

Особенности использования принципов автоматизированного исследовательского проектирования при создании элементов изделий ракетно-космической техники

А.П. Аверьянов, к.т.н., с.н.с.,

доцент кафедры Управление и информационные технологии в космических системах,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Московской области
«Финансово–технологическая академия», г. Королев, Московская область

Отражены особенности использования принципов автоматизированного исследовательского проектирования при создании элементов изделий ракетно-космической техники. Рассмотрен процесс автоматизированного формирования технического облика ракетного комплекса. Дана постановка задачи и определен состав расчетных модулей исследовательского проектирования ракетного комплекса и его подсистем для частного случая. Построены целевые функции для формирования технического облика ракетного комплекса и его подсистем.

Автоматизированное исследовательское проектирование, специальное программное обеспечение, технический облик, рациональный вариант.

Research Computer-Aided Design Engineering Principles Usage Pattern During the Rocket and Space Technology Production Units Manufacturing

A.P. Averyanov, Ph.D., Management and Information Technology in Space Systems Department, Assoc. Prof.
Library,
Moscow region state–financed educational institution of higher vocational training
«Finance and technology academy», Korolev, Moscow region

Paper reflects particular issues associated with research computer-aided design engineering principles usage pattern during the rocket and space technology production units manufacturing. A rocket complex technical layout automated definition process is examined. Rocket complex and its subsystems research design engineering scenario is given and the set of computing modules for the particular cause is specified. Objective functions for the rocket complex and its subsystems technical layout definition are developed.

Research computer-aided design engineering, customized software, technical layout, rational variant.

Введение

Процесс проектирования ракетно-космических объектов имеет ряд особенностей. Сами объекты являются сложными техническими системами, в процессе проектирования этих объектов участвует большой коллектив исследователей-разработчиков.

Сократить сроки проектирования и повысить качество проекта возможно на основе автоматизированного проектирования, на базе применения быстродействующей вычислительной техники и современных математических методов.

Исправление ошибки на стадии подготовки технической документации обходится дешевле, чем на стадии производства и эксплуатации. Известно, что 50...70% общих причин дефектов машиностроительной продукции связано с ошибками в проектно-конструкторских работах [1, с. 11].

Для создания качественной системы недостаточно одного варианта проекта. Проектировщик строит альтернативные варианты системы и из них выбирает лучший с требуемыми характеристиками.

Применение вычислительной техники при проектировании сложных технических систем возможно только в том случае, если имеются их адекватные математические модели. Разработка математических моделей объектов проектирования – творческая задача, при решении которой необходимо использовать знания и опыт, накопленные современной математикой, механикой, физикой и другими науками [2, с. 28].

Возможность построения иерархии моделей имеет важнейшее значение в процессе автоматизированного проектирования. Каждому этапу проектирования можно сопоставить свою модель объекта и тем самым избежать необоснованного усложнения задачи. При этом процесс автоматизированного проектирования имеет общие черты с вычислительным экспериментом. В математической модели проектируемого объекта выделяют структурно-параметрическое описание собственно объекта и описание поведения объекта во времени и внешней среде. Последнее называют обычно моделью функционирования.

Постановка задачи исследовательского проектирования

Постановка задачи проектирования осуществляется в несколько этапов (рисунок 1). На первом этапе заказчик определяет цели проектирования.



Рисунок 1 – Постановка задачи исследовательского проектирования

В роли заказчика обычно выступает разработчик системы более высокого уровня.

Для сложных систем на данном этапе проводятся НИР большого объёма, в ходе которых анализируются прогнозируемые характеристики объекта и внешней среды [1, с. 20]. После этого принимается решение на разработку перспективной системы.

На следующем этапе формируется концепция проектируемой системы. Предположим, что для решения поставленных задач необходим летательный аппарат. Среди летательных аппаратов выбирается, например, беспилотный вариант, определяется способ базирования и т.п. Особенностью этапа является то, что концепция формируется в условиях большой неопределённости опытными экспертами-специалистами предметной области.

Создание математической модели объекта проектирования происходит на следующем этапе. С этой целью создаётся математическое описание технической системы, определяются проектные параметры и ограничения, накладываемые на подсистемы. Данный этап проводится совместно инженерами-специалистами предметной области, имеющими практический опыт проектирования, и математиками-специалистами в области автоматизированного проектирования с применением ЭВМ.

Математические модели функционирования в ряде практически важных случаев являются в значительной мере «инвариантными» по отношению к проектируемым объектам. Точнее, изменение структуры и параметров объекта в широких пределах приводит лишь к изменению коэффициентов и функциональных зависимостей математической модели. Переход к качественно иной математической модели требуется, только когда существенно изменяется в сторону детализации описание проектируемого объекта либо появляются принципиально новые технические возможности [2, с. 35].

Формализация объекта исследовательского проектирования

Сформулируем задачу оптимизации при проектировании технической системы. Пусть варианты технической системы (альтернативы) описываются набором (вектором) параметров x размерности N , принимающим значения из множества X . Задание множества X отражает опыт проектирования систем аналогичного назначения, требования к системе, формируемые на этапе внешнего проектирования, физические законы функционирования и пр. Множество X выбирается из всех технически реализуемых вариантов проектируемой системы в соответствии с совокупностью ограничений (равенств и неравенств), вытекающих из требований технического задания и структурно-параметрического описания системы.

В достаточно общем виде эта задача сводится к определению такого вектора x^* из допустимого множества X , который обеспечивает минимум целевой функции $f(x)$, т.е.:

$$x^* = \arg \min_{x \in X} f(x).$$

Как правило, допустимое множество X задается совокупностью неравенств (или равенств, или

неравенств и равенств одновременно) вида

$$g(x) \leq 0 \{ \overline{g_i}(x) \leq 0, i = 1, m; \overline{g_j}(x) = 0, j = 1, l \},$$

где $g(x)$ – в общем случае вектор-функция, которая называется функцией ограничений [4, с. 88].

Средства автоматизированного исследовательского проектирования

Для обеспечения автоматизации научно-исследовательских работ необходимы следующие компоненты (рисунок 2) [5, с. 575]:

- комплекс технических средств;
- общесистемное программное обеспечение;
- специальное программное обеспечение;
- информационное обеспечение.

Комплекс технических средств

Комплекс технических средств (КТС) – это средства обработки данных, периферийной техники и других средств оргтехники по подготовке и отображению информации, они объединяются в единую технологическую цепочку. Комплекс технических средств представляет собой совокупность ЭВМ, предназначенных для хранения баз данных автоматизированных рабочих мест, объединенных при помощи сетеобразующей аппаратуры и локальной сети связи.

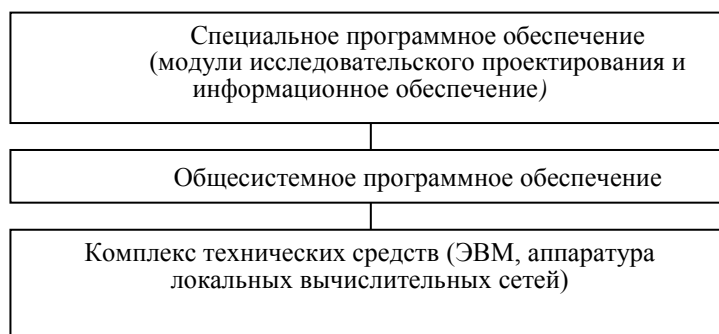


Рисунок 2 – Состав средств автоматизированного исследовательского проектирования

Общесистемное программное обеспечение

Общесистемное программное обеспечение (ОСПО) предназначено для управления работой КТС, организации ввода-вывода, обработки и хранения данных и создания интеллектуального интерфейса между пользователем и системой. ОСПО состоит из комплексов инструментальных средств и базового программного обеспечения. Общесистемное программное обеспечение реализует интеллектуальный интерфейс между пользователями. В его состав входят комплекс инструментальных средств и базовое программное обеспечение. Комплексы инструментальных средств реализуют технологию автоматизированной обработки информации с помощью ЭВМ.

Специальное программное обеспечение исследовательского проектирования

Специальное программное обеспечение исследовательского проектирования – это программная реализация моделей и методик в виде совокупности программных модулей и данных для их выполнения, объединенных в базы данных. В типовой проектной процедуре на основе комбинирования отдельных программных модулей, в зависимости от выбранного критерия эффективности и ряда дополнительных ограничений решаются математические задачи по выбору вариантов проектных решений. Таким образом, специальное программное обеспечение представляет собой совокупность элементов знаний, которыми исследователь оперирует при формировании технического облика объекта и оценки его соответствия целевому назначению.

Эффективность системы автоматизированного исследовательского проектирования во многом определяется составом и качеством специального программного обеспечения. От того, какие модели будут использоваться при проектировании, насколько совершенны методы и алгоритмы применения проектных решений зависят качество и сроки проектирования, а также связанные с ними затраты.

Основное назначение моделей – обеспечение возможности сделать выводы о структуре и свойствах создаваемой системы, его подсистем и составных частей. На основании этих выводов могут быть сделаны практические рекомендации о продолжении или окончании исследований.

Моделирование по сравнению с натурными экспериментами допускает значительно более широкие исследования, результаты которых дают нам информацию для прогнозирования функционирования

системы, а в ряде случаев моделирование остается единственно возможным способом проведения исследований в силу трудности организации натуральных экспериментов.

В зависимости от отображаемых свойств объекта различают его морфологическое и функциональное описание.

Морфологическое описание проектируемого объекта осуществляется на основе структурных и геометрических моделей. Структурные модели применяются для отображения взаимного расположения элементов в пространстве и их взаимодействия. Они носят характер графов, схем, матриц, векторов и обычно не учитывают особенностей физических процессов в проектируемом объекте. Геометрические модели описывают пространственные соотношения, формы проектируемого объекта и его составных частей.

В основе функционального описания объекта проектирования лежат функциональные модели и критерии оценки качества функционирования. Функциональные модели устанавливают связи между входными, выходными и управляющими параметрами с помощью функциональных зависимостей (функционалов, операторов, вероятностных зависимостей, неравенств и т.п.).

Морфологические и функциональные описания объекта взаимосвязаны. Так, например, описание морфологии объекта дает исходный материал для определения параметров в функциональных моделях.

Информационное обеспечение

Под информационным обеспечением (ИО) понимается совокупность данных, необходимых для проведения автоматизированных исследований по формированию технических обликов сложной системы. Целевым назначением ИО является хранение и оперативное представление данных, необходимых в ходе проведения исследований, а также фиксация и систематизация результатов проектных проработок и вычислительных экспериментов.

Пример формирования технического облика сложной системы

В качестве примера рассмотрим один из возможных подходов по формированию технического облика (ТО) ракетного комплекса (РК). Взаимосвязь и декомпозиция постановок задач осуществлена в целях автоматизированного формирования технического облика комплекса на этапе научно-исследовательских работ. В техническом задании (ТЗ) на исследовательское проектирование ракетного комплекса задается цель работы, условия эксплуатации и применения комплекса, решаемые задачи, краткая характеристика объекта исследований. На основании ТЗ формируется содержательное описание проектируемого РК и его подсистем, выделяются критерии, по которым будет оцениваться качество РК и его подсистем. Критерии выбора характеристик должны позволять оценивать всю совокупность предлагаемых технических решений. В практике выбора основных характеристик ракетного комплекса используются критерии «стоимость-эффективность», «эффективность-стоимость» [7, с. 38]. В первой постановке определяют минимальные затраты на создание РК при заданном значении эффективности, во второй – определяют максимальное значение эффективности при определенных затратах. Обе постановки с точки зрения получаемых решений эквивалентны, однако для задачи выбора характеристик РК более предпочтительной является первая постановка [6, с. 25]. Построим в общем виде функции эффективности W_{PK} и стоимости C_{PK} в зависимости от тактико-технических характеристик (ТТХ) РК и технических характеристик (ТХ) его подсистем. Функция эффективности РК может быть представлена в виде вероятностей выполнения последовательных событий, которые реализуются совокупностью физических объектов или отдельным объектом. Вероятность выполнения задачи может быть представлена в виде функции от следующих характеристик:

$$W_{PK} = W_{PK}(P_c, T_{доп}, R, P_n),$$

где P_c – вероятность доведения поданного в случайный момент времени сигнала на пуск за время не более t_c до персонала;

$T_{доп}$ – заданное время доведения сигнала на пуск;

$R = R(P(t_i))$ – обобщенный показатель надежности;

$P_n = \{P(t_n), P(t_{np}), P(t_{nn})\}$;

$P(t_n)$ – вероятность успешного функционирования ракеты и взаимодействующих с ней элементов комплекса при подготовке и проведении пуска за время не более t_n ;

$P(t_{np})$ – вероятность успешного функционирования ракеты в полете;

$P(t_{nn})$ – вероятность доставки полезной нагрузки с заданной точностью.

Представим РК в виде иерархической системы. На данном этапе подробность представления объекта в виде подсистем определяется решаемыми задачами. В рассматриваемом случае декомпозицию РК на подсистемы представим в упрощенном варианте. Можно выделить, например, следующие подсистемы: ракета, обеспечивающие системы. Ракета детализируется на составные части: космический аппарат (КА) и ракета-носитель (РН).

Процесс выделения подсистем последующих уровней может быть продолжен по частным показателям эффективности. Взаимосвязь задач нижерасположенного уровня осуществляется с помощью ограничений, накладываемых на ТТХ и ТХ подсистем вышеразположенного уровня.

Научно-техническое обоснование перспективных космических систем связано с необходимостью определения полных затрат с целью сравнительного анализа альтернативных вариантов и выбора рационального. Под полными затратами понимается сумма затрат на всем жизненном цикле системы на

следующие работы:

- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР) на систему;
- изготовление КА;
- подготовку КА к запуску;
- выведение КА на заданную орбиту;
- лётную эксплуатацию КА.

Полные затраты на комплекс могут быть записаны в следующем виде [3, с.102]:

$$C_{\text{полн}} = C_{\text{окр}}^{\text{ка}} + C_{\text{окр}}^{\text{рн}} + n_i (C_{\text{пуск } i}^{\text{рн}} + C_i^{\text{ка}} + C_{\text{эксп } i}),$$

где $C_{\text{окр}}^{\text{ка}}$ – стоимость ОКР КА;

$C_{\text{окр}}^{\text{рн}}$ – стоимость ОКР РН;

$C_{\text{пуск } i}^{\text{рн}}$ – стоимость пуска РН;

$C_i^{\text{ка}}$ – стоимость изготовления КА;

$C_{\text{эксп } i}$ – годовые затраты на лётную эксплуатацию КА;

n_i – число КА, планируемых к запуску за весь жизненный цикл.

Составляющие затраты оцениваются по принятым методикам, например, по методике с использованием метода экспертных оценок или регрессионного анализа, используя статистические данные по аналогам.

С другой стороны, стоимость РК может быть представлена как сумма стоимостей подсистем, входящих в РК:

$$C_{\text{рк}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{рк } i},$$

где n – количество рассматриваемых подсистем РК.

Стоимость серийного производства ракеты может быть определена как функция от следующих характеристик:

$$C_p = f(M_o, M_k, M_{\text{пн}}, P_{\text{уд}}),$$

где $M_o, M_k, M_{\text{пн}}$ – стартовая масса ракеты, масса конструкции, масса полезной нагрузки;

$P_{\text{уд}}$ – удельная тяга двигательной установки.

Анализируя функции эффективности и стоимости, составим вектор характеристик, определяющих облик РК:

$$X_{\text{рк}} = \{P_c, T_{\text{дов}}, R, P_n, M_o\}.$$

Сформулируем задачу формирования ТО РК в следующем виде:

$$X_{\text{рк}}: \min C_{\text{рк}}(X_{\text{рк}}, G_{\text{рк}}),$$

где $X_{\text{рк}} = \{P_c, T_{\text{дов}}, R, P_n, M_o\}$,

$$G_{\text{рк}} = \{W_{\text{рк}}, T_{\text{созд}}\},$$

$$W_{\text{рк}}(X_{\text{рк}}, X_p) \geq W_{\text{рк}},$$

$$T_{\text{созд}}(X_{\text{созд}}, X_{\text{рк}}) \leq T_{\text{созд}},$$

$$X_{\text{рк}j^-} \leq X_{\text{рк}j} \leq X_{\text{рк}j^+};$$

$T_{\text{созд}}$ – продолжительность создания ракетного комплекса;

$X_{\text{рк}j^-} \dots X_{\text{рк}j^+}$ – диапазон изменения ТТХ ракетного комплекса.

Для ракеты задачу формирования ТО запишем в следующем виде:

$$X_p: \min C_p(X_p, G_p),$$

где $X_p = \{TX_{\text{ка}}, TX_{\text{н}}\}$ – технические характеристики космического аппарата, ракеты-носителя,

$$G_p = \{P_n, M_{\text{пн}}\},$$

$$X_{\text{р}j^-} \leq X_{\text{р}j} \leq X_{\text{р}j^+};$$

$X_{\text{р}j^-} \dots X_{\text{р}j^+}$ – диапазон изменения ТХ ракеты.

Для носителя задачу формирования ТО запишем в следующем виде:

$$X_n: \min M_o(X_n, G_n),$$

где $X_n = \{TX_{\text{н}}\}$,

$$G_n = \{M_{\text{пн}}, P(t_{\text{н}})\},$$

$$M_{\text{пн}}(X_n) \geq M_{\text{пн}},$$

$$P(t_{\text{н}})(X_n) \geq P(t_{\text{н}}),$$

$$X_{\text{н}j^-} \leq X_{\text{н}j} \leq X_{\text{н}j^+};$$

$X_{\text{н}j^-} \dots X_{\text{н}j^+}$ – диапазон изменения ТХ носителя.

Процесс отыскания ТТХ РК и ТХ подсистем строится следующим образом. Вырабатываются требования к подсистемам верхнего уровня в виде ограничений (например, на характеристики РК в виде ограничений на вектор $X_{\text{рк}}$). Затем вырабатываются требования к подсистемам нижерасположенного уровня (например, на характеристики ракеты в виде ограничений на вектор X_p) и т. д. В случае трехуровневой системы задание требований к подсистемам на этом заканчивается.

Затем строятся целевые функции подсистем, начиная с нижнего уровня, отыскиваются рациональные значения этих функций при заданных ограничениях, формируются варианты подсистем каждого уровня.

Далее строится целевая функция для РК, отыскивается её рациональное значение при заданных ограничениях, формируются варианты РК. Выбирается вариант РК, удовлетворяющий предъявляемым

требованиям. В случае если вариант РК не удовлетворяет требованиям, то исследование продолжается, начиная с формирования новых требований на подсистемы.

Для формирования технического облика РК разрабатываются расчётные модули подсистем РК (рисунок 3). Расчётный модуль – это программа для ЭВМ, реализующая алгоритм формирования облика подсистемы.

Действия с модулями и данными для реализации проектных процедур исследовательского проектирования РК могут быть представлены в следующей последовательности:

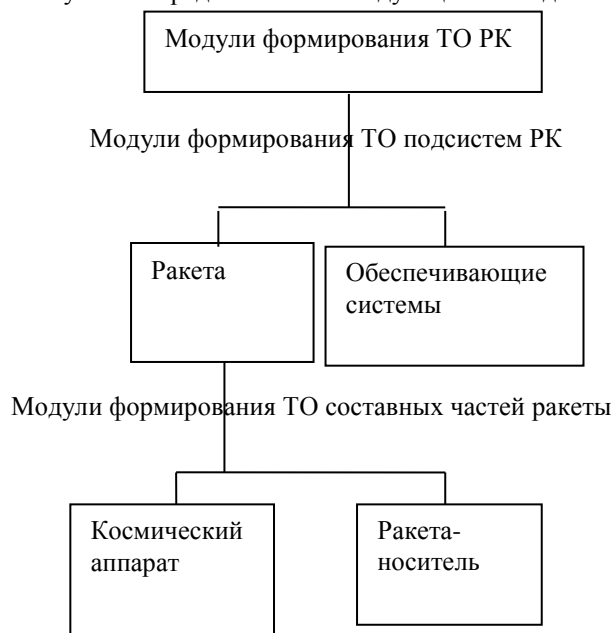


Рисунок 3 – Примерный состав модулей формирования ТО РК

подготовка исходных данных на основе ТЗ на исследовательское проектирование;
проверка данных на корректность;
выбор режима (автоматического или интерактивного) работы проектной процедуры;
выбор условий окончания работы отдельных проектных процедур или их вычислительных цепочек.
Условием окончания работы модулей подсистем является число заданных вариантов их обликов.

Условием окончания работы модулей РК является окончание перебора вариантов структур РК и выбор рационального.

Уровень автоматизации при проектировании в значительной степени зависит от того насколько формализована предметная область. В общем случае только отдельные задачи удается формализовать. Это наиболее распространенная ситуация, к которой относится и формирование технического облика РК и его подсистем. Поэтому в первую очередь выделяются формализованные задачи, определяются логические и информационные связи между ними, разрабатываются процедуры, объединяющие формальные и неформальные элементы. При решении частично формализованных задач используются экспертные системы и диалоговый режим работы с ЭВМ.

Заключение

Рассмотренные принципы автоматизированного исследовательского проектирования позволяют построить автоматизированную систему для проектирования элементов изделий ракетно-космической техники. В качестве примера представлен один из возможных подходов формирования технического облика ракетного комплекса на этапе научно-исследовательских работ. Основные характеристики ракетного комплекса определяются по минимальной стоимости при заданном значении эффективности. С этой целью строят целевые функции для подсистем, начиная с нижнего уровня, отыскиваются рациональные значения этих функций при заданных ограничениях, формируются варианты подсистем. Затем формируются варианты ракетного комплекса, выбирается вариант с минимальной стоимостью, удовлетворяющий предъявленным требованиям.

Литература

1. Вязгин, В. А., Федоров, В. В. Математические методы автоматического проектирования. [Текст] / В. А. Вязгин, В. В. Федоров // Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая шк. – 1989. – 184 с.
2. Краснощёков, П. С., Петров, А. А., Федоров, В. В. Информатика и проектирование, сер. «Математика, кибернетика» [Текст] / П. С. Краснощёков, А. А. Петров, В. В. Федоров // № 10. – М.: Знание. – 1986. – 48 с.

-
3. Методы военно-экономических исследований перспектив развития космических средств / Колл. авторов; Под ред. Е. В. Рыжова. – М.: Машиностроение. – 1998. – 152 с.: ил.
 4. Основы синтеза систем летательных аппаратов: Учеб. Пособие для студентов втузов /А. А. Лебедев, В. Н. Баранов, В. Т. Бобровников и др.; Под ред. А. А. Лебедева. – М.: Машиностроение. – 1987. – 224 с.
 5. Стратегическое ракетное вооружение. Методология, опыт, разработки. Книга 1.– М.:4ЦНИИ. – 2003. – 652 с.
 6. Чуев, Ю. В., Спехова, Г. П. Технические задачи исследования операций. [Текст] / Ю. В. Чуев, Г. П. Спехова // – М.: Советское радио. – 1971. – 244 с.
 7. Щеверов, Д. Н. Проектирование беспилотных летательных аппаратов [Текст] / Д. Н. Щеверов // М.: Машиностроение. – 1978. – 264 с.
- УДК 621.397