

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АСУ КОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

**Баркарь Д.Ю.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Царев Р.Ю.**

*Сибирский федеральный университет*

Современные автоматизированные системы управления (АСУ), в том числе АСУ космических систем, представляют собой сложные системы, характеризующиеся комплексным взаимодействием элементов, рассредоточенных на значительной территории, включая космическое пространство, и требующих для своего развития существенных затрат ресурсов и времени.

Важнейшей проблемой, возникающей при анализе и синтезе подобных систем, является структурное построение системы управления, во многом определяющее свойства системы и характеристики ее функционирования. Разработка структуры системы при создании новых или совершенствовании существующих АСУ космических систем требует решения таких задач, как выбор существующих или создание новых пунктов управления космическими аппаратами, определение топологической структуры системы управления.

Однако при формировании структуры АСУ космических систем возникает неопределенность, обусловленная динамикой объекта управления при функционировании системы управления. Эта задача ввиду наличия неопределенности относится к задачам, требующим поддержки принятия решений при которой информация преобразуется к виду, упрощающему и облегчающему принятие решений.

### **Постановка задачи**

В информационных технологиях принятием решений считают набор решений в условиях определенности, позволяющих выбрать однозначные, непротиворечивые, корректные решения на основе формализованных моделей объектов управления и окружающей их среды. Для решения задачи структурного построения АСУ космической системы необходимо создание модельно-алгоритмических средств выбора пунктов управления космическими аппаратами, что требует разработки имитационных процедур принятия решений при синтезе системы управления космической системы.

### **Метод решения**

Топологическая структура АСУ космической системы определяет взаимное расположение и количество пунктов управления для заданных классов космических аппаратов (КА). Задача формирования топологической комплекса ПУ КА заключается в следующем: для заданных множеств КА различных классов  $E_{kA}$ , множества участков возможной доступности  $L$ , графика движения  $G_k$  и программы работ  $P_k$  КА каждого класса необходимо найти минимальную по затратам на создание совокупность

ПУ, чтобы при этом выполнялись требования к управляемости и коэффициенту доступности для заданных классов КА, загрузке ПУ специальные требования к системе (например, доступность на одном витке КА не менее чем двумя ПУ, минимально допустимое время нахождения КА в зоне какого-либо ПУ и т. д.). В результате решения данной задачи формирования определяется, какие ПУ необходимы в системе и с какими классами КА они будут взаимодействовать.

Для формализации задачи формирования топологической структуры АСУ космической системы дополнительно введем следующие обозначения:  $\theta_{kl}$  – время доступности КА  $k$ -го класса на  $l$ -м участке возможной доступности;  $c_j$  – затраты на создание  $j$ -го ПУ;  $\tau_{k \min}$  – минимально допустимая продолжительность одного сеанса связи для КА  $k$ -го класса;  $R_k$  – минимальное число ПУ, необходимых для управления КА  $k$ -го класса;  $L_{\mu k}$  – множество смежных участков доступности из  $L_k$  с непрерывным временем доступности для КА  $k$ -го класса;  $H_k$  – коэффициент доступности КА  $k$ -го класса, который определяется отношением общего времени доступности КА  $k$ -го

класса  $\tau_k = \sum_{j \in J_k} \tau_{kj}$  ко времени нахождения КА  $k$ -го класса над заданной территорией.

Введем переменные:

$$z_j = \begin{cases} 1, & \text{если в системе будет использован } j - \text{й ПУ;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$y_l = \begin{cases} 1, & \text{если в системе будет использован } l - \text{й участок возможной доступности;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Модель формирования топологической структуры системы имеет следующий вид:

$$\sum_{j \in J} c_j z_j \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

на коэффициент доступности для каждого класса КА:

$$\sum_{l \in L_k} \theta_{kl} y_l / \tau_k \geq H_k ; k \in K ; \quad (2)$$

на минимальное количество ПУ, необходимых для управления каждым классом КА:

$$\sum_{j \in J} z_j \geq R_k , k \in K ; \quad (3)$$

на минимальную продолжительность сеанса связи для КА  $k$ -го класса:

$$\sum_{l \in L_{\mu k}} \theta_{kl} y_l \geq \tau_{k \min} ; \quad (4)$$

на связь между переменными:

$$\sum_{j \in J_l} z_j \geq y_l \geq (1/|J_l|) \sum_{j \in J_l} z_j, l \in L. \quad (5)$$

Аналитическая часть задачи формирования (выражения (1)–(5)) представляет собой линейную целочисленную модель математического программирования, и варианты структуры АСУ космической системы могут быть получены с помощью известных методов. Выражения (2)–(5) задают множество аналитически заданных ограничений  $\beta'$ . Множество алгоритмически заданных ограничений  $\beta''$  задается при ограничениях на управляемость каждого класса КА и на загрузку пунктов управления. При проверке на допустимость по алгоритмически заданным атрибутам в качестве параметров имитационной модели выступают вариант комплекса ПУ КА  $X_i$ , программы работ КА каждого класса  $\Pi_k$ , объем информации, передаваемый за время осуществления управляющего взаимодействия между КА  $k$ -го класса и ПУ  $\xi_{kn}$ ,  $N_k$  – количество КА  $k$ -го класса, графика движения КА  $k$ -го класса  $G_k$ .

Для решения задача синтеза топологической структуры комплекса наземных пунктов управления АСУ космической системы, содержащей аналитически и алгоритмически заданные ограничения, разработана и программно реализована процедура, которая заключается в направленном переборе множества вариантов структуры, использующем схему «ветвей и границ», и последующей проверке их принадлежности множеству  $\beta'$ , осуществляемой с помощью имитационной модели.

Процесс поиска оптимального варианта структуры АСУ космической системы  $\overline{X}^{\text{опт}}$  можно представить в виде дерева вариантов, в котором нулевая вершина соответствует оптимальному решению  $\tilde{X}_0$ , а каждая из вершин, связанных с ней ребрами, соответствует другому ее решению при дополнительном условии, что переменной  $x_k^{mn}$  придано конкретное значение  $x_k^{mn} = \{0,1\}$ .

Каждой из вершин дерева соответствует оценка  $\gamma_k^{mn}$ , равная оптимальному значению целевой функции для соответствующей задачи. Необходимость в дальнейшем ветвлении вершины возникает в случае невыполнения условий целочисленности, при этом на следующем шаге ветвления выбирается вершина с наименьшей оценкой.

Каждая конечная вершина дерева соответствует варианту структуры АСУ космической системы  $\overline{X}_k \in \beta'$ , который с помощью имитационной модели проверяется на выполнение алгоритмически заданных ограничений. Процесс продолжается до тех пор, пока дальнейшее ветвление становится невозможным. Оптимальный вариант

структуры  $\overline{X}^{\text{опт}}$  соответствует конечной вершине, удовлетворяющей алгоритмически заданным ограничениям и имеющей наименьшую оценку  $\gamma_{\min}$ .

Основные особенности процедуры:

1. Разбиение множеств (ветвление). Правило выбора переменной для дальнейшего ветвления состоит в следующем. Для каждой переменных  $x_k^{m,n} \in \tilde{X}_n^m (k = \overline{1, K_n^m})$ , принявших нецелочисленное значение, вычисляются значения целевой функции  $f_0(\tilde{X}_{n,0}^m)$  и  $f_1(\tilde{X}_{n,1}^m)$  соответственно при значениях  $x_k^{m,n} = 0$  и  $x_k^{m,n} = 1$ . Для дальнейшего разбиения выбирается переменная, которая обеспечивает наибольшую абсолютную разность между полученными значениями целевой функции

$$\max \left\{ \Delta_k^{m,n} = \left| f_1(\tilde{X}_{n,1}^m) - f_0(\tilde{X}_{n,0}^m) \right|, k = \overline{1, K_n^m} \right\},$$

и ей присваивается значение, дающее наименьшее возрастание целевой функции.

2. Вычисление оценок (нижних границ). Для начального множества  $\tilde{\beta}_0$  оценка значения целевой функция снизу  $\gamma(\tilde{\beta}_0) = f(\tilde{X}_0)$ , где  $\tilde{X}_0$  – оптимальное решение оценочной задачи линейного программирования. Для множества  $\tilde{\beta}_n^m$  оценка  $\gamma(\tilde{\beta}_n^m) = f(\tilde{X}_n^m)$ , где  $\tilde{X}_n^m$  – оптимальное решение оценочной задачи,  $\tilde{X}_n^m \in \tilde{\beta}_n^m$ ,  $\gamma(\tilde{\beta}_n^m) = \infty$ .

### Выводы

В работе получил развитие имитационный подход к формированию автоматизированных систем управления космическими системами, предназначенный для выбора оптимального комплекса пунктов управления и топологии системы. Разработанный модельно-алгоритмический аппарат позволяет автоматизировать процесс выбора пунктов управления космическими аппаратами, определяя их минимально необходимое количество и рациональное распределение в пространстве. Метод выбора топологической структуры АСУ космической системы имеет важное значение для решения широкого спектра практических задач формирования структур сложных систем управления.