

**МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ
КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ АСУ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ***

Представлен комплекс моделей, предназначенных для планирования развития структуры АСУ космических систем. Особое внимание уделено повышению надежности АСУ космических систем за счет кластерной организации их архитектуры.

Ключевые слова: космическая система, кластерная архитектура, автоматизированная система управления.

Современный уровень развития автоматизированных систем управления космическими системами (АСУ КС) характеризуется усложнением структуры различных подсистем, что в первую очередь обусловлено ростом размеров и сложности процессов обработки и передачи информации, а также процессов управления как самими подсистемами, так и объектами управления. Это выдвигает ряд проблем, связанных с научно обоснованным построением структуры АСУ КС, эффективным формированием состава подсистем передачи и обработки информации [1].

Жизнеспособность АСУ КС в равной мере определяется как аппаратно-программными компонентами системы (надежностью их функционирования, сетевым и ресурсным обеспечением), так и информационными потоками и их возможностями. Коммуникационные и информационные технологии проектируемого пространства должны обеспечивать полноценный информационный обмен между структурными компонентами, такими как региональные станции, абонентские терминалы различных модификаций, центральная станция и т. п. Существенно, что ресурсы на создание компонентов структуры АСУ КС могут выделяться отдельно, в разные периоды времени, поэтапно. Иными словами, допустимо поэтапное финансирование и поэтапная реализация системы без противоречия ее главным характеристикам полезности [2].

Таким образом, при проектировании и создании информационной среды поддержки управления АСУ КС все большее значение и актуальность приобретает решение проблемы синтеза и планирования развития ее структуры.

Постановка задачи. Процесс развития информационно-технологической структуры представляется в виде набора путей на многодольном альтернативном графе, множество вершин которого отображает набор возможных категорий каждого центра управления (ЦУ) АСУ в заданные периоды, а множество дуг – возможные переходы из одной категории в другую. Задача планирования развития структуры информационно-коммуникационных технологий АСУ КС состоит в поиске оптимального плана развития информационного пространства системы управления, который определит моменты ввода ЦУ, структуру сети в каждый период планирования и потоки мощностей

между ЦУ 1-го и 2-го уровней иерархии с учетом динамики изменения потребностей абонентов каждого структурного подразделения в информационно-технологических работах и капитальных затратах на ее развитие.

Рассматривая динамическую модель планирования развития структуры информационных технологий АСУ КС, однокритериальную задачу можно представить как линейную задачу математического программирования с непрерывными и булевыми переменными. Для случая многоатрибутивной модели принятия решений необходима разработка комбинированных процедур, объединяющих стандартные методы принятия решений и специализированные алгоритмы [3].

Метод решения. Для формализации поставленной задачи введем следующие переменные величины: $x_{ikt} = 1$, если i -й ЦУ имеет k -ю категорию в t -й период планирования, $x_{ikt} = 0$ – в противном случае; y_{it} – величина потока мощности к i -му ЦУ 2-го уровня от соответствующего ЦУ 1-го уровня иерархии в t -й период планирования.

Обозначим через $q_{ikt} = Q_{it} - Q_k$ разность между мощностью, необходимой для удовлетворения потребностей в информационно-технологических работах абонентов i -го ЦУ в t -й период, и мощностью ЦУ k -й категории.

Пусть $\bar{q}_{ikt} = |q_{ikt}|$, тогда выражение, характеризующее степень удовлетворения центральной/региональной станцией (ЦУ заданного уровня) потребностей в информационно-технологических работах своих абонентов, имеет вид

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{I_R} \sum_{k=1}^K \left(\bar{q}_{jkt} x_{jkt} + \sum_{i \in I_j} (\bar{q}_{ikt} x_{ikt} - y_{it}) \right), \quad (1)$$

где I_R – количество ЦУ 1-го уровня; I_j – множество ЦУ 2-го уровня, имеющих каналы связи с j -м ЦУ 1-го уровня. Условия выбора для каждого ЦУ одной категории из допустимого множества формализуется в виде

$$\sum_{k=1}^K x_{ikt} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (2)$$

где I – общее количество ЦУ.

*Исследования выполнены в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Ограничения на потоки мощности между ЦУ 1-го и 2-го уровня имеют вид

$$0 \leq \sum_{i \in I_j} y_{it} \leq \sum_{k=1}^K \tilde{q}_{jkt} x_{jkt}, \quad j = \overline{1, I_R}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (3)$$

Это ограничение показывает, что суммарный поток мощности от ЦУ 1-го уровня к соответствующим ЦУ 2-го уровня не должен превышать избытка мощности j -го ЦУ 1-го уровня.

Условие того, что приток мощности к i -му ЦУ 2-го уровня не превышает дефицита мощности i -го ЦУ, имеет вид

$$0 \leq y_{it} \leq \sum_{k=1}^K q_{ikt} x_{ikt}, \quad i = \overline{1, T}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (4)$$

Обозначим через c_{it} пропускную способность коммуникационного канала i -го ЦУ в t -й период, тогда ограничение на поток данных по этому каналу имеет вид

$$c_{it} \geq d_{it}, \quad i = \overline{1, T}, \quad t = \overline{1, T},$$

где d_{it} – коэффициент, равный среднему объему передаваемой информации на единицу потока мощности.

Величина d_{it} может быть рассчитана, исходя из структуры распределенного информационного пространства АСУ КС и конкретных информационно-технологических задач, решаемых ЦУ в t -й период. В случае отсутствия такой информации экспертно определяются коэффициенты d_{it} .

Условие, ограничивающее набор возможных категорий i -го ЦУ в каждый t -й период, запишется в виде

$$\sum_{k=1}^K kx_{ikt} \leq K_{it}^*, \quad i = \overline{1, T}, \quad t = \overline{1, T},$$

где K_{it}^* – минимальная категория i -го ЦУ, полностью удовлетворяющая потребность i -го ЦУ в ИТР в t -й период.

Условие на минимально необходимое количество ЦУ в информационном пространстве системы в t -й период задается в виде

$$\sum_{i=1}^I x_{ikt} \leq M_t, \quad t = \overline{1, T},$$

где M_t – максимально допустимое количество ЦУ, не вводимых в эксплуатацию в t -й период.

Обозначим R_k – капитальные затраты на создание ЦУ k -й категории; R_i – доля участия i -го ЦУ в капитальных затратах на создание каналов связи; μ_i – коэффициент, учитывающий увеличение капитальных затрат на строительство ЦУ в особых районах страны (северных, сейсмичных и т. д.). Тогда капитальные затраты на создание комплекса средств информационных технологий АСУ КС формализуются в виде

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{I_R} \left(\mu_j \sum_{k=1}^K R_k x_{jkt} - R_k x_{jk(t-1)} \right) + \sum_{i \in I_j} \mu_i \left(\sum_{k=1}^K R_k x_{ikt} - R_k x_{ik(t-1)} \right). \quad (5)$$

В зависимости от конкретных особенностей постановок однокритериальных задач в качестве критерия оптимальности плана развития комплекса средств информационных технологий АСУ КС используются выражения (1) или (5). При использовании в качестве критерия выражения (1) целесообразно ввести коэффициенты, учитывающие важность информационно-коммуникационных и вычислительных работ, выполняемых i -м ЦУ. Она зависит от приоритетности структурных подразделений системы, обслуживаемых им. При этом накладываются ограничения на затраты по созданию комплекса средств информационных технологий (информационного пространства), задаваемые выражением (5).

Рассматриваемая модель позволяет проводить оптимизацию и анализ вариантов развития комплекса средств информационных технологий АСУ космических систем. Возможность применения стандартного математического обеспечения, как уже указывалось выше, ограничена большими размерностями задачи, поэтому целесообразно использовать специализированные алгоритмы. Это становится еще более актуальным, если рассматривать многоатрибутивную постановку задачи принятия решения при оценке вариантов развития информационных технологий АСУ КС.

Для решения задачи в упрощенной постановке может быть применен алгоритм, использующий графовую формализацию развития информационного пространства АСУ КС и основанный на процедуре просмотра вариантов решения, которая использует схему метода ветвей и границ.

В ряде случаев, с учетом возможного задания ряда ограничений задач как аналитически, так и алгоритмически, предлагается комбинированная процедура, объединяющая многоатрибутивные методы принятия решений и эвристические алгоритмы, построенные на основе схем направленного случайного поиска и регулярных процедур, используемых при решении однокритериальных задач оптимизации.

Предлагаемые модели, использующие графовую интерпретацию, могут быть использованы для оптимизации плана развития структуры информационного пространства АСУ КС в конкретной ситуации, например, на период 10–15 лет с разбивкой по 3–5 лет (устанавливается экспертно).

Проиллюстрируем применение предложенных подходов на примере. Исходя из конкретных требований развития АСУ КС, предполагалось в течение первого и второго периодов планирования развивать всю информационную сеть, в третий период – только ЦУ 1-го уровня, причем удовлетворение потребности в информационно-технологических работах абонентов ЦУ 2-го уровня проводится за счет включения коммуникационных каналов между ЦУ 2-го уровня и соответствующими ЦУ 1-го уровня. Для иллюстративного примера R_i приняты равными 0. Всего к концу планового периода должно быть создано шесть ЦУ 1-го уровня, 35 ЦУ 2-го уровня, ЦУ должны иметь сеть пунктов управления (ПУ). При этом ПУ может находиться в одной из шести категорий. Относительно сети ПУ вводятся следующие предположения:

– затраты на создание локальной сети с ПУ 4–6 категории включаются целиком в затраты соответствующего ЦУ в момент ввода его в строй;

– затраты на ввод в строй ПУ 1-й и 2-й категории включаются в затраты соответствующего ЦУ пропорционально удовлетворению потребности данного ЦУ и проводимым информационно-технологическим работам.

Задача планирования развития структуры комплекса информационных технологий АСУ КС при данных условиях имеет вид

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{I_R} \left(\delta_j \sum_{k=1}^K \bar{q}_{jkt} x_{jkt} + \sum_{i \in I_j} \delta_i \bar{q}_{ikt} x_{ikt} \right),$$

где $q_{ikt} = Q_{it} - Q_k - L_{ikt}$, а $q_{ikt} = q_{ikt}$, если $q_{ikt} > 0$ и $\bar{q}_{ikt} = 0$ – в противном случае; $L_{ikt} = Q_k Q_i / (\alpha Q_{it})$ – дополнительные мощности i -го ЦУ k -й категории в t -й период времени за счет вычислительных средств ПУ 1-й категории; Q_i – производительность всех ПУ 1-й категории i -го ЦУ; α – коэффициент пересчета объема информационно-технологических работ в производительность аппаратного комплекса, определяемый временем отладки, коэффициентом готовности и т. д.; δ_j – коэффициент, учитывающий важность j -го ЦУ.

При ограничениях на общие капитальные затраты, связанные с развитием информационной сети в t -й период задача имеет вид

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mu_i \left((R_k + M_{ikt}) x_{ikt} - (R_k - M_{ik(t-1)}) x_{ikt} + \varepsilon_i x_{ik(t-1)} \right) \leq R_t; \\ t = \overline{1, T},$$

где $M_{ikt} = Q_k R_i^* / (\alpha Q_{it})$ – добавка к стоимости i -го ЦУ k -й категории в t -й период, вносимая введением в строй ПУ 1-й и 2-й категорий; R_i – общие затраты на ПУ 1-й и 2-й категорий i -го ЦУ; ε_i – стоимость локальной сети i -го ЦУ с ПУ 4–6-й категорий и при ограничениях (2)–(4).

Большое значение в настоящее время в связи с повсеместной автоматизацией рабочих процессов придается совершенствованию структуры автоматизированных систем управления. Компьютерная система АСУ КС хранит основную информацию о работе подразделений и системы в целом, и выход ее из строя способен остановить работу всех служб. Очевидно, что такие жизненно важные системы должны обладать адекватным уровнем отказоустойчивости в рамках отведенных бюджетов [4].

Возможны два способа повышения доступности ресурсов программно-информационных технологий распределенных структур АСУ: путем увеличения индивидуальной надежности серверов и улучшения общесистемной отказоустойчивости [5]. В первом случае увеличивается надежность каждого элемента системы, что позволяет строить конфигурации высокой доступности из небольшого количества компонентов. Для построения надежной распределенной системы в рамках АСУ КС обычно используется большое количество не очень надежных компонентов, а высокая надежность всей системы достигается многократным дублированием. Также известны методы увеличения аппаратной надежности.

Однако основное внимание уделяется кластеризации. Имеются две реализации кластеров, обеспечивающих совместную работу нескольких компьютеров: аппаратная и программная. Аппаратный кластер предусматривает специальные компоненты для поддержки целостности кластера и обрабатываемых им данных. Программный позволяет реализовать кластер из универсальных серверов и сетевых технологий, но требует поддержки со стороны операционной системы: баланса загрузки, контроля работоспособности узлов, перераспределения ресурсов и решения других задач. Собственно аппаратные кластеры выпускаются уже давно, а сегодня начали появляться и программные кластеры.

Кластеры рассматриваются на качественно более высоком уровне – с точки зрения катастрофоустойчивости. Развитие катастрофоустойчивой архитектуры предполагает обеспечение защиты от незапланированных простоев во время и после катастрофы в географически распределенных узлах кластера, при которой отказ одного узла не приводит к прекращению работы всей системы.

В качестве примера рассмотрим АСУ, представляющую собой совокупность I кластеров. Обозначим номер кластера $i = \overline{1, I}$. Каждый кластер характеризуется катастрофоустойчивой категорией ($k = \overline{1, K}$), районным коэффициентом μ_i и потребностью в кластер-кворуме Q_{it} в момент времени t . На интервале времени T в каждый период планирования $t = \overline{1, T}$ выделяются материальные средства в размере R_t на развитие инфраструктуры системы кластеров. Районный коэффициент μ_i учитывает увеличение капитальных затрат на строительство кластера в особых районах (северных, сейсмических и т. д.).

Каждой категории k соответствует минимальное работоспособное значение целостности (кластер-кворум) Q_k и капитальные затраты (требуемые ресурсы) на развитие кластера R_k .

Обозначим через $q_{ikt} = Q_{it} - Q_k$ разность между требуемой минимальной целостностью i -го кластера в t -й период и кластер-кворумом k -й категории.

Пусть

$$\tilde{q}_{ikt} = \begin{cases} -q_{ikt}, & \text{если } q_{ikt} < 0; \\ 0, & \text{если } q_{ikt} \geq 0. \end{cases}$$

Тогда выражение, характеризующее степень превышения потребностей в устойчивости к нарушению целостности, выглядит следующим образом:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \tilde{q}_{ikt} \cdot x_{ikt}. \quad (6)$$

Условие выбора для каждого кластера одной категории из допустимого множества формализуется в виде

$$\sum_{k=1}^K x_{ikt} = 1; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{1, T},$$

где I – общее количество кластеров.

Условие, ограничивающее набор возможных категорий i -го кластера в каждый t -й период, выглядит так:

$$\sum_{k=1}^K k \cdot x_{ikt} \leq K_{it}^*; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{1, T},$$

где $K_{it}^* = \min_{Q_{it} \geq Q_k} k$ – минимальная категория, кластер-кворум которой полностью удовлетворяет потребности i -го кластера в t -й период планирования $k = \overline{1, K}$.

Учитывая районный коэффициент μ_i , ограничение на капитальные затраты в период времени t формализуется в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^I \mu_i \sum_{k=1}^K x_{ikt} \cdot (R_k \cdot x_{ikt} - R_k \cdot x_{ik(t-1)}) \leq R_t.$$

В рассматриваемом случае важным условием является удовлетворение потребительских запросов и поэтому в качестве критерия оптимальности плана развития используется выражение (6), взятое по минимуму:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \tilde{q}_{ikt} \cdot x_{ikt}.$$

Таким образом, план, обеспечивающий минимум дефицита надежности на всем интервале времени, выделенном на развитие системы, будет являться оптимальным.

Экспериментальная часть. С использованием алгоритмов расчета, изложенных в статье, разработан программный комплекс формирования гарантоспособных структур АСУ КС, включая комплекс имитационного моделирования для реализации функций модельного прототипа, анализа кластерной структуры и формирования плана ее развития.

Программная реализация решения задачи построена на нахождении оптимального плана в каждый конкретный период развития системы. При этом был введен ряд допущений:

- а) структура пунктов управления АСУ одинакова;
- б) изменение характеристик кластерной структуры происходит за один период планирования.

Программный комплекс состоит из трех частей:

- 1) имитационной модели;
- 2) блока анализа надежности кластерной структуры, импортирующего результаты измерений в базу данных;
- 3) блока планирования развития кластерной структуры.

Для построения плана развития кластерных структур используется модуль планирования развития. При этом необходимо произвести ввод количества этапов планирования и ввод сумм, которые могут быть использованы на каждом этапе. С помощью соответствующего элемента можно также разрешить перенос неиспользованных денежных средств на следующие этапы планирования. После этого можно просмотреть планируемое состояние кластерной структуры (см. рисунок).

Таким образом, система компьютерной поддержки позволяет реализовать функции модельного блока прототипов для выбора гарантоспособных компонентов кластерной структуры АСУ КС, а также провести ознакомление с предметной областью: многоатрибутивными методами повышения надежности структурно-избыточных информационно-управляющих подсистем АСУ КС.

Анализ возможностей кластеризации автоматизированных систем управления космическими системами показал, что решение задачи формирования плана развития структуры АСУ КС может быть реализовано в виде максимизации целевой функции на множестве состояний системы. Для решения данной задачи в рамках программного комплекса были разработаны и реализованы алгоритмы анализа надежности и формирования плана развития кластерной системы. Результатом является программный комплекс анализа надежности и формирования плана развития гарантоспособных кластерных структур АСУ КС.

Работа Информация
Количество периодов планирования 4

№ Периода	Период №1	Период №2	Период №3	Период №4
Выделяемые средства	200000	200000	200000	200000
Коз.фициент учитывания этапа	0	0	0	1
Использованные средства	170000	200000	219200	206800

Возможность переноса средств Оставшаяся сумма 4000
Текущее состояние: 5-е из 5 Предыдущее состояние ◀ ▶ Следующее состояние

Параметр структуры	Значение		Наработка на отказ, ч	Цена
Количество ЦОИ	4	Центры	10000	100000
Количество узлов в ЦОИ	2	Узлы	15000	40000
Количество дисков в узле	4	Диски	7500	4000
Количество арбитражеров	2	Арбитражеры	12500	180000
Количество хранимых разделов	8			
Готовность системы	99,99996			

Окно программы «Планирование развития кластерных структур» с результатом планирования на последнем этапе

Разработанный программный комплекс позиционируется как система поддержки принятия решения в управлении развитием кластерных структур автоматизированных систем управления космическими системами.

Полученный план развития кластерной структуры системы напрямую зависит от выбранных экспертом для исследования вариантов состояния системы. Поэтому сформированный с помощью программного комплекса план развития кластерной структуры АСУ КС является субоптимальным.

На основе проведенной работы можно заключить, что кластеризация автоматизированных систем управления космическими системами является эффективным способом повышения надежности работы системы в целом и, следовательно, гарантированности реализации функциональных задач автоматизированных систем управления космическими системами.

Библиографические ссылки

1. Прудков В. В. Программные средства автономной обработки подсистем блока управления перспективных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 1 (27). С. 7–9.
2. Носов В. И., Бактеев В. Н., Штанюк Л. А. Теория массового обслуживания // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 20–24.
3. Антамошкин О. А. Система поддержки принятия решений на основе многоатрибутивных методов // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 19–23.
4. Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Завьялова О. И. Формирование топологической структуры автоматизированной системы управления космическими системами // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2 (35). С. 82–86.
5. Шаймарданов Л. Г., Бойко О. Г. Метод решения задачи расчета надежности сложных систем при переменных параметрах потоков отказов агрегатов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3 (36). С. 131–133.

R. Yu. Tsarev, D. V. Kapulin, O. I. Zavialova, A. V. Demish

MODEL AND ALGORITHM CONFORMING OF PLANNING THE CLUSTER STRUCTURE OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF SPACE SYSTEMS

This paper presents a set of models for planning the development of automated control system of space systems. Particular attention is paid to improvement of reliability of automated control systems of space systems with respect to their clustered architecture organization.

Keywords: space system, cluster architecture, automated control system.

© Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Завьялова О. И., Демиш А. В., 2011

УДК 681.3

Е. А. Энгель

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ*

Применение классических математических методов для решения задач принятия решений затруднено, но эффективны интеллектуальные системы, представляющие собой синтез адаптивных и традиционных математических алгоритмов. На основе анализа существующих методологий интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений разработана модифицированная нечеткая нейросеть, устраняющая недостатки существующих методологий и более эффективная.

Ключевые слова: нечеткая нейронная сеть, принятие решений, интеллектуальные системы.

Анализ функционирования сложных технических объектов и систем и управление ими составляет основное содержание работы управленцев, аналитиков, специалистов в области обработки информации. Разработка методов и алгоритмов такого анализа и управления является предметом исследования многих направлений науки. Разработанные теории позволили и позволяют эффективно решать многие практические задачи как

обработки информации, так и управления. Однако всегда существовал и существует значительный класс реальных задач, для которых применение классических математических методов либо невозможно, либо затруднено. Это связано с естественным разрывом между предположениями, на которых базируются те или иные математические методы, и свойствами информации о реальных объектах реальной задачи.

*Исследования выполнены в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.