

УДК 621.317.75

## АНАЛИЗ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ И ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ РКТ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

*Иванов А.В., заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», teandr@spectr.ryazan.ru*

*Корячко В.П., заведующий кафедрой САПР ВС, РГРТУ, д. т. н., проф.*

*Сериков С.А., заместитель главного конструктора, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», 4371@spectr.ryazan.ru*

**Ключевые слова:** принятие решений, оптимизация систем, функция полезности.

### Введение

Создание и эксплуатация новых образцов изделий РКТ (РКН, МБР, БРПЛ, КА) в последние десятилетия характеризуется усложнением, как самих изделий, так и методов и средств их испытаний, сокращением сроков самих испытаний и количества образцов, выделяемых для летно-конструкторских испытаний, повышением требований качества к их отработке и дальнейшей эксплуатации.

Существенной составляющей в повышении надежности и снижении затрат при выводе космических объектов является повышение качества контроля основных элементов и систем ракетно-космической техники (РКТ) на всех этапах жизненного цикла: при изготовлении, подготовке к пуску и пуске. При проведении испытаний в процессе подготовки изделий РКТ к пуску формируются обширные порции информации, описывающие различные ситуации, возникающие при работе с конкретным изделием.

В свою очередь создаваемые технические системы испытаний изделий ракетно-космической техники характеризуются постоянным функциональным усложнением, а также интеграцией различных по типу устройств в один много параметрический технический объект. Постоянные возрастающие требования к достоверности и качеству испытаний объектов РКТ определяют необходимость создания системы принятия решений (СППР).

### Постановка задачи оптимизации

Техническая система испытаний предназначена для выполнения определенных функций в процессе испытания изделий РКТ и позволяет получить требуемый эффект в процессе подготовки изделия РКТ. Под техническими системами испытаний изделий РКТ (ТСИ РКТ) будем понимать технические системы, включающие большое число элементов и подсистем, организованные по иерархическому принципу, в которых при данном (конкретном) уровне рассмотрения процесс принятия решения рассмотрен между компонентами системы. При функционировании ТСИ РКТ зачастую возникают нештатные (конфликтные) ситуации. Под подобными ситуациями понимаются такие

*Рассматриваются вопросы оптимизации системы испытаний изделий РКТ, описывается математическая модель оптимального определения средств системы.*

ситуации, которые возникают в процессе управления, не могут быть решены без участия оперативного персонала и связаны с необходимостью выбора лицом, принимающим решение (ЛПР), конкретной альтернативы управления при наличии информации о состоянии ТСИ РКТ, критериев, решающих правил и собственной системы предпочтений. Конфликтные ситуации связаны с высоким уровнем ответственности за принимаемое решение, характеризуются нестереотипностью и зачастую острым дефицитом времени на принятие решения. Причинами возникновения таких ситуаций могут быть:

- ненадежность элементов, выход их из строя;
- несовершенство ТСИ РКТ, которое обусловлено неполнотой и неточностью информации об объекте, несовершенством методов и алгоритмов управления, недостатками и ошибками оператора и т.д.;
- необходимость преодоления многозначности, возникающей в процессе функционирования.

Оптимизируя ТСИ РКТ, нельзя забывать о связях, имеющихся между разными звеньями системы и разными уровнями иерархии.

Основной трудностью анализа и синтеза ТСИ РКТ является учет действия случайных факторов в процессе их создания и последующего функционирования. Обобщенным функциональным свойством системы является эффективность, отражающая степень достижения системой цели с учетом затрат ресурсов и времени на реализацию операции в определенной ситуации.

Проблема оценки и оптимизации решений в сложных технических системах и создания надежных диагностических систем для них достаточна, трудоемка и решается, как правило, методами декомпозиции [1, 2].

В общей теории систем под задачей оптимизации и принятия решений понимается пара  $(X, F(X))$ , где  $X$  – множество альтернатив,  $F(X)$  – критерий оптимальности. Под решением задачи  $(X, F(X))$  понимается альтернатива  $x^* \in X$  либо подмножество альтернатив  $X^* \subseteq X$ , полученных по критерию оптимальности  $F(X)$ , иногда называемым функцией полезности [3]. Задача



оптимизации сложной технической системы относится к классу задач принятия решений, когда для оценки альтернатив  $x \in X$  можно привлекать количественные критерии, допускающие операции в нормализованном критериальном пространстве  $Z=R^m$ , под которым понимается пространство, координаты которого рассматриваются как оценки по соответствующим критериям (здесь  $m$  – количество критериев оптимальности) [2].

Отображение множества  $X$  в критериальное пространство  $Z$  порождает подмножество  $Zx$ , являющееся образом множества  $X$

$$X : X \xrightarrow{(f_1(x), \dots, f_m(x))} Zx \subset Z = R^m \quad (1)$$

Опишем проблемную ситуацию многокритериального принятия решений в виде следующей модели:

- существуют альтернативы  $x$ , которые обладают  $m$  свойствами  $z_1, \dots, z_m$ ;

- каждому свойству  $z_i$  альтернативы  $x$  соответствует критериальная оценка  $f_i(x)$ ;

- каждой альтернативе  $x$  соответствует в пространстве  $Z$  решение (точка)  $z=(z_1, \dots, z_m) \in R^m$ , описываемая вектором  $F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$ ;

- отображение  $X \rightarrow Z$  порождает в этом пространстве множество решений  $Zx$ , являющееся образом множества  $X$ , соответствующее выражению (1);

- на множество решений в критериальном пространстве  $Z$  наложены критериальные ограничения, образующие подмножество  $Zz \subset Z$ ;

- допустимое множество решений  $Z_D$  в критериальном пространстве  $Z$  образуется как  $Z_D = Zx \cap Zz$ ;

Особенностью задачи является то, что каждой допустимой альтернативе  $x_s \in X$  соответствует точка  $z_s \in Z_D$  в критериальном пространстве  $Z$ , описываемая вектором  $F_s(x) = (f_1^s(x), \dots, f_m^s(x))$ .

Формально задачу определения оптимальной структуры программно-аппаратных средств сложной технической системы можно задать следующим образом. Имеется множество  $X$  альтернативных структур сложной технической системы, каждая из которых может быть описана вектором критериев  $F(x)$ . Известно множество  $D$  компонент заполнения системы, причем  $D = \cup D_j$ ,  $j = \overline{1, k}$ , где  $D_j$  -  $j$ -й вариант компоненты (функциональный блок, объективная программа, сервисный узел и др.). Дополнительные условия, определяющие структуру сложной системы:  $\{\Phi_j\}$  – множество функций, реализуемых на компоненте  $D_j$ , вариант объединения  $\cup D_j = \{D_j\}$ , обладающий функциональной полнотой и др.

Поиск оптимального решения происходит на основании корректно заданной шестерки:

$$\langle X, F(X), Z_D, D, \{D_j\}, \{\Phi_j\} \rangle \quad (2)$$

### Формирование функции полезности

Принятие решений  $x^* \in X$  или  $X^* \subset X$  при нескольких критериях  $F(X) = \{f_i(x)\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  относится к числу трудно формализуемых задач системного анализа.

Искомые решения  $x^*$  или  $X^*$  по своей природе компромиссны. Поскольку компромисс является prerogative человека, то многокритериальное решение

полностью зависит от предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР).

В процессе решения многокритериальных задач ЛПР руководствуется своим набором предпочтений, который отражается некоторой функцией полезности  $F(X)$  в критериальном пространстве  $Z_D$ . Функцию  $F(X)$  на всей области определения  $Z_D$  получить довольно сложно, поэтому в задачах проектирования часто ограничиваются анализом ее поведения в окрестностях той точки пространства аргументов, которая соответствует наиболее типичной ситуации. Как правило, функция полезности  $F(X)$  представляется в виде либо линейной скалярной свертки

$$F(X) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x), \quad (3)$$

либо в виде мультипликативной свертки

$$F(X) = \prod_{i=1}^m f_i^{a_i}(x) \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4)  $a_i$  - весовые коэффициенты, которые могут определяться либо экспертным путем, либо исходя из анализа предъявляемых требований к параметрам проектируемой системы, описываемых критериями  $f_i(x)$ , либо являются коэффициентами регрессии, имеющими смысл частной производной критериальной функции  $f_i(x)$ , вычисленной в базовой рабочей точке.

На практике наиболее применимой для оценки различных вариантов проектируемых систем является линейная скалярная свертка вида (3), которая представляет собой линейное приближение критериальной функции. Область определения коэффициентов  $a_i \in \Gamma_a$  представляет собой симплекс

$$\Gamma_a = \{\alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1\}$$

здесь  $a_i$  – формальные параметры, имеющие двоякий физический смысл. С одной стороны – это коэффициенты, выражающие предпочтения ЛПР, а с другой стороны - это коэффициенты содержательной регрессивной модели, построенной на основе концепции нелинейной схемы компромиссов.

Функцию полезности (3) можно представить в виде некоторой содержательной модели в критериальном пространстве  $Z_D$ , если ее конструировать в виде функции штрафа. Если в техническом задании на систему задан вектор ограничений  $A=(A_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$  на параметры, то логично ввести векторную разность  $(A_i - f_i(x))$ , которую следует максимизировать, т.е. формально реализовать принцип «подальше от ограничений» [3]. Содержательная модель функции полезности ЛПР при минимизируемых критериях примет вид функции штрафа  $F(X)$ :

$$F(X) = \sum_{i=1}^m a_i [A_i - f_i(x)]^{-1} \quad (5)$$

или в нормированном виде:

$$F_0(X) = \sum_{i=1}^m a_i [1 - f_{0i}(x)]^{-1}, \quad (6)$$

где  $f_{0i}(x) = f_i(x) / A_i$ .

Если результат решения многокритериальной задачи предназначается для широкого использования без учета интересов ЛПР, то индивидуальные предпочтения нивелируются по статистике. В этом случае становится возможным применение принципа недостаточного основания Бернулли-Лапласа: если априорные вероятности гипотез неизвестны, то их следует положить равными, т.е. все гипотезы следует считать равновероятными. В применении к многокритериальной задаче это означает, что в выражениях (3), (5) и (6) все коэффициенты  $a_i$  должны быть равными  $a_i=1/m$ , если только нет никаких предварительных данных о предпочтительности критериев. Тогда

$$F(X) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [1 - f_{0i}(x)]^{-1}$$

Учитывая, что согласно теореме Гермейера [5], умножение результатов сравнения на постоянную величину  $1/m$  есть монотонное преобразование, которое не изменяет результатов сравнения, можно перейти к следующему выражению для критерия оптимальности

$$F(X) = \sum_{i=1}^m [1 - f_{0i}(x)]^{-1} \quad (7)$$

В формуле (7) элемент субъективности исключен полностью. Этот критерий может быть использован как в задачах анализа, когда при известном решении  $x^*$  оцениваются критерии  $f_i(x)$  и находится обобщенная оценка  $F(X)$ , так и в задачах синтеза, когда компромиссно-оптимальное решение  $x^*$  определяется как

$$x^* = \arg \min F(X) = \arg \min \sum_{i=1}^m [1 - f_{0i}(x)]^{-1}$$

### Реализация СППР

Задачи создания сложных технических систем и надежных диагностических средств для них решаются с применением методов многокритериальной оптимизации. Для задач, возникающих в процессе создания и эксплуатации сложных технических систем, существует множество различных алгоритмов принятия многокритериальных решений и соответственно различных способов адаптации этих алгоритмов.

Анализ существующих алгоритмов и методов показывают, что все они имеют свои недостатки и достоинства [5]. При их использовании в конкретных системах не только приходится учитывать противоречивые требования по обеспечению быстроедействия и точности выбора альтернативы, но и характер самих задач (количество влияющих критериев, их взаимосвязь, относительная важность и т. д.). Это означает, что даже для однотипных задач при разных исходных данных эффективность различных методов не одинакова.

Обобщая известные процедуры принятия решений, для СППР ТСИ РКТ выделим последовательность основных действий, включающую в себя:

1. Анализ проблемы.
2. Поиск альтернатив, определение критериев оптимальности.
3. Анализ и выбор лучшей альтернативы (сравнение альтернатив).

При принятии решений должны быть решены следующие основные задачи:

- упорядочивание альтернатив;
- классификация многокритериальных задач;
- выделение лучшей альтернативы.

**Анализ проблем.** Формулировка целей и задач. Для реализации первого этапа формулирования и анализа проблемы необходимо осуществить следующие шаги:

- мониторинг внешней среды и объекта управления;
- выявление и формирование проблемы, оценка ее новизны;
- установление взаимосвязи с другими проблемами;
- оценка полноты и достоверности информации по данной проблеме;
- ведение базы данных информационных ресурсов по проблеме.

Полученная информация о существующей проблеме анализируется с целью получения подробных данных о самой системе, выявления общей структуры проблематики и возможности использования ее для определения цели и формулировании задач.

**Поиск альтернатив, определение критериев оптимальности.**

Необходимым и первым этапом принятия решения является задача выявления перечня альтернатив и структуры критериев.

**Анализ и выбор лучшей альтернативы.**

В ходе данного этапа необходимо провести оптимизацию альтернатив и выбор наилучшей из множества предложенных, с использованием методологии поддержки принятия решений, включающей разнообразные технологии и методы, которые можно частично или полностью формализовать.

С точки зрения системного анализа к основным этапам анализа альтернативных решений необходимо отнести: анализ неопределенности решения, методы оптимизации и определение решающих функций, оценку возможных решений, выбор оптимального решения.

Концептуальная модель системы поддержки принятия решений (СППР) ТСИ РКТ содержит в себе следующие блоки: блок интерфейса, аналитический модуль (блок анализа проблемы, блок принятия решений), база данных, база моделей, база знаний.

База данных содержит модели распознавания конфликтных ситуаций; формирования плана (последовательности) их разрешения с учетом важности и директивного (допустимого) времени разрешения; генерирования гипотез о возможных причинах конфликтных ситуаций; формирования плана проверки гипотез и реализации решений.

База данных содержит информацию о характеристиках и признаках ситуаций, в том числе признаках появления, возможных причинах возникновения, важности, директивном времени и т.д.

Для обеспечения гибкости системы целесообразно включить в состав СППР дополнительную подсистему обучения, обеспечивающую возможность ввода в систему дополнительных алгоритмов, методов, описание ситуаций, а также ввода известных статистик по принятым решениям в уже известных ситуациях.

Обобщенная структурная схема системы поддержки принятия решений (СППР) представлена на рис.1.

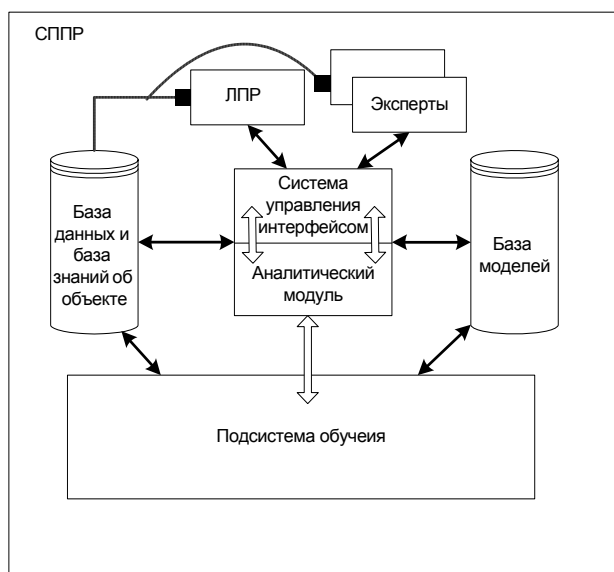


Рис. 1. Структурная схема СППР

Подсистема обучения состоит из блоков обучения распознаванию ситуаций, формирования гипотез о конфликтной ситуации, формирования модели проверки гипотез, блока формирования обстановки, блока анализа эффективности.

Блок формирования обстановки предназначен для формирования типа, размерности и диапазона параметров, характеризующих текущее состояние ТСИ РКТ. Конкретные значения всех или нескольких параметров могут либо генерироваться по отдельному закону, либо соответствовать реальной, либо заданной обстановке. Это позволяет снизить размерность задачи перебора всех возможных вариантов, т.е. проводить оптимизацию и исследования только вблизи наиболее интересных событий.

Блок анализа эффективности предназначен для сравнительной оценке эффективности применяемого алгоритма

Можно выделить три этапа функционирования СППР: обучение, функционирование, дообучение.

**Обучение.** На этом этапе формируется база знаний СППР, в которой хранится модель функционирования системы, создаваемая на основе обработки экспертной информации. С помощью подсистемы обучения информация о характеристиках конфликтных ситуаций обрабатывается специальным образом и вводится в базу знаний. Множество признаков, характеризующих факт возникновения конфликтных ситуаций, формируется на основе информации, циркулирующей в системе управления. Эти признаки обычно вполне определены и достоверны, что позволяет автоматически формировать сигнал о факте возникновения конфликтной ситуации.

Описания конфликтных ситуаций формируются на основе анализа целей и задач функционирования системы и экспертной информации. Для каждой

конфликтной ситуации синтезируются структуры моделей формирования гипотез и их проверки.

**Функционирование СППР.** Это непосредственная информационная поддержка принятия решений оператором при возникновении конфликтных ситуаций в процессе функционирования системы. Информация о конфликтной ситуации поступает в базу данных СППР, производится распознавание ситуаций и занесение их индексов в базу данных. На основе этих индексов, а также временных характеристик и коэффициентов относительной важности ситуаций, которые хранятся в базе данных, формируется план разрешения ситуаций, который определяет относительную последовательность разрешения ситуаций с учетом их важности и срочности. После оценки оператор вводит индекс наиболее важной ситуации в базу данных. По индексу ситуации формируются гипотезы о возможных решениях. На основе индексов гипотез формируется план проверки гипотез.

Гипотезы о возможных решениях, план их проверки и справочная информация выдаются оператору в качестве рекомендаций по принятию решения. По индексу выбранной гипотезы формируется план реализации решения. Вводя команды управления, оператор ликвидирует конфликтную ситуацию.

**Дообучение.** Оно заключается в корректировке моделей в базе знаний на основе объективной информации подтверждения или опровержения гипотез о причинах конфликтных ситуаций.

## Заключение

Применение на практике при создании ТСИ РКТ моделей оптимизации и поддержки принятия решений позволяет значительно улучшить качество создаваемых систем.

Предложенная СППР позволяет производить выбор алгоритма для решения задачи многокритериальной оптимизации при поддержке управляющих решений на всех этапах жизни ТСИ РКТ. Введение в состав классической модели подсистемы обучения позволяет значительно повысить качество решений и эффективность функционирования ТСИ РКТ.

## Литература

1. Везенов В.И., Светников О.Г., Тимашев А.В., Иванов А.В. Опыт создания систем автоматизации испытаний систем измерений и электроиспытаний изделий ракетно-космической техники. – Радиотехнические тетради №33 2006 – 39 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973.- 344 с.
3. Рыков А.С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация. – М.: “МИСИС”, Изд. Дом “Руда и металлы”, 2005. – 352 с.
4. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. – М.: “Наука”, 1978. – 352 с.
5. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: “Наука”, 1971 – 384 с.
6. Ларичев О.И. Теория принятия решений. –М.: Логос, 2000. – 296 с.