zadannoy oriyentatsii* (A method for Controlling a Spacecraft Using Jet Actuators while Maintaining a Given Orientation), Kovtun V.S., Platonov V.N., 1998, Bulletin 16. (in Russ.)
14. Banit Yu.R., Belyaev M.Yu., Dobrinskaya T.A., Efimov N.I., Sazonov V.V., Stazhkov V.M. *Opredeleeniye tenzora inertsi mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii po telemetricheskoy informatsii* (Determination of the Tensor of Inertia of the International Space Station from Telemetric Information), Preprint 57, Moscow, 2002, 31 p. (in Russ.)
15. Patent RU 2176972 C1, B 64 G 1/24, *Sposob opredeleniya magnitnogo momenta solnechnykh batarey kosmicheskogo apparata s sistemoy silovykh giroskopov* (Method for Determining the Magnetic Moment of Solar Batteries of a Spacecraft with a System of Power Gyroscopes), Kovtun V.S., Banit Yu.R., 1998, Bulletin 16. (in Russ.)
16. Patent RU 2196710 C2, B 64 G 1/28, 1/44, *Sposob formirovaniya upravlyayushchikh momentov na kosmicheskoy apparat s silovymi giroskopami i povorotnymi solnechnymi batareyami i sistema dlya yego osushchestvleniya* (Method for Generating Control Torques for a Spacecraft with Power Gyroscopes and Rotary Solar Batteries and a System for its Implementation), Bogachev A.V., Kovtun V.S., Platonov V.N., 2003, Bulletin 2. (in Russ.)

Data on author

Vladimir S. Kovtun

— PhD; S. P. Korolev Rocket and Space Corporation „Energia“; Chief Specialist of System Engineering; E-mail: kovtun_v11@mail.ru

For citation: Kovtun V. S. Method for conducting synergetic observations of processes on board a spacecraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 11. P. 995—1002 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-995-1002