

# Инновационный методический подход к моделированию и оцениванию эффективности космических систем



**В. А. Дрещинский,**  
*д. в. н., профессор,*  
**НИИ Военно-системных исследований МТО ВС РФ**  
*madresh@yandex.ru*



**В. Н. Кузьмин,**  
*д. в. н., профессор,*  
**ВКА им. А.Ф. Можайского,**  
*kuzmindvn@yandex.ru*



**А. В. Чарушников,**  
*д. в. н., доцент,*  
**ВКА им. А.Ф. Можайского**  
*avchar@yandex.ru*

*В статье изложена концепция структурной математической модели функционирования сложной космической системы, включая ракетно-космический комплекс, наземный комплекс управления, орбитальную систему космических аппаратов, комплекс приема и обработки информации.*

**Ключевые слова:** космические системы, эффективность применения, структурная математическая модель, схемы моделирования.

Современные технологии изменяются стремительно. То, что еще вчера казалось фантастикой, сегодня становится обыденным, а завтра сменится еще более радикальными научно-техническими проектами. Мы обязаны научиться создавать сложные и наукоемкие технические системы с учетом перспектив завтрашнего дня.

Одной из таких перспектив, определенных в Перечне критических технологий Российской Федерации (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899), является создание новых поколений ракетно-космических систем.

Сегодня достаточно четко прослеживается тенденция: кто станет лидером в области создания и внедрения инновационных космических систем, тот будет фаворитом в экономической и военной сферах в течение многих десятилетий.

В современных условиях рынок конечной продукции космической отрасли существенно изменился и в ряде его сегментов наблюдается жесткая ценовая конкуренция, особенно в сегменте выведения на орбиту полезных нагрузок. Мировая конкурентоспособность отечественной космической отрасли зависит от постоянного притока нововведений. Это вызвало активное развитие не только базовых, но и прикладных направлений космической деятельности:

- рост потребностей в организации персональных и мобильных каналов связи и вещания, включая

телевидение высокой четкости при росте массовости этих услуг;

- рост спроса на доступ к информации в реальном масштабе времени (космическая навигация, прогнозы погоды и т. п.);
- снижение стоимости доступа к космическим данным, информации и услугам, обеспечиваемое, как техническими инновациями, так и соответствующими правовыми режимами и конкуренцией на рынке;
- рост потребностей в научных и наблюдательных данных в государственных интересах для обеспечения, например, мониторинга изменений климата и погоды;
- рост требований к управлению природными ресурсами и все более выраженный акцент на вопросах безопасности населения;
- растущие потребности в сокращении негативных последствий стихийных бедствий и др.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость повышения результативности внедрения и использования инноваций в космической отрасли. Но разработка и испытание принципиально новых космических комплексов и их элементов требует крупных инвестиций, при достаточно больших сроках окупаемости проектов и высоких технологических и коммерческих рисках. В этой связи естественным направлением снижения затрат на исследования и разра-

ботки является развитие методологии моделирования космических систем и оценивания эффективности их функционирования.

Процесс функционирования космической системы включает операции трех видов [1, 2]:

- построение орбитальной системы космических аппаратов (КА);
  - управления баллистической структурой орбитальной системы КА;
  - выполнение целевых задач орбитальной системой КА.
1. Построение орбитальной системы КА состоит в выведении КА на орбиты, близкие к расчетным, с последующей коррекцией орбит. Необходимость коррекции орбит возникает из-за погрешностей выведения КА ракетами-носителями, а также из-за эволюции баллистической структуры орбитальной системы КА под воздействием внешних возмущений, обусловленных нецентральностью поля притяжения Земли, притяжением Луны и Солнца, влиянием атмосферы.
  2. Управление баллистической структурой орбитальной системы КА состоит в восполнении ее новыми КА и коррекции орбит существующих КА с требуемой точностью. Необходимость восполнения орбитальной системы КА возникает при отказах бортовой аппаратуры или израсходовании рабочего тела системы ориентации или корректирующей двигательной установки, вследствие чего КА перестает выполнять свои задачи.
  3. Выполнение целевых задач состоит в применении бортовой специальной аппаратуры КА с учетом ее характеристик, характеристик баллистической структуры орбитальной системы и условий внешней среды для получения необходимого эффекта операции.

Эффективность — комплексное свойство целенаправленного процесса применения космической системы, характеризующее степень его (процесса) приспособленности к решению целевых задач (к достижению цели ее применения). В дальнейшем будем употреблять понятие эффективность системы, имея в виду эффективность процесса ее применения для достижения определенной цели.

На современном этапе развития теории эффективности сложных систем сформировалось несколько подходов [3, 4] к оцениванию качества и эффективности систем и, соответственно, несколько взглядов на соотношение указанных категорий. В данном исследовании основной упор делается на наиболее гибкий подход, который предполагает введение системы показателей качества космической системы и дальнейший переход к исследованию различных аспектов эффективности ее применения.

При исследованиях эффективности космической системы выделяются три основных ее аспекта: функционально-целевой, технико-эксплуатационный и экономический (ресурсный).

Функционально-целевой аспект рассматривает эффективность системы как совокупность ее целевых свойств, отражающих степень соответствия системы своему назначению по характеру и полноте выполне-

ния возложенных на нее задач. В результате исследования целевой функционально-целевой эффективности может быть определена целесообразность применения системы для решения определенного круга задач.

Технико-эксплуатационный аспект исследования эффективности системы связан с оценкой ее технико-эксплуатационных свойств, определяющих качество ее функционирования на заданном интервале времени и в определенных условиях окружающей среды. С помощью исследования технико-эксплуатационной эффективности можно определить, на каком уровне качества система способна выполнить возложенные на нее задачи.

Экономический (ресурсный) аспект исследования эффективности предполагает оценку потребительской стоимости, реализуемой в процессе разработки и функционирования системы. Он связан с определением прибыли, получаемой в результате применения системы, с оценкой рентабельности системы. Следует заметить, что экономический аспект исследования эффективности космических систем военного назначения является специфическим с точки зрения рентабельности их применения, хотя и может способствовать экономии средств при их разработке и эксплуатации.

Таким образом, эффективность системы есть обобщенная характеристика совокупности ее функциональных, технико-эксплуатационных и экономических свойств, отображающая полноту и качество выполнения поставленных перед системой задач в заданных условиях ее применения, а также затраты, связанные с реализацией системой возложенных на нее функций.

Для оценивания эффективности космической системы целевого назначения вводится система показателей качества:

- функционально-целевые;
- эксплуатационно-технические;
- экономические (ресурсные).

При выборе конкретных показателей качества учитывается, что они должны [5]:

- обеспечивать оценку выполнения соответствующего требования, предъявляемого к системе;
  - быть чувствительным к анализируемым вариантам системы, в частности, к параметрам компонент системы;
  - быть достаточно простым и наглядным, иметь ясный физический смысл, чтобы у лица принимающего решения не возникло затруднений при интерпретации результатов моделирования.
- В качестве значений показателей качества могут выступать:
- детерминированные величины при детерминированной постановке задачи;
  - математические ожидания и дисперсии соответствующих величин при стохастической постановке задачи.

Обобщенный показатель эффективности в общем случае представляется набором функционалов, являющихся различными показателями качества, вычисленными для определенных условий функционирования космической системы. С этой точки зрения космическая система обладает требуемыми свойствами тогда и

только тогда, когда значения выбранных показателей качества находятся в заданных пределах.

Основываясь на данном подходе оценивание целевой эффективности применения космической системы предполагается проводить в два этапа [3, 4]:

- определение состава показателей качества операции и результата операции и требований к ним (области допустимых значений);
- вычисление показателя эффективности применения системы (вероятности достижения цели операции системы).

Основным средством исследования свойств космической системы является математическое моделирование. Известно, что математическая модель представляет собой знаковую систему, намеренно упрощенно воспроизводящую интересующие исследователя свойства и поведение объекта исследования. Как и всякая система, она состоит из взаимосвязанных компонент и имеет определенную структуру.

Естественно рассматривать космическую систему, как крупномасштабную сложную систему [5], поскольку в силу ее свойств и характера возникающих при исследовании задач, необходимо учитывать большое количество взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, обеспечивающих выполнение целевых задач. Особенности процесса функционирования космической системы и число анализируемых в ней факторов и связей таковы, что возникает необходимость использования иерархического подхода [5], при котором общая задача исследования космической системы декомпозируется на ряд частных подзадач различного уровня, связанных друг с другом функционально по входным и выходным параметрам.

На основе содержательного анализа типовой структуры космической системы определены структура и состав обобщенной математической модели космической системы, представленные на рис. 1.

Математическая модель космической системы имеет многоуровневую иерархическую структуру. На верхнем уровне иерархии находятся агрегированные модели расчета показателей качества и эффективности всей системы в целом. На нижних уровнях находятся параметры, характеризующие отдельные компоненты системы, ее операции и внешнюю среду. Причем, параметры, используемые для расчета различных показателей, в свою очередь, можно подразделить:



Рис. 1. Структура и состав компонент модели космической системы

- на функционально независимые, выступающие в качестве исходных данных для моделирования;
- функционально зависимые от значений других параметров, связанные с ними определенными аналитическими или алгоритмическими соотношениями.

В зависимости от целевого назначения космической системы, а также класса задач исследования компоненты обобщенной математической модели конкретизируются в двух направлениях:

- по составу входных параметров;
- по составу выходных параметров (показателей).

Математическая модель космической системы должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- максимально возможная простота;
- обеспечение необходимой представительности, т.е. способности модели отображать существенные для данной задачи свойства системы.

В качестве методологической основы моделирования космической системы целесообразно применять системный подход, который в контексте решаемой задачи будет выражаться следующим образом:

1. В основе построения модели находится цель системы, заданная в виде совокупности требований к показателям качества.

2. Решаются совместно три взаимосвязанные задачи:

- разграничение исследуемого объекта (системы) и внешней среды;
- выбор расчетной структуры и определяющих параметров объекта исследования;
- выбор расчетной структуры и определяющих параметров его внешней среды.

При определении объектов моделирования целесообразно руководствоваться следующими положениями:

- к определяющим параметрам системы и внешней среды должны быть отнесены только те, которые оказывают существенное влияние на выполнение требований к системе;
- в состав объекта моделирования должны войти те компоненты системы и внешней среды, параметры которых признаны определяющими;
- определяющие параметры объекта моделирования должны обеспечивать выполнение требований к системе за счет выбора значений этих параметров при управлении в процессе функционирования системы;
- если требования к системе не могут быть выполнены выбором определяющих параметров объекта моделирования, то должны быть изменены состав и структура объекта моделирования за счет изменения состава компонент (или состава параметров компонент), или включения в состав объекта исследования части компонентов системы, отнесенных ранее к его внешней среде.

По своей структуре и возможностям модели комплекса должны удовлетворять следующим требованиям:

- все модели должны функционировать на базе единой системы исходных данных (параметров),

выделенных на этапе построения концептуальной модели системы;

- каждая модель должна обладать свойствами простоты, безизбыточности и адекватности;
- в рамках комплекса должна обеспечиваться возможность сопряжения отдельных моделей различного уровня по своим входным и выходным параметрам в иерархической схеме их взаимодействия;
- комплекс моделей должен иметь оптимизированную структурно-функциональную схему, в которой частные модели могут использоваться различными моделями более высокого уровня иерархии.

С точки зрения исследования целевой эффективности космической системы наибольший интерес представляют вопросы, связанные с оцениванием показателей качества и эффективности наиболее важной ее компоненты — орбитальной системы КА. На основе описанной выше методологии разработки комплекса математических моделей космических систем определенного целевого назначения были разработаны структура и состав обобщенной модели функционирования орбитальной системы КА, представленной на рис. 2.

Обобщенная модель функционирования орбитальной системы КА предназначена для системных исследований динамики функционирования системы КА, оснащенных комплексом специальной бортовой аппаратуры, на основе установления зависимости показателей системы КА от параметров:

- баллистической структуры орбитальной системы КА;
- отдельных КА, входящих в систему;
- бортовой специальной аппаратуры (БСА) КА;
- бортовой обеспечивающей аппаратуры (БОА) КА;
- наземной системы приема информации;
- условий внешней среды.

Модели VI-III уровня иерархии могут быть аналитическими, связывающими значения входных параметров и показателя функциональными уравнениями, или алгоритмическими, устанавливающими алгоритмическую связь между значениями входных параметров и показателем. Модели I-II уровней иерархии носят преимущественно аналитико-имитационный характер и позволяют на основании проведения се-

УРОВНИ



Рис. 2. Структура и состав компонент обобщенной модели функционирования орбитальной системы КА

рий имитационных испытаний и статистической обработки их результатов получать зависимости между детерминированными и стохастическими параметрами компонент системы и внешней среды и показателями, характеризующими целевую эффективность или качество всей системы.

Данное семейство зависимостей определяется выражением:

$$Y_i = F(X_j),$$

$$X_j \subseteq X,$$

$$Y_i \in Y,$$

где  $X_j$  — множество регулируемых параметров компонент модели функционирования орбитальной системы, варьируемых при расчете значения показателя  $Y_i$ ;  $X$  — множество параметров компонент модели функционирования орбитальной системы;  $Y_i$  — оцениваемый показатель качества (эффективности) функционирования орбитальной системы;  $Y$  — множество показателей качества (эффективности) функционирования орбитальной системы.

В аналитико-имитационной модели функционирования орбитальной системы возможны следующие принципы изменения исходных данных [4, 5].

1. При моделировании процессов по классической схеме Монте-Карло реализации отличаются друг от друга лишь набором случайных величин, задающих те или иные возмущения при функционировании исследуемой системы. При этом регулируемые параметры  $X_j \subseteq X$  остаются неизменными. Изменение исходных данных производится лишь при переходе от одного варианта к другому в соответствии с планом имитационного эксперимента.

При моделировании по схеме Монте-Карло по результатам  $N$  реализаций определяются математические ожидания  $M_N[Y_i]$ , дисперсии  $D_N[Y_i]$  и законы распределения  $F_N(Y_i)$  анализируемых величин  $Y_i \in Y$ .

2. При моделировании по схеме рандомизации исходных данных каждая реализация отличается друг от друга как набором случайных величин, так и значениями вектора исходных данных  $X_j \subseteq X$ , каждое из которых в заданном диапазоне изменения выбирается по закону равномерной плотности. При использовании в ходе моделирования принципа рандомизации исходных данных строятся также уравнения регрессии  $Y_i = f(X_j)$  для показателей  $Y_i \in Y$  в зависимости от исследуемых параметров  $X_j \subseteq X$ .

Обобщенная модель функционирования орбитальной системы требует значительных вычислительных ресурсов при реализации на ЭВМ. Поэтому степень ее применения в ходе исследований должна быть обусловлена практической необходимостью и целесообразностью. В частности, объем необходимых вычислений, проводимых в имитационном эксперименте, зависит от следующих факторов [5]:

- числа реализаций (имитационных испытаний), которое в свою очередь определяется требуемой точностью получаемых оценок исследуемых показателей;

- числа варьируемых (исследуемых) параметров системы и среды;
- диапазона значений варьируемых параметров и шага их изменения.

Таким образом, в целях оптимизации временных характеристик имитационных экспериментов необходимо обоснованно выбирать:

- уровень требований по точности получаемых оценок показателей;
- размерность подмножества варьируемых (исследуемых) параметров системы и среды.

Кроме того, исходя из особенностей задачи исследования, может оказаться целесообразным переход от обобщенной модели функционирования орбитальной системы к частным моделям функционирования ее компонент.

Многokrратно моделируя процесс функционирования орбитальной системы и изменяя при этом в заданном диапазоне исходные данные, по выходным параметрам модели представляется возможным решить следующие задачи исследования орбитальной системы [2]:

- оценить влияние на выходной эффект системы  $Y_i = F(X^*)$  подмножества параметров  $X^* \subset X$ ;
- выбрать рациональные значения тех или иных параметров орбитальной системы  $X^* \subset X$  при фиксированных значениях остальных параметров;
- выбрать значения параметров  $X^* \subset X$ , при которых обеспечивалось бы значение выходного эффекта  $Y_i = F(X^*)$  не менее заданного  $F^*$ .

Таким образом, в общем виде всю совокупность задач, связанных с моделированием динамики функционирования орбитальных систем КА, можно разделить на следующие группы [2].

1. Прямые задачи (задачи анализа):

- получение априорной оценки эффективности функционирования орбитальной системы с заданными параметрами;
- нахождение зависимости показателей эффективности функционирования орбитальной системы от определенного параметра (группы параметров) при фиксации значений остальных параметров, и оценка степени влияния значений этих параметров на величину исследуемого показателя;
- нахождение зависимости показателей качества или эффективности функционирования орбитальной системы от затрат на реализацию определенного параметра (группы параметров) при фиксированных значениях остальных параметров и оценка степени влияния значений этих затрат на величину исследуемого показателя.

2. Обратная задача (задача синтеза): поиск таких комбинаций значений параметров компонент орбитальной системы, при которых достигалось бы максимальное значение показателя эффективности при условии принадлежности значений показателей качества заданным диапазонам значений (заданным требованиям).

Таким образом, в ходе моделирования процесса функционирования орбитальной системы можно

получать количественно-качественные оценки различных характеристик (показателей) для научного обоснования требований, оценки эффективности системы и качества функционирования отдельных ее компонент.

Результаты многовариантного моделирования по предлагаемой схеме дают основания выдвинуть ряд общих предположений по направлениям совершенствования космических комплексов.

Во-первых, фаза улучшающих инноваций для отечественных комплексов, разработанных в конце прошлого века, далеко не исчерпана. Это касается как элементов комплекса, приобретающих новую потребительскую направленность, так и надежности базовых технологических комплектующих ракетно-космических и орбитальных комплексов.

Во-вторых, основным направлением улучшающих инноваций и создания принципиально новых космических комплексов, по нашему мнению, должно стать существенное снижение стоимости вывода в космос полезных нагрузок. Это повысит коммерциализацию отрасли космических услуг и послужит решению проблемы реструктуризации инвестиций, в том числе, на инновационные разработки.

В-третьих, намечается тенденция изменения характеристик спутниковых систем, создание КА с возможностями автономного управления на принципах самопозиционирования, самооценки и автоматической коррекции, а также формирование кластера микро- и наноспутников с возможностями маневрирования и изменяемыми орбитами.

В-четвертых, создание космических систем многоразового использования на базе воздушно-космического самолета.

*Список использованных источников*

1. А. Г. Гончар, А. П. Ковалев, А. П. Поляков. Ракетно-космический комплекс как объект эксплуатации. СПб: ВИККА, 1997.
2. А. А. Лебедев, О. П. Нестеренко. Космические системы наблюдения: синтез и моделирование. М.: Машиностроение, 1991.
3. Г. Б. Петухов, В. И. Якунин. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006.
4. Технология системного моделирования/Под ред. А. А. Вавилова. Л.: 1982.
5. В. В. Калашников. Организация моделирования сложных систем. М.: Знание, 1982.

**Innovative methodological approach to modelling and evaluating effectiveness of the space system**

**V. A. Dreshchinsky**, doctor of science, professor, Scientific research Institute of military system studies.

**V. N. Kuzmin**, doctor of science, professor, Military space academy.

**A. V. Charushnikov**, doctor of science, associate professor, Military space academy.

The article describes the concept of structural mathematical models of the complex space systems functioning, including space-rocket complex, ground control complex, orbital spacecraft system, complex of reception and processing of information.

**Keywords:** space systems, the effectiveness, the structural mathematical model, circuit simulation.