

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

УДК 621.314.5 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.21.30 EDN OQLPUK

**Обеспечение устойчивости функционирования
многоспутниковых космических систем
на основе концепции гомеостаза**

А. Ю. Потюпкин, *д. т. н., проф., potyupkin_in@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Ю. А. Тимофеев, *к. т. н., с. н. с., timofeev_in@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Волков, *к. т. н., с. н. с., volkov_in@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается подход к обеспечению устойчивости функционирования многоспутниковых космических систем на макроуровне — уровне состояний системы с использованием концепции гомеостаза для сохранения баланса между естественными процессами деградации и отказов системы и процессами управления. Предложено понятие коэффициента гомеостаза и вариант его определения в пространстве состояний, позволяющий оценить последствия процессов управления. Приведено имеющее практическое значение условие гомеостаза космической системы.

Ключевые слова: гомеостаз, многоспутниковая орбитальная группировка, управление, состояние системы

**Ensuring the Functioning Stability
of Multi-Satellite Space Systems
Based on the Homeostasis Concept**

A. Yu. Potyupkin, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., potyupkin_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Yu. A. Timofeev, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, timofeev_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

S. A. Volkov, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, volkov_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper studies an approach to ensuring the stability of the functioning of multi-satellite space systems at the macro-level — the system states level using the concept of homeostasis as maintaining a balance between the natural processes of degradation and system failures and control processes. The definition of the homeostasis coefficient and a variant of its calculation in the state space, which allows assessing the consequences of control processes, are proposed. The condition of the space system homeostasis, which has practical significance, is given.

Keywords: homeostasis, multi-satellite orbital constellation, control, system state

Введение

Тенденция усложнения космических комплексов очевидна: наряду с изменением отдельных КА, изменяются и орбитальные группировки, появляются многоспутниковые системы, насчитывающие сотни и тысячи КА [1–4]. В связи с этим специалистам наземного ЦУП приходится иметь дело не только с отдельными КА, но и с групповыми объектами управления, представляющими собой дистанционно управляемые многоагентные роботизированные космические комплексы различного назначения. Такие комплексы обладают многофункциональностью, определенной свободой выбора вариантов поведения, основанной на использовании бортовых комплексов управления с элементами искусственного интеллекта, что позволяет отнести их к категории сложных систем, требующих особых подходов к реализации процессов управления, в частности реализации методов группового управления, ввиду особой значимости их последствий.

Космическая система как любая сложная система предназначена для реализации комплексного функционала, включающего ряд составляющих. Например, она должна обеспечивать непрерывный мониторинг заданной области пространства, включающий обнаружение объектов, их идентификацию, пространственную локализацию, а в ряде случаев и информационное взаимодействие с объектом. Особенностью сложных систем является то, что для них почти во всех случаях не существует общепринятого понятия отказа, так как внутренние изменения в структуре системы из-за отказов отдельных элементов приводят, как правило, лишь к некоторому ухудшению качества функционирования, а не к полному нарушению ее функционирования [5]. Это объясняется тем, что в сложных системах с избыточной структурой имеется полное или частичное резервирование отдельных функций, есть различные обратные связи, средства коррекции ошибок и т. д., следовательно, отказ сложной системы — это понижение эффективности системы ниже заданного уровня, которое может рассматриваться как нарушение устойчивости функционирования системы, например снижение доступности сигналов в КНС ГЛОНАСС.

Традиционно причины нарушения устойчивости рассматривались как имеющие естественную природу вследствие процессов деградации и старения элементов, воздействия факторов внешней среды, но в настоящее время резко возрастает роль и причин искусственного происхождения, возникающих в ходе реализации внешних управленческих воздействий на систему. Статистики в области космических систем, иллюстрирующей этот тезис, не обнародовано, но известно, что их вероятность не столь мала, как хотелось бы. В качестве аргумента можно привести данные по авариям на воздушном транспорте, где более 50% аварий вызвано человеческим фактором [6]. При этом парк воздушных судов может служить неким аналогом управляемой многоагентной системы, из чего следует, что переход к управлению многоспутниковыми орбитальными группировками, в которой реализуется групповое взаимодействие между КА, отнюдь не устраняет эту проблему, а наоборот, еще более актуализирует ее.

Общая постановка задачи

Всякая космическая система включает в себя орбитальную группировку, состоящую из множества КА, реализующих спектр функций, и прямых или опосредованных связей между ними. При этом вся система находится в одном из возможных состояний, а система управления обладает определенными ресурсами для реализации процесса управления и приведения системы в нужное состояние. Такие системы по праву относятся к категории систем сложных, поэтому их исследование целесообразно вести с использованием положений и терминологии теории сложных систем.

При управлении сложными системами нужно найти разумный компромисс между естественными процессами деградации системы и процессами управления, направленными как на компенсацию этих процессов, так и, главное, на реализацию целевых задач. Важно, чтобы процессы управления не привели к «заорганизованности» системы и позволили сохранить требуемое число степеней свободы — вариантов поведения системы, позволяющих реализовать заданный функционал. Другими сло-

вами, нужно обеспечить баланс между процессами упорядоченности и неупорядоченности системы, ибо излишняя опека также чревата негативными последствиями для системы, как и ее чрезмерная свобода.

В теории сложных систем этот баланс принято рассматривать как гомеостаз системы, под которым понимается системная адаптация ко всему спектру факторов воздействия с целью установления динамического равновесия и сохранения целостности системы с учетом ресурсных факторов. Понятие гомеостаза не очень активно используется в инженерной практике, но в связи с усложнением технических систем, приближением по сложности к системам биологическим ситуация начинает меняться [7].

Гомеостаз позволяет сохранить баланс между различными противоречивыми процессами деградации (в терминах теории систем ее *энтропии* — как *меры беспорядка и хаоса в системе, определяемой числом ее возможных степеней свободы, вариантов поведения или возможных состояний*) и упорядоченности (т. н. *негэнтропии* — как *меры упорядоченности*), происходящими в системе, и тем самым обеспечить ее живучесть. При этом известно, что энтропия системы, в первую очередь изолированной, с течением времени нарастает и этот рост связан с естественными процессами деградации и старения, свойственными любой технической системе — т. н. «энтропийный принцип». Негэнтропия системы, в свою очередь, увеличивается искусственно за счет реализации процессов управления.

Будем считать, что если система находится в состоянии гомеостаза, то заданный выходной эффект реализуется с требуемым качеством, отклонение же от состояния гомеостаза как в сторону нарастания энтропии, так и негэнтропии приводит к ухудшению качества выходного эффекта. Введем понятие коэффициента гомеостаза $\Theta = НЭ/Э$ как отношения текущей негэнтропии (НЭ) к энтропии (Э). При этом $\Theta < 1$ указывает, что в системе преобладают энтропийные процессы, связанные с возможностью реализации дополнительных степеней свободы, в том числе и возникновения вследствие отказов нештатных ситуаций, или состояний (НШС). В случае $\Theta > 1$ в системе высокая степень упорядоченности ее функционирования, что, с одной стороны, является положительным фактором,

но, с другой стороны, может привести к заорганизованности системы. Исходя из этого, примем, что каждая система, в зависимости от своего предназначения и особенностей функционирования, обладает некоторым номинальным значением коэффициента гомеостаза $\Theta^{ном}$, обеспечивающим гомеостаз системы как баланс процессов энтропии и негэнтропии.

Так как любая система создается для реализации некоторого целевого функционала, характеризующегося одним или несколькими показателями $\{\Omega\}$, то устойчивость системы, в том числе и коэффициент гомеостаза, будет оказывать влияние на $\{\Omega\}$. При этом зависимость общесистемных показателей от коэффициента гомеостаза $\Omega = F(\Theta)$ может принимать различный характер (см. рис. 1). Учитывая, что отклонение коэффициента гомеостаза от номинального значения $\Theta^{ном}$ как в сторону увеличения степени Э, так и в сторону упорядоченности — нарастания НЭ одинаково негативно сказывается на реализации целевого функционала, рассматриваемые зависимости будут симметричными функциями относительно Θ , хотя возможны варианты и несимметричных функций. На рис. 1 варианты различаются требованиями по максимизации или минимизации целевого функционала, а также видом зависимости $\Omega = F(\Theta)$ — нелинейной и линейной. На практике ее определение требует проведения дополнительных исследований.

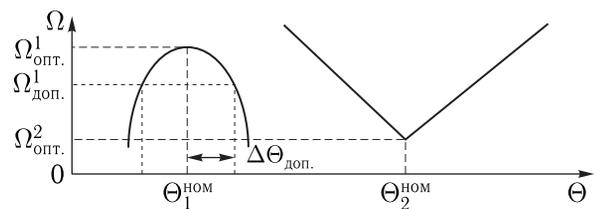


Рис. 1. Варианты зависимости общесистемных показателей от коэффициента гомеостаза

Пусть, например, левая часть рис. 1 характеризует доступность системы, а правая — ее стоимость. Тогда нарастание энтропии системы и, следовательно, $\Theta_1 < \Theta_1^{ном}$, вследствие отказов ее элементов, приведет к снижению доступности предоставляемых сервисов. В другом же случае излишняя заорганизованность системы приведет к $\Theta_2 > \Theta_2^{ном}$ и к возрастанию стоимости системы.

Очевидно, что в процессе функционирования системы будут происходить изменения значений Θ и НЭ системы, что приведет к отклонению текущего значения $\Theta(t)$ от $\Theta^{\text{НОМ}}$, нарушению устойчивости функционирования и, соответственно, изменению целевых показателей системы. Задачей управления системой будет восстановление гомеостаза и приведения $\Delta\Theta(t) = |\Theta^{\text{НОМ}} - \Theta(t)|$ к допустимым значениям. Тогда целевые показатели системы $\Omega(t)$ будут соответствовать области требуемых значений $\Omega(t) = F(\Theta(t)) \subset \{\Omega_{\text{треб.}}\}$.

В общем случае модель гомеостаза сложной системы будет выглядеть следующим образом: *ЕСЛИ в процессе функционирования сохраняется баланс между процессами энтропии и негэнтропии, ТО система находится в состоянии гомеостаза и реализует целевую функцию с заданным качеством.*

В формализованном виде модель можно представить как

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } \Delta\Theta(t) = |\Theta^{\text{НОМ}} - \Theta(t)| \leq \Delta\Theta_{\text{доп.}}, \\ \text{ТО } \Omega(t) \subset \{\Omega_{\text{треб.}}\}. \end{aligned}$$

Реализация предлагаемого подхода ставит вопрос о содержании управляемых параметров для достижения гомеостаза. Представляется, что конкретное их определение возможно после исследования природы и расчета значений Θ и НЭ. При этом будем рассматривать гомеостаз системы на макроуровне — не отдельных параметров, а состояний всей системы.

Понятие энтропии достаточно хорошо исследовано в теоретических приложениях. Известно и выражение для подсчета энтропии как мера Хартли $\Theta = \log_2 N$, где N — число степеней свободы или вариантов поведения системы [8]. Что же касается вопросов негэнтропии, то говорить об устоявшемся понимании этого понятия несколько преждевременно, однако есть общепринятое понимание, что негэнтропия — мера порядка в системе, т. е. устраненная неопределенность для достижения цели. Она связана с процессами планомерных целенаправленных действий со стороны управляющей системы. В ряде работ количественно оценивают негэнтропию как меру упорядоченности системы — отличие текущего распределения состояний

от максимальной энтропии (хаоса), т. е. равномерного распределения всех возможных состояний [9].

Тогда $\text{НЭ} = \Theta_{\text{макс.}} - \Theta_{\text{тек.}}$, где $\Theta_{\text{тек.}}$ — текущая энтропия или с учетом реализации управления $\text{НЭ} = \Theta_{\text{макс.}} - \Theta_{\text{упр.}}$, где $\Theta_{\text{упр.}}$ — энтропия системы после реализации управляющего воздействия. При этом $\Theta_{\text{упр.}} = F(U, C, t)$, где C — ресурс системы (временной, стоимостной, материальный), t — текущее время. $U \in \{u_i\}$ — множество управлений на каждом уровне иерархии.

Традиционно влияние управления рассматривалось только с положительной стороны. Однако для многоспутниковых КС одновременно реализуется множество не всегда безошибочных управленческих воздействий, что может привести и к негативным последствиям для всей системы. Предположим, что система имеет N возможных состояний, тогда размерность пространства состояний $\dim S = N$. Нарастание Θ порождает новые состояния, т. е. $\dim S > N$, и если НЭ изначально направлена на их парирование с уменьшения размерности $\dim S$, то чрезмерное увеличение НЭ может привести к возникновению уже других состояний, связанных с искусственно порожденными ограничениями на функционирование. Таким образом, НЭ больше допустимой порождает новые состояния, приводящие к нарушениям функционирования системы и тем самым опять-таки увеличивающие размерность множества состояний S : $\dim S > N$.

Тогда гомеостаз системы будет заключаться в том, что, несмотря на естественные процессы возрастания энтропии (отказы, старение, конфликты и т. д.), негэнтропийные процессы с учетом возможностей системы управления и имеющихся ресурсов позволяют, с одной стороны, парировать энтропийные процессы — возникновение НШС состояний, а с другой стороны — не порождают искусственных ограничений на функционирование и возникновение дополнительных негэнтропийных состояний.

Пусть изначально система могла находиться в штатных (предусмотренных) состояниях системы размерностью $N_{\text{шс}}$. По мере функционирования появляется ряд состояний, вызванных нарастанием энтропии системы — $n_{\text{ншс}}^{\Theta}$, которые отнесем к категории НШС — непредусмотренных состояний. Реализация процесса управления U приводит к уменьшению числа $n_{\text{ншс}}^{\Theta}$ за счет парирования части со-

стояний $n_U^{HЭ}$ системы, но возможно и появление новых $m_U^{HЭ}$ состояний, вызванных «заорганизацией» системы (аналог перерегулирования). Будем рассматривать такие состояния, как «состояния ограниченного функционирования (СОФ)», когда система не реализует свой потенциал в силу искусственно накладываемых ограничений, вызванных реализацией процесса управления (например, ошибок персонала, планирования, ограничений по энергопотреблению, расходу рабочего тела и т. д.).

Тогда общее число состояний на данный момент времени можно представить как

$$N(t) = N_{шс} + n_{шс}^э(t) - n_U^{HЭ}(t) + m_U^{HЭ}(t).$$

В этом случае условия баланса между Э и НЭ будут заключаться в том, что, несмотря на возрастание Э, процессы управления позволят парировать энтропийные процессы $[n_{шс}^э(t) - n_U^{HЭ}(t)]$ и не порождают искусственных ограничений в виде $m_U^{HЭ}(t)$.

Пример. Пусть энтропия системы рассчитывается как мера Хартли $\mathcal{E} = \log_2 N$ (рис. 2). Изначально задано множество возможных состояний многоспутниковой КС размерностью $N_{шс} = 3$ и, следовательно, начальная $\mathcal{E}_н = 1,58$ бит.

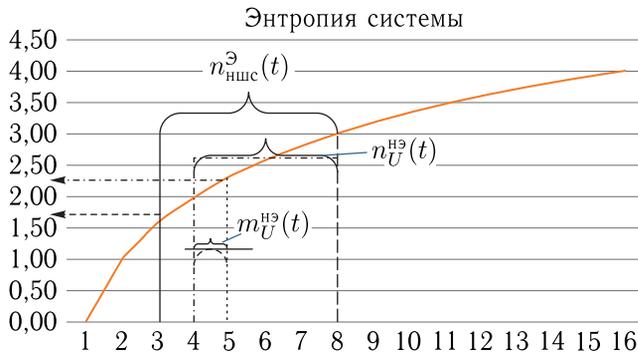


Рис. 2. Динамика изменения энтропии системы

В процессе функционирования вследствие отказов и деградации элементов комплекса порождаются энтропийные состояния $n_{шс}^э(t) = 5$, часть из которых парируется управляющими воздействиями специалистов ЦУП — $n_U^{HЭ}(t) = 4$, но, в свою очередь, управляющие воздействия порождают ряд дополнительных СОФ размерностью $m_U^{HЭ}(t) = 1$.

Таким образом, общее число состояний комплекса

$$N(t) = 3 + 5 - 4 + 1 = 5$$

и после реализации управления конечная энтропия $\mathcal{E}_к = 2,32$ бит $>$ $\mathcal{E}_н = 1,58$ бит. В данном случае итоговая неопределенность системы возросла, следовательно, управление не достигло своей цели в полном объеме, условие баланса не выполнено, КС неустойчива и ее эффективность ниже требуемого уровня.

Каким же образом можно количественно определить коэффициент гомеостаза как условие баланса? Учитывая, что $\Theta = НЭ/Э$ и $\Theta > 1$ определяет преобладание НЭ, а $\Theta < 1$ преобладание Э, можно предложить следующий показатель:

$$\Theta 1 = [n_U^{HЭ}(t) + m_U^{HЭ}(t)]/n_{шс}^э(t) = n_U^{HЭ}(t)/n_{шс}^э + m_U^{HЭ}(t)/n_{шс}^э = \Theta_{пар.} + \Theta_{заорг.},$$

где $\Theta_{пар.}$ — коэффициент парирования возникновения НШС в результате управления U ; $\Theta_{заорг.}$ — коэффициент заорганизованности системы в случае возникновения СОФ в результате управления U .

Условием гомеостаза в данном случае считается

$$\Theta_{пар.} = 1 \text{ при } \Theta_{заорг.} = 0.$$

Возможен и другой вариант определения коэффициента гомеостаза:

$$\Theta 2 = [n_U^{HЭ}(t) - m_U^{HЭ}(t)]/n_{шс}^э(t) = (n_U^{HЭ}(t)/n_{шс}^э) - (m_U^{HЭ}(t)/n_{шс}^э) = \Theta_{пар.} - \Theta_{заорг.}.$$

Условие гомеостаза в данном случае также выглядит как

$$\Theta_{пар.} = 1 \text{ при } \Theta_{заорг.} = 0.$$

Проанализируем оба варианта с целью определения корректности определения коэффициента. Пусть $n_{шс}^э = 5$, $n_U^{HЭ}(t)$ и $m_U^{HЭ}(t)$ меняются от 0 до 5. Результаты анализа корректности задания $\Theta 1$ и $\Theta 2$ представлены в табл. 1, 2.

Как видно из табл. 1, условия $\Theta 1 = 1$ выполняются для целого ряда ситуаций, из которых только одна является на самом деле ситуацией гомеостаза (выделена кружком) — когда все возникшие НШС парируются системой управления и не порождаются других СОФ. Следовательно, форма представления коэффициента гомеостаза в виде $\Theta 1$ является некорректной (порождает множество решений). Вместе с тем такое представление дает понимание о влияющих факторах — выше оси единиц преобладают условия СОФ, ниже — НШС.

Таблица 1. $n_U^{HЭ}(t)/m_U^{HЭ}(t)$

	0	1	2	3	4	5
0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
3	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
4	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
5	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2

Таблица 2. $n_U^{HЭ}(t)/m_U^{HЭ}(t)$

	0	1	2	3	4	5
0	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
1	0,2	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8
2	0,4	0,2	0	-0,2	-0,4	-0,6
3	0,6	0,4	0,2	0	-0,2	-0,4
4	0,8	0,6	0,4	0,2	0	-0,2
5	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0

В случае задания коэффициента в виде $\Theta 2$ условие $\Theta 2 = 1$ выражено явно в единственном случае, при всех $\Theta 2 < 1$ гомеостаза нет. При этом если $\Theta 2 > 0$, то $\Theta_{\text{пар.}} > \Theta_{\text{заорг.}}$ и управление направлено в первую очередь на парирование НШС $n_U^{HЭ}(t) > m_U^{HЭ}(t)$, если же $\Theta 2 < 0$, то $\Theta_{\text{пар.}} < \Theta_{\text{заорг.}}$ и управление избыточно, так как оно порождает новые СОФ $n_U^{HЭ}(t) < m_U^{HЭ}(t)$.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о целесообразности использования показателя $\Theta 2$ как более корректного и наглядного, так как он в большей степени соответствует природе исследуемого процесса гомеостаза.

В практике эксплуатации КС и отдельных КА на сегодняшний день присутствует состояния функционирования с ограничениями (СФО), однако не принято указывать причину ограничений — естественные ли это процессы — энтропийные — или же процессы искусственные, вызванные управлением как целенаправленным обменом информацией с объектом управления (ОУ) для реализации

целей управления. Поэтому в дальнейшем будем разделять состояния ОУ исходя из вызвавших их причин. Введем следующие состояния ОУ:

0. Состояние правильного функционирования — СПФ.

1. СФО вследствие проявления естественных (энтропийных) процессов деградации систем ОУ–СФО^Э.

2. СФО вследствие проявления искусственных (нэгэнтропийных) процессов воздействия на системы ОУ–СФО^{НЭ}.

3. Состояние неправильного функционирования вследствие проявления естественных (энтропийных) процессов деградации систем ОУ, приводящих к появлению отказов — СНПФ^Э.

4. Состояние неправильного функционирования вследствие проявления искусственных (нэгэнтропийных) процессов воздействия на системы ОУ, приводящих к появлению отказов, — СФО^{НЭ}.

При этом каждое из i -х, $i = 0, \dots, 4$, состояний будет характеризоваться соответствующей вероятностью этого состояния P_i .

Учитывая то, что для сложных систем почти во всех случаях не существует общепринятого понятия отказа, то состояния 3, 4 целесообразно рассматривать как маловероятные ($P_3, P_4 \rightarrow 0$) и связанные с форс-мажорными исключительными влияниями негативных факторов на ОУ. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только состояния СПФ, СФО^Э и СФО^{НЭ} с соответствующими вероятностями P_0, P_1, P_2 .

Анализ таких систем удобно проводить с использованием модели перехода состояний А. Н. Колмогорова [10]. В этом случае требуется, помимо вероятностей состояний, ввести интенсивности переходов между состояниями как интенсивности отказов и восстановлений.

Пусть $\lambda_{01}^Э$ — интенсивность отказов и перехода состояний СПФ \rightarrow СФО^Э вследствие естественных энтропийных процессов (см. индекс Э);

$\lambda_{02}^{HЭ}$ — интенсивность отказов и перехода состояний СПФ \rightarrow СФО^{НЭ} вследствие реализации процессов управления (см. индекс НЭ);

$\lambda_{21}^{HЭ}$ — интенсивность перехода состояний СФО^{НЭ} \rightarrow СФО^Э вследствие естественных энтропийных процессов;

$\mu_{10}^{HЭ}$ — интенсивность восстановления и перехода состояний СФО^Э → СПФ вследствие реализации процессов управления;

$\mu_{20}^{HЭ}$ — интенсивность восстановления и перехода состояний СФО^{НЭ} → СПФ вследствие реализации процессов управления;

$\mu_{12}^{HЭ}$ — интенсивность перехода состояний СФО^Э → СФО^{НЭ} вследствие реализации процессов управления.

Тогда общая схема переходов будет выглядеть следующим образом (рис. 3).

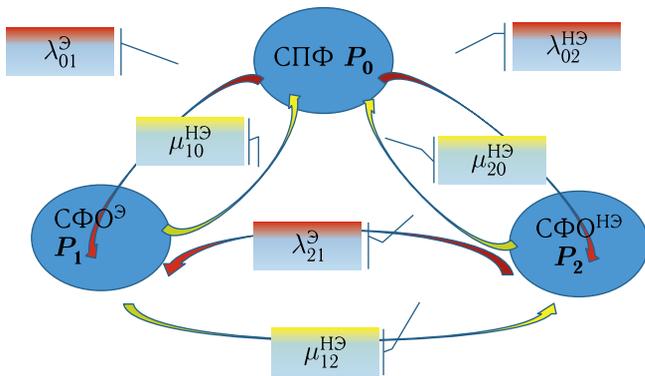


Рис. 3. Общая схема переходов состояний

В этом случае система дифференциальных уравнений переходов состояний будет представлена в следующем виде (интенсивности, исходящие из состояния, учитываются со знаком «-», входящие — со знаком «+»)

$$\begin{cases} dP_0/dt = -(\lambda_{01}^Э + \lambda_{02}^{HЭ})P_0 + \mu_{10}^{HЭ}P_1 + \mu_{20}^{HЭ}P_2, \\ dP_1/dt = -(\mu_{10}^{HЭ} + \mu_{12}^{HЭ})P_1 + \lambda_{01}^ЭP_0 + \lambda_{21}^ЭP_2, \\ dP_2/dt = -(\mu_{20}^{HЭ} + \lambda_{21}^Э)P_2 + \lambda_{02}^{HЭ}P_0 + \mu_{12}^{HЭ}P_1. \end{cases}$$

На практике, как правило, вместо решения системы дифференциальных уравнений ограничиваются рассмотрением т.н. финальных вероятностей, то есть вероятностей установления в системе предельного стационарного режима, в котором система случайным образом меняет свои состояния, но их вероятности уже не зависят от времени. Такие вероятности можно трактовать как относительное время пребывания системы в данном состоянии. Тогда $P_i = \text{const}$, $dP_i/dt = 0$ и приведенная выше система дифференциальных уравнений преобразуется в систему линейных уравнений

следующего вида:

$$\begin{cases} (\lambda_{01}^Э + \lambda_{02}^{HЭ})P_0 = \mu_{10}^{HЭ}P_1 + \mu_{20}^{HЭ}P_2, \\ (\mu_{10}^{HЭ} + \mu_{12}^{HЭ})P_1 = \lambda_{01}^ЭP_0 + \lambda_{21}^ЭP_2, \\ (\mu_{20}^{HЭ} + \lambda_{21}^Э)P_2 = \lambda_{02}^{HЭ}P_0 + \mu_{12}^{HЭ}P_1, \end{cases}$$

откуда

$$\begin{cases} P_0 = (\mu_{10}^{HЭ}P_1 + \mu_{20}^{HЭ}P_2)/(\lambda_{01}^Э + \lambda_{02}^{HЭ}), \\ P_1 = (\lambda_{01}^ЭP_0 + \lambda_{21}^ЭP_2)/(\mu_{10}^{HЭ} + \mu_{12}^{HЭ}), \\ P_2 = (\lambda_{02}^{HЭ}P_0 + \mu_{12}^{HЭ}P_1)/(\mu_{20}^{HЭ} + \lambda_{21}^Э). \end{cases}$$

Будем рассматривать гомеостаз системы как состояние правильного функционирования — СПФ, тогда условие гомеостаза $P_0 = 1$ и, следовательно, должны выполняться равенства

$$\begin{aligned} \mu_{10}^{HЭ}P_1 + \mu_{20}^{HЭ}P_2 &= \lambda_{01}^Э + \lambda_{02}^{HЭ}, \\ \lambda_{01}^Э &= \mu_{10}^{HЭ}P_1 + \mu_{20}^{HЭ}P_2 - \lambda_{02}^{HЭ}. \end{aligned} \quad (*)$$

Последнее выражение (*) подчеркивает то обстоятельство, что есть события естественные, происходящие вследствие объективных энтропийных процессов деградации системы, и есть события, вызванные искусственно, вследствие реализации процессов внесения нэгэнтропии, т.е. управления системой, имеющие, наряду с положительным эффектом парирования энтропийных процессов — ее восстановления, и отрицательные стороны, связанные с ошибками управления, несоответствием управляющих воздействий реальному состоянию управляемой системы.

Тогда если известны интенсивности отказов системы вследствие энтропийных процессов $\lambda_{01}^Э$ и интенсивность ошибок управления $\lambda_{02}^{HЭ}$ как результат обработки накопленной статистики в виде

$\lambda_{01}^Э = N_{\text{отк.}}/T$, где $N_{\text{отк.}}$ — число отказов за интервал наблюдения T ,

$\lambda_{02}^{HЭ} = N_{\text{ош.}}/T$, где $N_{\text{ош.}}$ — число ошибок управления за интервал наблюдения T , и известны вероятности нахождения системы в состояниях СФО^Э и СФО^{НЭ} — P_1 и P_2 как относительное время нахождения системы в данном состоянии

$$P_1 = T_{\text{СФО}^Э}^Э/T \text{ и } P_2 = T_{\text{СФО}^НЭ}^HЭ/T,$$

то задача контура управления обеспечить интенсивности восстановления $\mu_{10}^{HЭ}$ и $\mu_{20}^{HЭ}$ таким образом, чтобы выполнялось условие (*).

На практике условие $P_0 = 1$ невыполнимо, поэтому задают определенные требования $P_0 \geq P_{\text{треб.}}$. Тогда условие гомеостаза (*) будет выглядеть следующим образом:

$$\lambda_{01}^{\ominus} P_{\text{треб.}} = \mu_{10}^{\text{НЭ}} P_1 + \mu_{20}^{\text{НЭ}} P_2 - \lambda_{02}^{\text{НЭ}} P_{\text{треб.}}$$

Следует учитывать, что всякий процесс управления характеризуется расходом ресурсов системы управления, следовательно, все интенсивности с индексом НЭ являются функциями ресурса системы R . Тогда

$$\mu_{10}^{\text{НЭ}} = \mu_{10}^{\text{НЭ}}(R), \quad \mu_{20}^{\text{НЭ}} = \mu_{20}^{\text{НЭ}}(R), \quad \lambda_{02}^{\text{НЭ}} = \lambda_{02}^{\text{НЭ}}(R).$$

Природа ресурса определяется спецификой объекта управления и системы управления. Например, для КС в понятие ресурс может входить количество сеансов управления, запаса электроэнергии и рабочего тела на отдельных КА, стоимость сеансов управления, возможность проведения сеансов. Примем, что указанные интенсивности являются возрастающими функциями от потребляемого ресурса, в простейшем случае линейными (рис. 4). Такое тривиальное представление позволяет отразить тот факт, что ограничения на выделенный ресурс, например невозможность проведения сеансов управления, приведут к ограничениям на интенсивности восстановления системы и тем самым — к невыполнению условия гомеостаза.

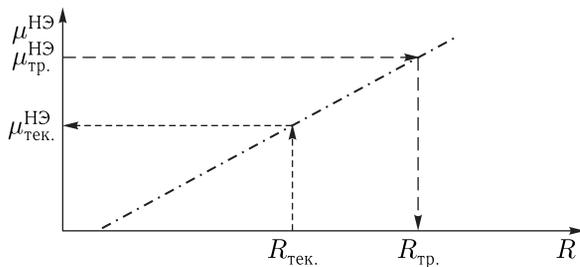


Рис. 4. Зависимость интенсивностей восстановления от выделяемого ресурса

Как видно из рисунка, в случае ограничений на имеющиеся ресурсы $R_{\text{тек.}} < R_{\text{тр.}}$ ограничивается и интенсивность восстановления $\mu_{\text{тек.}}^{\text{НЭ}} < \mu_{\text{тр.}}^{\text{НЭ}}$, следовательно, условие гомеостаза (*) не выполняется.

Следует учитывать, что общий ресурс системы распределяется по соответствующим интенсивностям:

$$R = R_{10}^{\mu} + R_{20}^{\mu} + R_{02}^{\lambda}.$$

Поэтому требуется определенный баланс в расходе ресурсов с учетом того, что R_{02}^{λ} определяется случайным процессом совершения ошибок управления персоналом.

Пример. Пусть ресурс системы N — это количество сеансов управления КС, которые приводят систему в состояние СПФ с учетом имеющегося запаса электроэнергии и рабочего тела на отдельных КА и других факторов. Тогда

$$\mu_{10}^{\text{НЭ}} = \mu_{10}^{\text{НЭ}}(N_{10}), \quad \mu_{20}^{\text{НЭ}} = \mu_{20}^{\text{НЭ}}(N_{20}), \\ \lambda_{02}^{\text{НЭ}} = \lambda_{02}^{\text{НЭ}}(N_{02}), \quad N = N_{10} + N_{20} + N_{02} - N_{\cap},$$

где N_{\cap} — число сеансов, в которых возможно пересечение событий — система может войти в разные состояния в течение одного сеанса.

При реализации процессов управления важно обеспечить требуемое значение N_{10} и, соответственно, $\mu_{10}^{\text{НЭ}}$, но если система управления сама «создает проблемы» и происходит «заорганизованность» объекта управления, т.е. возрастание N_{20} и N_{02} и, следовательно, увеличение

$$\mu_{20}^{\text{НЭ}} = \mu_{20}^{\text{НЭ}}(N_{20}), \quad \lambda_{02}^{\text{НЭ}} = \lambda_{02}^{\text{НЭ}}(N_{02}),$$

то ресурсов на парирование естественных процессов деградации ОУ уже может не хватить и не будет реализован процесс восстановления системы после отказов.

Если исходить из того, что в уравнении гомеостаза

$$\lambda_{01}^{\ominus} = \mu_{10}^{\text{НЭ}} P_1 + \mu_{20}^{\text{НЭ}} P_2 - \lambda_{02}^{\text{НЭ}} \quad (*)$$

вся правая часть определяется ресурсом R , то в условиях недостатка ресурса требуется обеспечить снижение интенсивности λ_{01}^{\ominus} . Но эта интенсивность отражает естественные процессы деградации, происходящие в системе. Следовательно, нужно снизить число ограничений и требований, накладываемых на систему, без потери функционала системы. Этот процесс определяется предметной областью, но можно выделить общие инвариантные составляющие, справедливые для различных систем, например количество элементов K , связей между ними M , функций системы Q и т.д. В этом случае интенсивность отказов λ_{01}^{\ominus} будет композицией интенсивностей $\lambda_{\text{эл.}}^{\ominus}$, $\lambda_{\text{св.}}^{\ominus}$, $\lambda_{\text{фк.}}^{\ominus}$, а общая

вероятность безотказной работы всей системы на интервале времени t в простейшем случае будет определяться как

$$\begin{aligned} P_{\text{бр}}(t) &= P_{\text{эл.}}(t)P_{\text{св.}}(t)P_{\text{фк.}}(t) = \\ &= e^{-\left(\frac{\lambda_{\text{эл.}}}{t}\right)^K} e^{-\left(\frac{\lambda_{\text{св.}}}{t}\right)^M} e^{-\left(\frac{\lambda_{\text{фк.}}}{t}\right)^Q} = \\ &= e^{-\left[\left(\frac{\lambda_{\text{эл.}}}{t}\right)^K + \left(\frac{\lambda_{\text{св.}}}{t}\right)^M + \left(\frac{\lambda_{\text{фк.}}}{t}\right)^Q\right]}. \end{aligned}$$

Вывод с одной стороны очевиден: чем проще система — чем меньше элементов K , связей между ними M , чем надежнее ее элементы, чем меньше функций Q она выполняет, тем выше вероятность безотказной работы, но в реальности структура системы определяется ее функциональным назначением. Следовательно, разумным шагом представляется уменьшение числа возможных требований к системе, невыполнение которых может быть классифицировано как отказ.

Например, в области создания и эксплуатации КС возможны следующие варианты: например, отказ от жесткой баллистической структуры, «свободная» орбитальная позиция КА, стохастический вывод КА на орбиту, отказ от резервирования части подсистем, перенос функций управления на борт КА, увеличение периодичности проведения сеансов связи, использование элементной базы с менее строгими требованиями по надежности — коммерческой электроники, использование «наземных» решений для отработки и проведения испытаний из опыта автомобильной и электронной промышленности и т. д.

Но вместе с тем задача сохранения целевого функционала системы предполагает компенсационные меры следующего вида: создание избыточности КА на орбите, своевременное восполнение системы в случае отказа элементов, управление системой со «свободной» баллистической структурой, разработка методов управления общесистемными ресурсами — решение задач назначения и выбора и ряд других мер.

Таким образом, «гомеостатические методы допускают возрастание степеней свободы отдельных КА в системе, отказ от “жесткого” индивидуального контроля и управления их состоянием, но одновременно предполагают создание избыточности ресур-

сов на орбите для обеспечения решения целевой задачи, в том числе по количеству КА, с реализацией методов управления ресурсами всей системы» [7].

Заключение

В настоящей статье рассмотрен подход к реализации способов обеспечения устойчивости функционирования многоспутниковых космических систем на макроуровне — уровне состояний системы с использованием концепции гомеостаза как сохранения баланса между естественными процессами деградации и отказов системы и процессами управления, упорядочивающими ее функционирование, но, свою очередь, способными понизить качество ее функционирования за счет наложения дополнительных ограничений.

Предложено понятие коэффициента гомеостаза и вариант его определения в пространстве состояний, позволяющий оценить последствия процессов управления. Приведено имеющее практическое значение условие гомеостаза космической системы. Предлагаемый подход при условии дальнейшего развития может быть реализован в системах управления многоагентными роботизированными космическими комплексами в перспективных многоспутниковых космических системах.

Его практическая реализация предполагает проведение исследований в следующих направлениях:

1) установление зависимостей между целевыми характеристиками КС, например доступности для КНС и систем связи, производительности для систем ДЗЗ, и параметрами ее элементов: орбитальных систем, их численностью, типом и высотой орбит; целевой аппаратуры КА — шириной диаграммы направленности или полосы захвата; параметрами наземных комплексов приема целевой информации и управления — их производительностью и пропускной способностью и т. д.;

2) выявление критичных параметров, в наибольшей степени влияющих на выходные характеристики КС;

3) определение мер, снижающих указанное влияние и позволяющих снизить требования к элементам КС с учетом сохранения функционала и ограничений на ресурсы системы.

Результаты исследований позволят сформулировать практические рекомендации по обеспечению устойчивости функционирования как для уже существующих, так и для вновь разрабатываемых космических систем.

Список литературы

1. Starlink. <https://www.starlink.com> (Дата обращения 09.12.2022).
2. Planet. <https://www.planet.com/why-planet> (Дата обращения 09.12.2022).
3. OneWeb. <https://oneweb.net> (Дата обращения 09.12.2022).
4. *Афанасьев И.* «Сфера» общих интересов. Космические информационные технологии как драйвер развития страны // *Русский космос*, 2020, № 10. С. 8–19. <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/russianspace/rk2020-08-single.pdf> (Дата обращения 18.12.2020).
5. *Нечипоренко В. И.* Структурный анализ систем. М.: Советское радио, 1977. 216 с.
6. *Артемов А. Д., Лысаков Н. Д., Лысакова Е. Н.* Человеческий фактор в эксплуатации авиационной техники. М: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. 156 с.
7. *Потюпкин А. Ю., Волков С. А., Пантелеймонов И. Н., Тимофеев Ю. А.* Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2020, т. 7, вып. 3. С. 61–70.
8. *Потюпкин А. Ю., Чечкин А. В.* Искусственный интеллект на базе информационно-системной избыточности. М: КУРС, 2019. 382 с.
9. *Прангишвили И. В.* Системный подход и общесистемные закономерности. М: СИНТЕГ, 2000. 521 с.
10. *Сигорский В. П.* Математический аппарат инженера. Техника, 1977. 768 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.12.2022
Дата принятия рукописи
в печать 01.02.2023