

Системная формализация задачи многокритериальной оптимизации аэрокосмических систем

Объекты рассмотрения –

**аэрокосмические системы на этапе формирования
их облика
(решения задачи синтеза системы).**

Цель лекции – обсуждение проблем автоматизированного формирования облика системы с учетом и использованием:

- ▶ многих показателей эффективности системы;
- ▶ методов многокритериальной оптимизации;
- ▶ системы искусственного интеллекта;
- ▶ системы поддержки принимаемых решений (СППР).

Участники процесса решения задачи:

- «Заказчик» системы – лицо, принимающее решение (ЛПР).
- Разработчик системы.

В качестве Заказчика системы могут выступать:

- ❑ разработчик надсистемы, в состав которой входит рассматриваемая система. Заказчик формулирует задачу системы в виде тактико-технических требований к системе и принимает проект системы, созданный разработчиком;
- ❑ «рынок», анализ текущего и прогнозируемого состояния которого разработчиком системы позволяет ему принять решение о целесообразности и характеристиках предлагаемой им новой системы. В такой ситуации разработчик системы одновременно является и ЛПР.

Основные этапы решения задачи

1. Формулировка цели (целей) системы, составление списка (вектора) учитываемых показателей эффективности системы $W = [w_i]_K$.
2. Задание условий (факторов внешней среды) функционирования системы в виде требований и ограничений, представляемых вектором $V = [v_i]_K$.
3. Формирование дискретно-непрерывного множества альтернатив (вариантов) построения системы $U = [u_i]_N$.
4. Разработка математических моделей, обеспечивающих расчет введенных частных показателей эффективности системы для всех альтернатив из предлагаемого множества.
$$w_k = F_k(u_i, v_k), u_i \in U, v_k \in V, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}.$$
5. Поиск доминирующей альтернативы системы $u^A \in U$
(если таковая существует), при которой все показатели превосходят достигаемые при других альтернативах рассматриваемого множества.

6. При отсутствии доминирующей альтернативы – исключение «худших» альтернатив, уступающих остальным вариантам решения по всем компонентам векторного критерия.

Цель этапа - сужение множества рассматриваемых конкурирующих альтернатив (множества Парето) для выбора среди них единственной рациональной альтернативы.

7. Преобразование $W = [w_i]_r \Rightarrow W^{\text{экв}}$ исходного вектора частных показателей в скалярный комплексный (эквивалентный, обобщенный) критерий предпочтения для преобразования исходной задачи многокритериальной оптимизации в задачу математического программирования со скалярным критерием.
8. Решение задачи поиска компромиссной альтернативы на Парето-оптимальном множестве альтернатив

$$w^* = \arg \min_{u \in U} (\max_{v \in V}) W^{\text{экв}}(u, v), u \in U, v \in V$$

с помощью выбранного метода математического программирования.

9. Принятие ЛПР решения о приемлемости полученного решения, или итерационный возврат к выполнению п. 2 – 8.

Особенности реализации этапов:

Этапы 1,2 реализуются совместно ЛПР и разработчиком системы. Компонентами векторного показателя могут выступать: функциональный (целевой), затратный, технологический, эксплуатационный, логистический, экологический и др. показатели.

Этап 3 реализуется разработчиком *одномоментно* («мозговой штурм») или *последовательно* во времени. Это наименее формализуемый этап, основу которого составляет креативные качества (природный интеллект) разработчика, его интуиция и опыт.

Этапы 4 – 6 реализуются разработчиком с использованием СППР.

Этап 7 – наиболее ответственный. Выбор метода скаляризации всегда должен производиться разработчиком с участием ЛПР.

Результатом этапа является использование или построение эмпирической модели ЛПР в виде некоторого конкретного метода скаляризации (например, метод линейной свертки, упорядочение частных критериев по «важности», метод ϵ – ограничений, метод последовательных уступок и др.)

Реализация **этапа 7** существенно различается при разработке системы для использования в составе надсистемы, или как объект продажи в условиях рыночной конкуренции.

В обоих случаях метод скаляризации выбирается в условиях **неопределенности** и **риска** репутационных, финансовых и других потерь как разработчика системы, так и ЛПР.

О негативном влиянии эффектов цифровизации

В эпоху цифровизации и повсеместного использования систем искусственного интеллекта при проектировании сложных систем порой возникает соблазн максимально сократить, или даже совсем исключить участие ЛПР из процедуры выбора и задания параметров метода скаляризации векторного критерия.

В настоящее время предложен ряд методик, базирующихся на методе линейной свёртки, в котором весовые коэффициенты при частных критериях не назначаются ЛПР, а задаются путем формального перебора комбинаций их статистически независимых и равновероятных значений.

Можно показать, что метод линейной свёртки совпадает с моделью скаляризации в виде искусственной нейронной сети (ИНС) с линейной активационной функцией, в которой весовые коэффициенты определяются путем обучения ИНС на заданной обучающей выборке комбинаций входов и выходов модели.

При этом обучение ИНС заменяется опытом ЛПР, «обученным» в ходе его предшествующей деятельности в роли разработчика систем рассматриваемого типа.

В связи с вышесказанным, непосредственное участие ЛПР в назначении весовых коэффициентов частных показателей является обязательным.

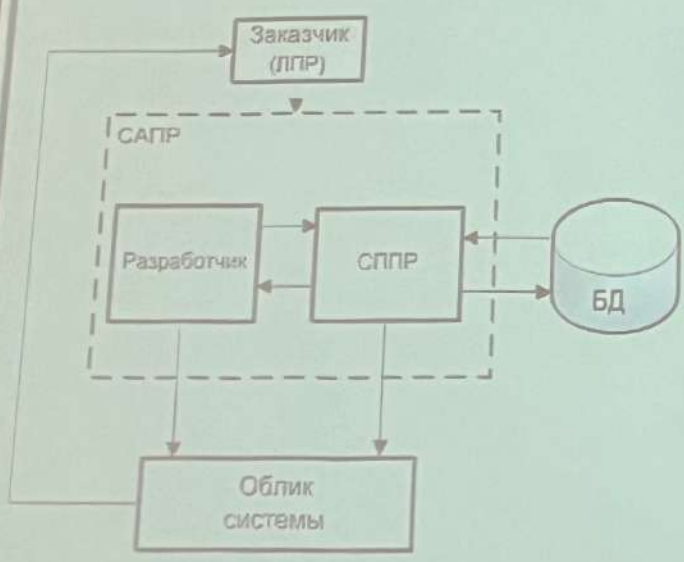


Схема взаимодействия «Заказчик – Разработчик – СППР»

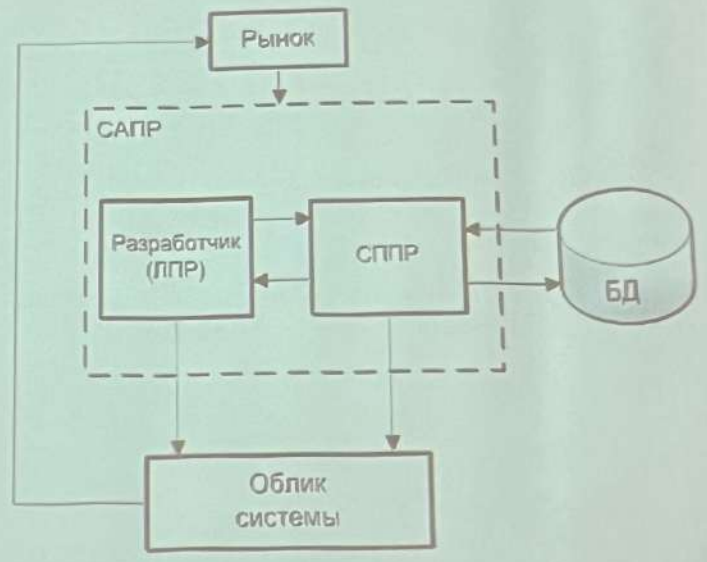


Схема взаимодействия «Рынок – Разработчик – СППР»

Общая структура математической модели

В наиболее общем виде *математическую модель* системы можно представить с помощью соотношения

$$w = F(u, v),$$

где w – *показатель эффективности* системы, который может быть *скалярным* (один) или *векторным* (несколько показателей, рассматриваемых совместно);

F – *оператор* модели (т.е. *математические соотношения*, с помощью которых вычисляется показатель w);

u – *альтернатива (вариант)* построения системы из множества альтернатив U ;

v – *факторы окружающей среды*, значимо (по мнению разработчика) влияющие на *рассматриваемый* показатель эффективности w .

Различные варианты математической модели и способы нахождения оптимальной альтернативы (т.е. решения задачи синтеза системы) определяются свойствами w , F , u и v .

Разработка математической модели системы

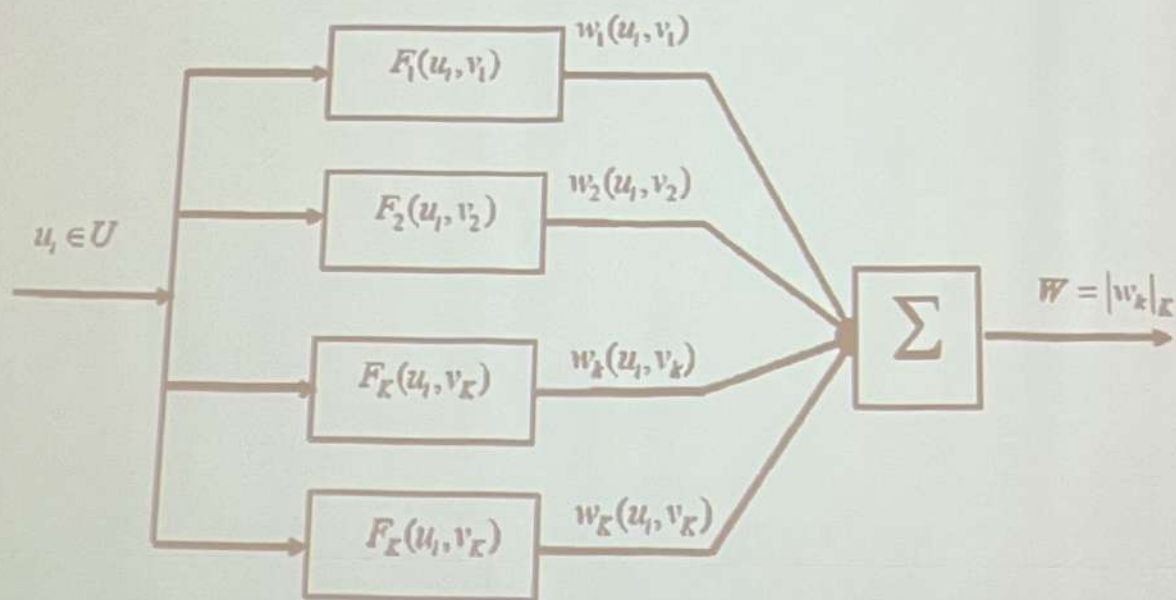


Рис. 1. Схема решения задачи анализа системы при **векторном** показателе ее эффективности

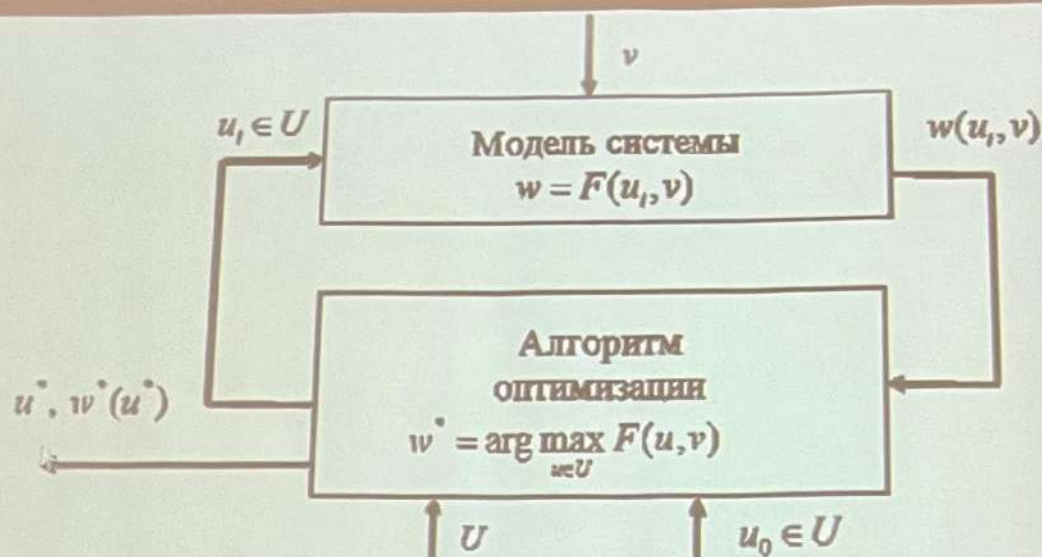


Рис. 2. Схема решения задачи синтеза системы при скалярном критерии ее эффективности

Процесс решения задачи оптимизации скалярного критерия с помощью **рекуррентного** алгоритма иллюстрирует структурная схема, показанная на рис. 2. На этом рис. u_0 - **начальное приближение**, которое должно быть задано при запуске алгоритма, u^* и $w^*(u^*)$ - результаты решения задачи оптимизации.

Множество альтернатив СТС

1) множество U — *дискретное*, состоящее из конечного числа N отдельных альтернатив u_i , т.е. $U = \{u_i, i = \overline{1, N}\}$, где i — номер альтернативы;

2) множество U — *непрерывное*, состоящее из заданного числа M параметров системы λ_m , $m = \overline{1, M}$. Параметры λ_m являются *действительными* величинами (т.е. в компьютерной терминологии относятся к классу *real*).

Каждый непрерывный параметр может быть *неограниченным*, т.е. принимать произвольные значения $\lambda_m \in [-\infty, +\infty]$, $m = \overline{1, M}$, или принадлежать *заданной области* возможных (*допустимых*) значений $D: \lambda_m \in [\lambda_{m \min}, \lambda_{m \max}]$, $m = \overline{1, M}$;

3) множество U — *смешанное*. Оно состоит из N дискретных альтернатив u_i , $i = \overline{1, N}$, каждая из которых, в свою очередь, содержит M_i непрерывных параметров λ_{im} , $i = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M_i}$.

Понятие окружающей среды моделирования

Как указывалось, при построении модели (моделей) необходимо учитывать все значимые («существенные», по мнению разработчика системы) *взаимодействия (целевые и вынужденные (нецелевые))* системы с окружающей средой на входе и на выходе.

Решение задач моделирования и синтеза системы зависит от *типа информации* о предполагаемой окружающей среде v , которой располагает разработчик системы на этапе ее разработки.

В зависимости от «качества» информации, учитываемой при построении модели системы, различают окружающую среду *двух* типов:

- *определенная (детерминированная)*, т.е. заранее точно *известная* разработчику системы;

- *неопределенная* (разработчику заранее точно *не известная*).

В случае если разработчик системы считает, что внешняя среда, которая будет влиять на работу системы, ему *точно известна*, т.е. он ее относит к классу «*детерминированная*», то показатель эффективности системы w также будет *детерминированной* функцией v и u .

Например, моделируя движение ЛА в земной атмосфере, разработчик ЛА на этапе проектирования может полагать, что параметры *атмосферы* (плотность, температура, скорость звука и т.д.) являются *определенными*, указанными в таблицах (моделях) *стандартной атмосферы*, хотя на самом деле все атмосферные параметры могут отличаться от их значений, представленных в таблицах, из-за ветра, турбулентности и т.п.

Окружающая среда считается *неопределенной*, если ее характеристики (свойства) разработчику системы *точно не известны*.

- Различают три основных типа неопределенностей факторов окружающей среды в зависимости от информации, которой может располагать исследователь:

1. **Статистически неопределенные факторы.** Эти факторы окружающей среды могут быть случайными событиями, величинами, функциями (процессами) или полями.
2. **Интервально неопределенные факторы.** О них разработчику системы заранее известны только интервалы (в общем случае области) их возможных значений.

Функционирование системы в присутствии интервально неопределенных факторов непосредственно влияет на решение задачи синтеза системы. Для решения задачи синтеза в подобной ситуации могут применяться следующие подходы: **максиминный (минимаксный)** подход или его модификации, а также **адаптивный** подход.

• Различают три основных типа неопределенностей факторов окружающей среды в зависимости от информации, которой может располагать исследователь:

1. **Статистически неопределенные факторы.** Эти факторы окружающей среды могут быть случайными событиями, величинами, функциями (процессами) или полями.
2. **Интервально неопределенные факторы.** О них разработчику системы заранее известны только интервалы (в общем случае области) их возможных значений.

Функционирование системы в присутствии интервально неопределенных факторов непосредственно влияет на решение задачи синтеза системы. Для решения задачи синтеза в подобной ситуации могут применяться следующие подходы: **максиминный (минимаксный)** подход или его модификации, а также **адаптивный** подход.

Максиминный подход (критерий **Вальда**) применяется в тех случаях, когда при синтезе системы необходимо выбрать постоянные значения структуры и параметров системы, характеризуемые альтернативой

$$u^* \in U$$

и обеспечивающие наилучшее (например, **максимальное**) значение скалярного показателя эффективности $w(u, v)$ при наихудшем сочетании значений факторов окружающей среды $v^* \in D$, приводящих к получению **наихудшего (минимального)** значения показателя.

Математическое решение задачи формирования системы с использованием **максиминного** подхода записывается в виде выражения:

$$\{u^*, v^*\} = \arg \max_{u \in U} \min_{v \in V} w(u, v)$$

Минимаксный (максиминный) подход особенно целесообразно применять при разработке уникальных (дорогостоящих) систем (проектов), реализуемых в одном-двух экземплярах.

Адаптивный подход предполагает возможность изменения структуры и параметров СТС в процессе ее функционирования в зависимости от текущих значений контролируемых факторов окружающей среды, влияющих на ее работу. Для реализации такого подхода необходимо измерять в реальном времени текущие значения неопределенных факторов окружающей среды $v(t)$ и реагировать на эти изменения соответствующими изменениями характеристик системы $u^*(t, v(t))$.

3. Многосторонний выбор. Часто могут возникать ситуации, в которых две или несколько систем создаются и управляются разными разработчиками (сторонами), преследующими **разные индивидуальные цели**.

Эти цели могут полностью совпадать (**кооперативный** выбор) или различаться до полной их противоположности (выбор **в конфликтной ситуации**) Возможны также промежуточные ситуации: **коалиционный** выбор, **компромиссный** выбор и т.д.

Задачи многостороннего выбора являются предметом изучения в **теории игр**, являющейся одним из разделов курса «**Исследование операций**».

Частью данного курса является **теория антагонистических игр**. В ней рассматриваются ситуации, когда в игре участвуют две стороны (А и В) с противоположными интересами (целями). Такие игры еще называют «**играми с нулевой суммой**».