

УДК: 004;621.398;681.5

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНФИГУРАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2015 М.Е. Кременецкая, А.А. Шкромато, Г.А. Абрамов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 06.04.2015

Представлена концепция модульной архитектуры системы предварительного анализа конфигурации космического аппарата дистанционного зондирования Земли, базирующаяся на логике анализа конфигурации во взаимосвязи с технологией проектирования.

Ключевые слова: космический аппарат, анализ конфигурации, проектирование, система, поддержка принятия решений, модульная структура.

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание и развитие космических аппаратов (КА) и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является в настоящее время одним из важнейших направлений применения космической техники для социально-экономических и научных целей [1]. Повышение технического уровня КА и сокращение затрат на их проектирование и эксплуатацию обеспечивается за счет применения как новых конструкционных материалов, так и методов проектирования, а также путем наращивания функциональности бортовых систем за счет применения современных компьютерных средств и технологий.

Особенностью проектирования КА ДЗЗ можно считать отсутствие обобщенных системных зависимостей и простых математических моделей, устанавливающих связь между ограниченным набором исходных данных, проектными параметрами, а также характеристиками КА и параметрами функционирования его систем.

Недостаточно исследованным является не только вопрос о логике и технологии автоматизированного проектирования КА, но и практически отсутствуют теоретические работы, связанные с выбором параметров и логикой процесса проектирования на этапе предэскизных (предконкурсных) разработок [2].

В то же время именно этот предварительный этап для разработчика является ключевым, поскольку именно на нем он анализирует свои возможности и рассматривает варианты решения поставленных заказчиком задач (рис. 1).

Кременецкая Марина Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: mte82@mail.ru
Шкромато Антон Алексеевич, аспирант института авиационной техники. E-mail: shkromado@mail.ru
Абрамов Глеб Александрович, студент института авиационной техники. E-mail: belg.ru@mail.ru

На предконкурсном этапе формируется базовая концепция проекта, проводится оценка технологической готовности предприятия, определяется объем заимствованных типовых решений и объем НИОКР, в том числе по смежным организациям, рассчитывается срок проектирования и т.д. Именно от качества и оперативности работ, проведенных на данном этапе, зависит заключение контракта и, как следствие, получение прибыли.

Для заказчика же особая роль данного этапа заключается в оценке степени удовлетворения требований, а также получаемых при этом преференций, как то сокращение сроков проектирования или же достижение каких-либо технических преимуществ.

Работы по формированию конфигурации КА и предварительным расчетам систем ведутся параллельно специалистами различных подразделений предприятия. Часть решений по конфигурированию КА принимаются только на основе знаний и опыта, накопленных конструкторами и проектантами, и не поддаются формализации. В совокупности с возможностью выбора основных проектных параметров изделия (как существующих, так и предположительно достигаемых в результате НИОКР) это приводит к формированию некоторого количества альтернативных вариантов конфигурации КА.

Получаемые конфигурации КА по мере уточнения информации и в процессе конкурентной борьбы за контракт подвергаются многоуровневому итерационному оптимизационному процессу. Задача разработчика на данном этапе заключается в определении за короткое время оптимальной конфигурации КА, отвечающей требованиям заказчика и соответствующей современному развитию ракетно-космической техники с учетом технологических возможностей предприятия.



Рис. 1. Перечень работ на предконкурсном этапе создания КА ДЗЗ

В силу необходимости учета большого количества зависимостей в виде уравнений с многочисленными параметрами, слабой формализованности алгоритмов действий, необходимости учета большого числа взаимосвязанных факторов и быстро меняющихся требований к проектируемому объекту, а также большого числа альтернативных вариантов решений в зависимости от выбранных целевых критериев, единственным практически возможным средством достижения данной цели является соединение возможностей вычислительной техники с неформальными аналитическими алгоритмами, опытом и интуицией человека – лица принимающего решения. Наиболее тесное взаимодействие достигается в рамках систем поддержки принятия решений (СППР).

В связи с отсутствием практических разработок в данной области [2] и недостаточности теоретических наработок, актуальной задачей является разработка концепции системы предварительного анализа конфигурации КА ДЗЗ.

Предварительно необходимо определить логику анализа конфигурации и технологию проектирования КА ДЗЗ.

2. ЛОГИКА АНАЛИЗА КОНФИГУРАЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КА ДЗЗ

Исходя из своего целевого назначения, структура КА ДЗЗ может быть определена как типовой набор элементов несущей конструкции (платформы) и модулей бортовых систем, каждый из которых обладает определенным множеством

характеристик. Иными словами, в процессе проектирования на предэскизном этапе происходит «наполнение» типовой структуры КА составными элементами, каждый из которых оказывает влияние на итоговые конструкционные и эксплуатационные параметры КА. Параметры данных элементов известны или из данных конструкторской документации либо определяются (или корректируются) статистически на основании опыта эксплуатации как диапазон вероятных значений.

Поскольку проектирование должно осуществляться в строгом соответствии с требованиями заказчика и нормативной документации, именно они формируют первоначальный набор исходных данных, являющихся также ограничениями на характеристики первичной конфигурации при ее анализе. Для этого исходные данные должны быть формализованы и представлены в виде множества числовых или логических значений.

Для формирования первичной конфигурации КА достаточно выделить наиболее важные параметры из общего перечня требований заказчика: максимальная масса не более установленной, срок активного существования, разрешение на местности (линейное, угловое), ширина полосы обзора, ширина полосы захвата, точность привязки снимка к геодезическим координатам Земли, частотный диапазон работы системы оптико-электронного наблюдения и системы высокоскоростной радиопередачи, количество снимаемых сцен зоны интереса за сутки, максимальная дальность радиовидимости, скорость передачи

данных с КА на наземную станцию, средства выведения КА на орбиту, минимальная стоимость проекта при полном выполнении поставленных требований.

Первичная конфигурация КА определяет саму возможность существования конфигурации, удовлетворяющей требованиям заказчика, т.е. начальным ограничениям – множеству исходных данных тактико-технического задания (ТТЗ), поэтому назовем ее «конфигурация существования». По сути, она дает понять – можно ли решить поставленную заказчиком задачу с учетом имеющегося опыта и уровня технического обеспечения проекта.

Процесс поиска «конфигурации существования» является итерационным, и логично определить, какие из требований являются наиболее трудно выполнимыми, и ранжировать их с учетом приоритета. Относительно трудно выполнимые ограничения могут быть рассмотрены с точки зрения определяющих их подсистем КА ДЗЗ и возможного проведения НИОКР с учетом целесообразности затрат с целью перевода ограничений в разряд выполнимых. Ранжирование приоритетов ограничений целесообразно выполнять исходя из целевого использования КА ДЗЗ в полуавтоматическом режиме, когда преобладающие статистически ограничения, определяющие весь дальнейший проект (например, масса КА) получают наивысший приоритет, а менее критичные ограничения при определении приоритета могут потребовать вмешательства лица принимающего решения (ЛПР), как правило, генерального конструктора.

Таким образом, «конфигурация существования», формируемая на основе решения системы уравнений со статистическими коэффициентами, устанавливает взаимосвязь между исходными данными (ограничениями), содержащимися в требованиях ТТЗ и характеризующими конструкцию и характеристики бортовых систем КА, и проектными параметрами первого приближения анализируемой конфигурации. Модель является упрощенной, так как анализ выполняется только по ограниченному числу проектных параметров, определяемых с учетом только основных действующих факторов. При анализе «конфигурации существования» ключевым является ее первичная проверка с точки зрения массы КА ДЗЗ и расчета параметров его орбитального движения.

Количество полученных конфигураций существования сильно зависит как от количества условий, так и их строгости (степени определенности информации, т.е. интервалов изменения статистических коэффициентов). Стоит рассмотреть и ситуацию, когда не будет получено ни одной конфигурации (в этом случае необходимо вернуться к анализу количества и строгости условий и пересмотреть их или же проводить анализ

с точки зрения НИОКР). Однако в любом случае, полученные конфигурации являются ориентировочными в силу того, что используются преимущественно статистические коэффициенты уравнений, а сами уравнения описывают лишь часть взаимосвязей по основным проектным параметрам и значительная часть данных не определена.

Полученные «конфигурации существования» нуждаются в дальнейшем уточнении. Поэтому на втором этапе предварительного анализа конфигурации по определенным на первом этапе параметрам (их интервалам) происходит вычисление (уточнение) коэффициентов уравнений, ранее задаваемых статистически, а также расчет производных от них параметров второго приближения с последующей итерационной проверкой на удовлетворение множеству ограничений ТТЗ.

Сущность проверки в общем виде заключается в сравнении уточненных коэффициентов с ограничениями ТТЗ по формуле:

$$\left| \frac{k_i - k_{i+1}}{k_i} \right| \leq p_k, \quad (1)$$

где k_i – текущее значение коэффициента проектного параметра, k_{i+1} – следующее значение проектного параметра из определенного множества, p_k – допустимое отклонение (несогласованность параметров). В силу взаимного влияния элементов конфигурации возможна коллизия, когда уточненные проектные параметры вступают в противоречие с начальными ограничениями. Если хотя бы по одному из них выявляется несоответствие, определяется элемент (подсистема), имеющий наибольшее влияние (максимальный коэффициент связи $R_k \rightarrow \max$) на данный параметр при наименьшем влиянии на другие элементы ($R_k \rightarrow \min$) и итерационно выполняется его «замена» с последующим пересчетом параметров до тех пор, пока не будет найдена конфигурация, удовлетворяющая требованиям. Если таковой найдено не будет, то анализу подвергается следующая конфигурация существования. Если же все альтернативные варианты конфигураций существования исчерпаны, и решения не найдено, то происходит возврат на первую стадию определения конфигураций существования с целью коррекции начальных ограничений или проведения НИОКР для достижения требуемых параметров элемента, позволяющих удовлетворить условию, не выполняющемуся ранее.

Отобранные по условию удовлетворения требованиям ТТЗ конфигурации на втором этапе уже могут быть использованы для решения задач заказчика и содержат описание конструкции (массово-геометрическую сводку) и перечень оборудования бортовых систем с конкретными параметрами, проверенные с учетом моделирования орбитального движения аппарата. Эти

конфигурации являются базовыми и могут быть подвергнуты дальнейшему варьированию проектных параметров с целью поиска оптимальной конфигурации с точки зрения экстремального значения выбранного критерия оптимизации при условии удовлетворения ограничениям ТТЗ:

$$\tilde{W} = \max_{\{x_j\}} W \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

где \tilde{W} – экстремальное значение критерия оптимальности, W – критерий оптимальности как функционал от проектных параметров, x_j – набор проектных параметров, подлежащих оптимизации.

В качестве критерия оптимальности могут быть использованы минимальная масса, максимальный срок активного существования КА, энергоэффективность и другие.

Определение составных элементов конфигурации КА ДЗЗ и ее анализа возможно одним из известных способов многокритериального анализа, например, последовательных приближений, случайного поиска, градиентного спуска, минимизации по Парето, методу упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением (TOPSIS) и т.д. [2, 3, 4, 5].

По завершении каждого цикла оптимизации при внесении изменений в проектные параметры, связанные с выбранным критерием оптимизации, выполняется коррекция массогабаритных показателей и моделирование орбитального движения КА. На основании результатов моделирования рассчитываются рабочие параметры бортовых систем и сравниваются с начальными ограничениями ТТЗ. Если требования выполняются, конфигурация считается рабочей и выполняется попытка дальнейшей максимизации критерия оптимальности. Если же требования не выполняются, производится откат текущей конфигурации к последней рабочей, и она признается окончательной по данному оптимизационному критерию.

Описанная выше логика анализа конфигурации космического аппарата может быть описана нижеследующим алгоритмом (рис. 2).

3. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНФИГУРАЦИИ КА

Концептуальная структура системы предварительного анализа конфигурации представлена на рис. 3. Рассмотрим основные компоненты и их функции.

Система управления базой данных (БД). Поскольку конфигурация КА в большинстве случаев представляет собой типовой набор элементов, БД является хранилищем типовых ранее использованных конфигураций и характеристик элементов конструкции, систем и подсистем разных производителей, имеющих в настоящий

момент на рынке. Естественно, что в процессе формирования конфигурации предпочтение отдается «своим» с точки зрения проектировщика элементам.

Характеристики каждого элемента (например, солнечных батарей) берутся из его конструкторской и рабочей документации или предварительно рассчитываются и хранятся в БД в объеме, достаточном для последующего расчета основных проектных параметров КА. Кроме того, в БД же хранится информация о совместимости элементов между собой (размеры модулей, используемые интерфейсные сигналы и др.), что позволяет выполнять компоновку КА.

Данные в БД нуждаются в постоянном обновлении, поскольку именно они определяют информационную мощность системы – количество возможных альтернативных вариантов конфигураций. Если в ходе проектирования выполняются НИОКР, то данные о разработанных опытных образцах также заносятся в БД.

Промежуточные и итоговые результаты – сформированные конфигурации – сохраняются также в БД.

Управление БД осуществляется одноименной системой (СУБД). Это гарантирует непротиворечивость данных, позволяет осуществлять групповое проектирование, отслеживать моменты изменения конфигурации и регулировать права доступа к данным системы предварительного анализа конфигурации. Кроме того, архитектура на основе СУБД позволяет организовать систему и как локальную, и как сетевую, в том числе с удаленным доступом.

Модуль формирования конфигурации и оптимизации является двухуровневым трехкомпонентным. В основе работы модуля лежат методы многокритериального анализа и оптимизации, некоторые из которых были упомянуты выше. Более подробно этот вопрос рассматривается в [5].

Функцией модуля является заполнение слотов типовой (исходя из цели использования проектируемого КА) конфигурации элементами, извлекаемыми из БД под управлением СУБД, с помощью алгоритмов поиска. В подмодуле формирования конфигурации существования используется упрощенный поисковый алгоритм с минимизированным числом проектных параметров. Данный подмодуль работает в паре с подмодулем расчета проектных параметров первого приближения. Подмодуль формирования базовой конфигурации использует полный поисковый алгоритм и уточненные коэффициенты уравнений и работает в паре с подмодулем расчета проектных параметров второго приближения.

Подмодуль оптимизации в отличие от подмодулей формирования конфигураций работает с единственной конфигурацией из предварительно полученных базовых, отобранной по

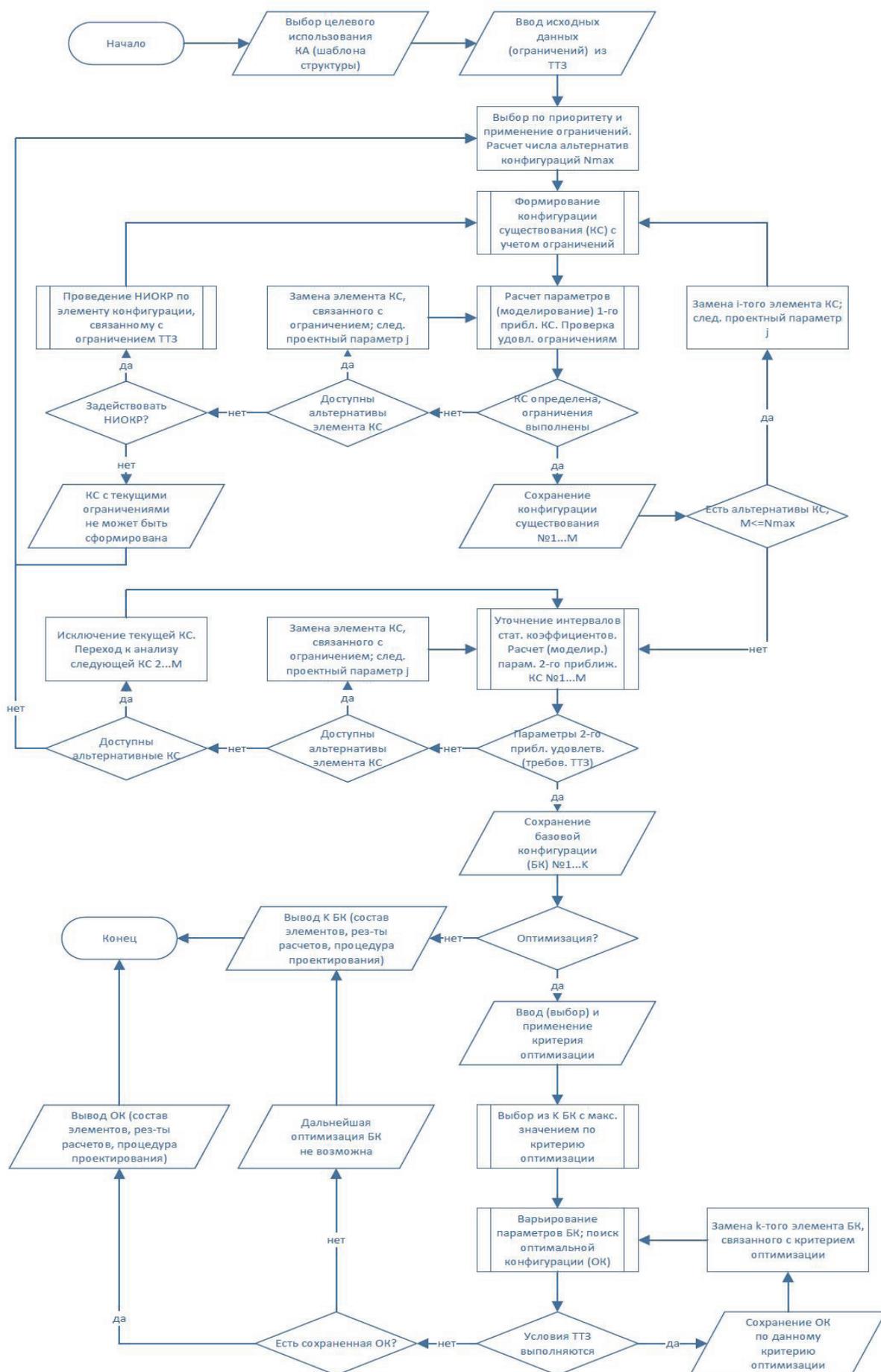


Рис. 2. Алгоритм анализа конфигурации космического аппарата



Рис. 3. Концептуальная структура системы предварительного анализа конфигурации:
 КС – конфигурация существования, БК – базовая конфигурация,
 ПП – проектные параметры, ОК – оптимальная конфигурация

условию максимизации выбранного критерия оптимизации, и использует свою отдельную группу методов многокритериального анализа в соответствии с задаваемыми ЛПР критериями оптимизации. Получаемые потенциальные оптимальные конфигурации пересчитываются (уточняются) в подмодуле расчета проектных параметров второго приближения и проверяются подмодулем проверки.

Обмен данными (сохраненными конфигурациями и соответственно их проектными параметрами, а также служебной информацией – числом итераций, промежуточными значениями и т.д.) между модулями формирования конфигурации и расчета и проверки выполняется через БД.

Модуль расчета и проверки проектных параметров. В процессе формирования конфигурации КА происходит итерационное вычисление (уточнение) проектных параметров. Поэтому ядром модуля являются уравнения, описывающие элементы конфигурации по различным взаимосвязанным параметрам – массе, энергопотреблению, сроку службы и т.д. При внесении изменений в состав или характеристики элементов конфигурации в процессе поиска происходит автоматический пересчет всех прочих проектных величин.

Модуль расчета также является двухуровневым: при формировании конфигурации существования используются обобщенные (упрощенные) уравнения, связывающие основные проектные параметры первого приближения; при определении параметров базовой конфигурации на втором этапе работы системы используются детализированные уравнения с предварительно

рассчитанными (уточненными) параметрами второго приближения. Кроме того, на втором этапе в модуле выполняется расчет производных от известных проектных параметров, уточняющих основную группу характеристик КА.

Подмодуль проверки осуществляет итерационную проверку полученных в процессе формирования конфигурации проектных параметров на предмет их соответствия начальным ограничениям, содержащимся в ТТЗ. В зависимости от этапа работы системы, в случае невыполнения данного условия происходит либо замена элемента конфигурации (в случае наличия альтернатив элементу в БД), связанного с невыполненным ограничением, с последующим возвратом к расчету проектных параметров, либо исключение данной конфигурации из анализа (в случае отсутствия альтернатив элементу) и переход к расчету и анализу следующей конфигурации.

На этапе оптимизации подмодуль проверки определяет последнюю успешную оптимальную конфигурацию (по какому-либо из критериев) и записывает ее в БД, а в случае неудачи (неудовлетворения условиям ТТЗ) осуществляет откат к последней предварительно сохраненной конфигурации, которая и становится оптимальной.

Алгоритм работы модуля расчета и проверки проектных параметров (рис. 2) сильно зависит от наличия или отсутствия в структуре проекта НИОКР.

Интерфейсная часть. Неотъемлемой функцией любой системы класса СППР является диалог с пользователем – ЛПР. Именно в этих системах данная часть особенно важна, поскольку ЛПР не-

посредственно участвует в выполнении системой своей задачи: определяет целевое назначение проектируемого КА, а, значит, задает его типовую структуру конфигурации; определяет начальные ограничения из перечня ТТЗ; принимает решение о выполнении НИОКР в случае необходимости; задает критерии оптимизации; принимает решение об окончании процесса формирования конфигурации и т.д. Действия ЛПР настолько неразрывно связаны с функциями системы, что ЛПР можно рассматривать как часть самой системы.

Таким образом, целью интерфейсной части является обеспечение взаимодействия ЛПР с системой и наоборот: введение необходимых данных или выбор вариантов; управление процессом анализа и формирования конфигурации, просмотр результатов.

Проведенный глубокий анализ этапов разработки КА ДЗЗ показал, что предварительный анализ конфигурации очень важен для разработчиков, т.к. от качества и оперативности работ, проведенных на данном этапе, зависит заключение контракта и получение прибыли. Вопросы логики анализа конфигураций и связанной с этим технологии проектирования КА в настоящий момент являются недостаточно исследованными, а практические разработки в этой области, несмотря на высокую актуальность практически отсутствуют. Предложенная концепция модульной архитектуры системы предварительного

анализа конфигурации КА, базирующейся на предварительно выработанной и также приведенной в статье логике анализа конфигурации во взаимосвязи с технологией проектирования КА, позволит осуществить информационную поддержку этапа предконкурсных работ и сократить сроки их выполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Федеральное космическое агентство, 2006. 82 с.
2. Гуцин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
3. Легалов А.И., Ледаев Д.Н., Анкудинов А.В. Анализ конфигурации космических аппаратов средствами специализированной среды инструментальной поддержки // Вестник СибГАУ. 2011. № 2. С. 69–71.
4. Антамошкин О.А. Система поддержки принятия решений на основе многоатрибутивных методов // Вестник СибГАУ. 2009. № 4. С. 50–55.
5. Шкромато А.А., Кременецкая М.Е. Математические модели и методы оптимизации принятия решений при решении инженерных задач в условиях неопределенности // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии». Сборник докладов. Оренбург, 2011. С. 299-303.

CONCEPT OF THE PRELIMINARY CONFIGURATION ANALYSIS SYSTEM OF THE EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT

© 2015 M.E. Kremenetskaya, A.A. Shkromado, G.A. Abramov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article presents the concept of modular architecture preliminary configuration analysis system of the spacecraft based on the logic of configuration analysis in conjunction with the design technology.

Keywords: spacecraft, configuration analysis, engineering, decision making support.

Marina Kremenetskaya, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Construction and Design Department of Samara State Aerospace University. E-mail: mme82@mail.ru
Anton Shkromado, Graduate Student of Aviation Equipment Institute. E-mail: shkromado@mail.ru
Gleb Abramov, Student of Aviation Equipment Institute. E-mail: belg.ru@mail.ru