

# Кібернетика та системний аналіз

УДК 004.9

В.В. Бескорвайный<sup>1</sup>, З.А. Имангулова<sup>1</sup>, С.В. Петров<sup>2</sup>, А.В. Кошель<sup>3</sup>, А.С. Москаленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків

<sup>2</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

<sup>3</sup> Головний Центр Спеціального Контроля, Макаров-1 Київської обл.

## СИНТЕЗ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Рассматривается проблема оптимизации систем контроля крупномасштабных объектов. В рамках агрегативно-декомпозиционного подхода определены состав и схема взаимосвязи по входным и выходным данным задач их системного проектирования. Обоснована итерационная последовательность решения задач проблемы, составляющая основу логической схемы проектирования подобных объектов.*

**Ключевые слова:** крупномасштабный объект, система контроля, структура, топология, оптимизация, схема системного проектирования.

### Введение

**Постановка проблемы.** В процессах проектирования систем контроля крупномасштабных объектов, при их реорганизации или планировании их развития неизбежно возникают задачи синтеза их структуры. При этом синтезируются организационная, топологическая, функциональная, другие виды структур. Особую важность задачи структурного синтеза приобретают для систем контроля крупномасштабных объектов (КМО). Это связано с тем, что учет топологии объектов во многом определяет стоимостные и функциональные характеристики систем их контроля [1; 2]. В Главном Центре Спецконтроля задача синтеза сети наблюдения, состоящей из разноразмерных центров контроля (Главного центра, региональных центров, автономных и подвижных пунктов) может решаться с учетом требований по повышению точности определения места событий в заданных районах, по оперативности получения информации, по снижению затрат на создание разветвленной сети, по живучести системы. В качестве основных критериев оптимизации топологической структуры системы спецконтроля при синтезе и реинжиниринге рассматриваются: стоимость системы, стоимость получения информации, затраты на приобретение земельных ресурсов, полнота предоставляемых данных для принятия управленческих решений, вероятность того, что количество потребителей, обеспеченных информацией, будет не меньше заданного. Не менее

важна и задача определения оптимального количества элементов системы и места их размещения.

**Постановка задачи.** В процессах проектирования и реинжиниринга систем контроля КМО предполагается решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей подобных систем незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур. Для их решения используются точные (комбинаторные) и приближенные (в том числе эвристические) методы. Точные методы позволяют гарантированно найти оптимальное решение, однако, ввиду NP-сложности задач, они применимы только для оптимизации простейших систем с небольшим количеством элементов.

При этом задачи размещения узлов системы контроля решаются по различным критериям, с использованием различных целевых функций, в условиях различной размерности и степени определенности исходных данных, временных и ресурсных ограничений. Это требует разработки множества методов решения задачи проектирования, различающихся по показателям точности и сложности, имеющих меньшую временную сложность, чем комбинаторные методы и большую точность, чем существующие приближенные методы.

При реализации системного подхода в задачах проектирования подобных объектов одной из ос-

новних проблем является формализованное представление процесса решения совокупности взаимосвязанных задач проектирования. Такую формализацию удобно представлять в виде логической схемы построения глобального проектного решения [3; 4]. Предлагаемая технология решения задачи структурного синтеза систем контроля КМО базируется на идеях агрегативно-декомпозиционного подхода, системного анализа и системного проектирования сложных систем [3–5].

### Основной материал

На основе формализации целей системы контроля КМО и их декомпозиции на комплексы взаимосвязанных задач [6] предлагаются сетевая и математическая модель многокритериальной задачи ее структурного синтеза – задачи системного проектирования [7]. Множество возможных путей на сетевой модели, учитывающей взаимосвязи задач, представляет множество подмоделей, которые можно сформировать из ее элементарных составляющих. Степень агрегации моделей в процессе структурного синтеза определяется эффективностью используемых методов оптимизации и мощностью применяемых средств вычислительной техники. На основе полученной сетевой модели может быть построена логическая схема системного проектирования, определяющая очередность решения задач оптимизации системы контроля КМО. Для задания схемы проектирования системы контроля CirDes (от Circuit of designing) необходимо определить пятерку множеств [3–4; 8]

$$\text{CirDes} = (\text{Tasks}, \text{InDat}, \text{Res}, \text{DesDec}, \text{ProcDec}), \quad (1)$$

где  $\text{Tasks} = \{\text{Task}_i^1\}$  – (от Tasks of designing) упорядоченное множество задач проектирования;

$\text{Task}_i^1$  –  $i$ -я задача  $l$ -го уровня;

$\text{InDat}$  (от Initial data) – множество исходных данных;

$\text{Res}$  (от Restrictions) – множество ограничений;

$\text{DesDec}$  (от Design decisions) – множество проектных решений;

$\text{ProcDec}$  (от Procedures of the decision) – отображение, имеющее смысл решающей процедуры и ставящее каждой паре  $(\text{InDat}_i^1, \text{Res}_i^1)$  непустое подмножество  $\text{DesDec}$ , обозначаемое через  $\text{ProcDec}(\text{InDat}_i^1, \text{Res}_i^1)$ .

Все множество задач проектирования  $\text{Tasks}$  является полностью разрешимым, если для всех задач  $\text{Task}_i^1$  существуют проектные процедуры  $\text{ProcDec}_i^1$  и каждое проектное решение является единственным  $|\text{ProcDec}(\text{InDat}_i^1, \text{Res}_i^1)| = 1$ .

Основными задачами, связанными с решением вопросов системного проектирования систем контроля КМО, являются [6; 8]:  $\text{Task}_1^2$  – выбор принципов построения КМО;  $\text{Task}_2^2$  – выбор структуры системы;  $\text{Task}_3^2$  – определение топологии элементов и связей;  $\text{Task}_4^2$  – выбор технологии функционирования;  $\text{Task}_5^2$  – определение параметров элементов и связей;  $\text{Task}_6^2$  – оценка эффективности вариантов и выбор решений.

В процессе анализа взаимосвязей моделей в комплексе выделенных задач системного проектирования каждую из моделей удобно представлять в виде

$$\text{ModTask}_i^2 : \{\text{InDat}_{iE}^2, \text{InDat}_{iI}^2, \text{Res}_i^2\} \rightarrow \rightarrow \text{DesDec}_i^2, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (2)$$

где  $\text{ModTask}_i^2$  (от Model of task) – модель  $i$ -й задачи 2-го уровня;

$\text{InDat}_{iE}^2$  – множество формализованных внешних (по отношению к комплексу задач) исходных данных;

$\text{InDat}_{iI}^2$  – множество формализованных внутренних (по отношению к комплексу задач) исходных данных;

$\text{Res}_i^2$  – множество формализованных ограничений;

$\text{DesDec}_i^2$  – проектное решение.

В результате анализа комплекса задач установлено, что внешние (по отношению к комплексу задач) исходные данные моделей всех задач являются одинаковыми [8]:

$$\text{InDat}_{iE}^2 = \{\text{ObjS}, K\}, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (3)$$

где  $\text{ObjS}$  – множество формализованных характеристик элементов;

$K$  – множество критериев для оценки и выбора вариантов построения системы контроля.

В модели задачи выбора принципов построения системы контроля внутренние исходные данные не используются, т.е.  $\text{InDat}_{iI}^2 = \emptyset$ . Система ограничений и выходные данные модели этой задачи имеют вид

$$\text{Res}_i^2 = \{Q^*, C^*, \Pi, S'\}, \quad \text{DesDec}_i^2 = \{\pi, S^*\}, \quad (4)$$

где  $Q^*$  – требуемый уровень эффекта системы;

$C^*$  – ограничения на ресурсы (стоимость) системы контроля;

$\Pi$  – множество допустимых принципов построения системы;

$S' = \{s\}$  – область существования системы, определяемая множествами элементов  $E'$ , отношений  $R'$  и топологий  $G'$ ;

$\pi \in \Pi$  – выбранные принципы построения системы;

$S^* = \{s\}$  – область допустимых вариантов построения системы, задаваемая множествами элементов  $E^*$ , отношений  $R^*$  и топологий  $G^*$  исходя из выбранных принципов построения  $\pi \in \Pi^*$ .

Системы ограничений в моделях задач  $Task_2^2$  –  $Task_6^2$  совпадают и имеют вид

$$Res_i^2 = \{Q^*, C^*, S^*\}, i = \overline{2, 6}. \quad (5)$$

Множества формализованных входных (внутренних) и выходных данных задачи выбора структуры системы контроля  $Task_2^2$  имеют вид

$$InDat_{21}^2 = \{A, B\}, DesDec_2^2 = \{|E|, R, s_{ER}, K(s_{ER})\}, \quad (6)$$

где  $A$  – технология функционирования системы;

$B$  – множество параметров элементов и отношений;

$|E|$  – количество элементов системы;

$R$  – множество связей между элементами системы;

$s_{ER}, K(s_{ER})$  – вариант построения системы контроля, полученный путем оптимизации количества элементов  $|E|$  и связей между ними  $R$ , а также оценка его свойств по множеству критериев  $K$ .

Множества формализованных входных (внутренних) и выходных данных задачи определения топологии элементов и связей системы контроля  $Task_3^2$  включают в себя

$$InDat_{31}^2 = \{E, R, A, B\}, DesDec_3^2 = \{G, s_G, K(s_G)\}, \quad (7)$$

где  $G, s_G, K(s_G)$  – соответственно множество топологических характеристик системы, вариант ее построения с оптимизированной топологией и его покритериальная оценка.

Множества формализованных входных (внутренних) и выходных данных задачи выбора технологии функционирования системы  $Task_4^2$  могут быть представлены в виде

$$InDat_{41}^2 = \{E, R, G, B\}, DesDec_4^2 = \{A, s_A, K(s_A)\}, \quad (8)$$

где  $A, s_A, K(s_A)$  – соответственно множество алгоритмов, определяющих технологию функционирования системы, вариант ее построения с оптимизированной технологией и его многокритериальная оценка.

Множества формализованных входных (внутренних) и выходных данных задачи определения параметров элементов и связей  $Task_5^2$  могут быть представлены в виде

$$InDat_{51}^2 = \{|E|, R, G, A\}, DesDec_5^2 = \{B, s_B, K(s_B)\}, \quad (9)$$

где  $B, s_B, K(s_B)$  – соответственно множество параметров элементов и связей системы, вариант ее по-

строения с оптимизированными значениями параметров и его покритериальная оценка.

Множества формализованных ограничений, входных (внутренних) и выходных данных задачи оценки эффективности вариантов и выбора решений  $Task_6^2$  могут быть представлены в виде

$$InDat_{61}^2 = \{E, R, G, A, S^*\}; DesDec_6^2 = \{s^0, K(s^0)\}, \quad (10)$$

где  $s^0, K(s^0)$  – соответственно лучший вариант построения системы контроля (глобальное проектное решение) и его покритериальная оценка.

Процессы проектирования строятся по параллельной, последовательной или комбинированной схемам.

В параллельной схеме проектирования все множество задач  $Task_i^2, i = \overline{1, 6}$  должно быть полностью определено заданием множеств входных данных  $InDat_i^2$ , ограничений  $Res_i^2$  и решающих процедур  $ProcDec_i^2$  на исходном этапе проектирования. При этом полностью параллельная схема допускает любую упорядоченность задач [3–4].

Проведенный анализ входных и выходных данных моделей комплекса задач системного проектирования показал, что все они теснейшим образом связаны между собой по внутренним входным и выходным данным [6]. Установленная схема их взаимосвязи позволяет сделать вывод о неприменимости параллельной схемы системного проектирования КМО. Решение этой задачи целесообразно строить на основе последовательной итерационной схемы системного проектирования [3–4]. При этом из полученного проектного решения  $DesDec_i^1$  очередной задачи  $Task_i^1$  формируются исходные данные  $InDat_{i+1}^1$  или ограничения  $Res_{i+1}^1$  в решающей процедуре  $ProcDec_{i+1}^1$  для следующей задачи  $Task_{i+1}^1$ . Таким образом, осуществляется "замыкание" задач последовательной схемы

$$\exists DesDec_i^1 \in DesDec \text{ Tr}(InDat_{i+1}^1 \vee Res_{i+1}^1 \in DesDec_i^1), \quad (11)$$

где  $DesDec$  – множество проектных решений;

$\text{Tr}$  (от True) – истинность высказывания  $(InDat_{i+1}^1 \vee Res_{i+1}^1 \in DesDec_i^1)$ .

При определении очередности решения задач системного проектирования  $Task_i^2, i = \overline{1, 6}$  в рамках последовательной схемы следует стремиться к минимизации степени их неразрешимости по исходным данным и минимизации сложности создаваемой процедуры [8].

Таким образом, задача выбора принципов построения систем контроля  $\text{Task}_1^2$ , определяющая ограничения на множество допустимых вариантов ее построения  $S^*$  для всех задач, должна решаться прежде других.

Задача оценки эффективности вариантов и выбора глобального решения  $\text{Task}_6^2$  использует выходные данные (проектные решения) всех других задач комплекса и поэтому должна решаться в последнюю очередь.

Определение топологии системы контроля (задача  $\text{Task}_3^2$ ) невозможно без знания ее организационной или функциональной структуры, определяемой в результате решения задачи  $\text{Task}_2^2$ . Следовательно, решение задачи  $\text{Task}_2^2$  должно предшествовать решению задачи  $\text{Task}_3^2$ .

Ввиду того, что система может быть построена на разнотипных элементах и связях между ними, а элементы могут использовать различные алгоритмы функционирования, задачи их определения  $\text{Task}_5^2$  и  $\text{Task}_4^2$  должны решаться после задачи  $\text{Task}_2^2$ , в рамках которой определяется их количество.

Так как окончательный выбор технологии функционирования может быть осуществлен только с учетом топологии системы контроля, то решение задачи выбора технологии  $\text{Task}_4^2$  должно следовать за решением соответствующей задачи  $\text{Task}_3^2$ .

Решение задачи выбора технологии функционирования  $\text{Task}_4^2$  можно получать как до, так и после выбора параметров элементов и связей системы ( $\text{Task}_5^2$ ). Однако в последнем случае могут чаще возникать ситуации невыполнения ограничений при заданных значениях параметров элементов и связей, требующие изменений ранее полученных проектных решений (повторных решений предыдущих задач). Поэтому предлагается решать задачу параметрического синтеза  $\text{Task}_5^2$  после решения задачи технологического синтеза  $\text{Task}_4^2$ , полученного в условиях максимальных (наименее жестких ограничений) значений параметров.

В качестве элементарного звена, на базе которого будет производиться упорядочение задач системного проектирования систем контроля КМО, предлагается использовать ячейку проектирования. Ячейка проектирования описывает принципиально разрешимую с помощью определенной решающей процедуры  $\text{ProcDec}_i^1$  задачу  $\text{Task}_i^1$  по ее исходным данным  $\text{InDat}_i^1$  и ограничениям  $\text{Res}_i^1$ . При этом про-

ектные решения задачи  $\text{DesDec}_i^1$  представляются в категориях модели  $\text{ModTask}_i^1$  и допускают сравнение по множеству критериев  $K$  [3]. Ячейка может рассматриваться в качестве схемы представления проектной процедуры в виде

$$\begin{aligned} \text{Task}_i^1 : \text{ProcDec}_i^1 \{ \text{InDat}_i^1, \text{Res}_i^1 \} \rightarrow \\ \rightarrow \text{DesDec}_i^1 / \text{ModTask}_i^1. \end{aligned} \quad (12)$$

На основании результатов проведенного анализа сетевой модели задачи системного проектирования системы контроля КМО (2–10) по ограничениям, входным и выходным данным [6] предлагается следующая цепочка ячеек в схеме решения задачи проектирования системы

$$\begin{aligned} \text{Task}_1^2 \rightarrow \text{Task}_2^2 \rightarrow \text{Task}_3^2 \rightarrow \text{Task}_4^2 \rightarrow \\ \rightarrow \text{Task}_5^2 \rightarrow \text{Task}_6^2. \end{aligned} \quad (13)$$

На основании полученной последовательности задач (13) может быть построена последовательная схема системного проектирования системы контроля КМО. Для ее реализации требуется доопределение исходных данных задач  $\text{Task}_2^2$ ,  $\text{Task}_3^2$  и  $\text{Task}_4^2$ . Решения этих задач в предложенной схеме могут быть получены только исходя из прогнозных или экспертных исходных данных  $\text{InDat}_i^2$  и ограничений  $\text{Res}_i^2$ ,  $i = \overline{2, 4}$ . Следовательно, на ее основе могут быть получены только локально оптимальные проектные решения.

Для практического применения предложенной схемы системного проектирования системы контроля КМО (13) целесообразно преобразовать предложенную схему в итерационную схему получения общего проектного решения  $\text{DesDec}_2^1$ , позволяющую формировать недостающие исходные данные по результатам решений предыдущей итерации [9]. При этом может быть существенно повышено качество решений частных и общей задач системного проектирования систем контроля.

Предложенный вариант логической схемы системного проектирования систем контроля крупномасштабных объектов использован при решении задач проектирования и реинжиниринга, проектировании информсистем и систем обслуживания [2; 10–11].

## Выводы

Для снижения временной сложности и повышения точности приближенных методов структурно-топологической оптимизации применены: предварительное определение множества элементов, на базе которых целесообразно создавать узлы (анализ матрицы ближайших соседей, анализ минимального стягивающего дерева, анализ стягивающего дерева

связывающего элементы с центром) системы; предварительная оценка оптимального количества узлов системы; предварительная кластеризация объектов мониторинга (k-means, c-means, k-means++); перезапуск алгоритмов с множеством различных начальных размещений элементов и (или) узлов системы (процедура Multi-start); метаэвристики, предполагающие улучшение решения путем временного отхода к худшему варианту, что позволяет выходить из локального оптимума.

Практическое применение полученных результатов позволяет сократить сроки решения задач проектирования и планирования развития объектов, сократить затраты на их создание и эксплуатацию, за счет совместного решения задач повысить качество решений и на этой основе улучшать функциональные характеристики создаваемых объектов. Это приведет в процессе выполнения поставленных задач Главного Центра Спецконтроля к повышению точности определения места событий в заданных районах, позволит определить оптимальное количество элементов системы и места их размещения

### Список литературы

1. Цвиркун А.Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. Синтез и планирование развития / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев. – М.: Наука, 1993. – 160 с.
2. Петров Э.Г. Территориально распределенные системы обслуживания / Э.Г. Петров, В.П. Пискалова, В.В. Бескоровайный. – К.: Техника, 1992. – 208 с.
3. Построение современных систем автоматизированного проектирования / К.Д. Жук, А.А. Тимченко, А.А. Родионов и др. – К.: Наук. думка, 1983. – 248 с.
4. Тимченко А.А. Основы системного проектирования та аналізу складних об'єктів: У 2-х кн. Кн. 1. Основы САПР та системного проектирования складних об'єктів / А.А. Тимченко; за ред. В.І. Бикова. – К.: Либідь, 2000. – 272 с.

5. Цвиркун А.Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. Оптимизационно-имитационный подход / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, В.А. Филиппов. – М.: Наука, 1985. – 174 с.

6. Бескоровайный В.В. Разработка системологической модели проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подоляка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 3(75). – С. 37-42.

7. Бескоровайный В.В. Разработка модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подоляка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 4(76). – С. 49-55.

8. Бескоровайный В.В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов / В.В. Бескоровайный // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 3. – С. 94-96.

9. Бескоровайный В.В. Формирование и выбор решений задачи системного проектирования территориально распределенных систем обработки информации / В.В. Бескоровайный // Системи обробки інформації. – 2002. – Вип. 6 (22). – С. 243-247.

10. Beskorovainyi V. Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems / V. Beskorovainyi, K. Podoliaka // ECOTECHMOD. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 13-18.

11. Бескоровайный В.В. Метод реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подоляка // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 204-209.

Поступила в редколлегию 10.10.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков.

### СИНТЕЗ ЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ ОБ'ЄКТІВ

В.В. Безкоровайний, З.А. Імангулова, С.В. Петров, А.В. Кошель, А.С. Москаленко

Розглядається проблема оптимізації систем контролю великомасштабних об'єктів. У рамках агрегативно-декомпозиційного підходу визначено склад і схему взаємозв'язку по вхідних і вихідних даним задач їх системного проектування. Обґрунтовано ітераційну послідовність розв'язання задач проблеми, яка складає основу логічної схеми проектування подібних об'єктів.

**Ключові слова:** великомасштабний об'єкт, система контролю, структура, топологія, оптимізація, логічна схема системного проектування.

### SYNTHESIS LOGIC SCHEME SYSTEMS DESIGN OF LARGE-SCALE OBJECTS MONITORING SYSTEMS

V.V. Bezkorovainyi, Z.A. Imangulova, S.V. Petrov, A.V. Koshel, A.S. Moskalenko

In paper considered the problem of optimization of large-scale objects control systems. The framework aggregation-decomposition approach to determine the composition and the relationship diagram for the input and output of the tasks of system design. Substantiates the sequence of iterative solving problems is the basis of the logic circuit design of such objects.

**Keywords:** large-scale object, monitoring system, structure, topology, optimization, logic scheme systems design.