

УДК 004: 519.876

# ФОРМИРОВАНИЕ И ВЫБОР РЕШЕНИЙ В ПРОЕКТАХ ОПТИМИЗАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.т.н. В.В. Бескорвайный, А.С. Москаленко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

На основе анализа особенностей проблемы структурной оптимизации крупномасштабных объектов, выполнена ее трехуровневая декомпозиция на комплекс задач мета-, макро- и микроуровня. На выделенном множестве задач предложена схема технологии их системного проектирования, позволяющая производить формирование, многофакторное оценивание и выбор проектных решений.

На основі аналізу особливостей проблеми структурної оптимізації великомасштабних об'єктів, виконана її трирівнева декомпозиція на комплекс задач мета-, макро- і мікрорівня. На виділеній множині задач запропонована схема технології її системного проектування, що дозволяє виконувати формування, багатofакторне оцінювання та вибір проектних рішень.

Based on the analysis features of the problem of structural optimization of large-scale objects, made it a three-level decomposition of the complex problems of the meta, macro and micro level. On the set of selected tasks of the scheme of their technology system design, which allows producing formation, multifactorial assessment and selection of design solutions.

**Ключевые слова:** крупномасштабный объект, структура, топология, проект, оптимизация, технология системного проектирования.

## Введение

В процессе проектирования крупномасштабных объектов (КМО), при их реорганизации или планировании развития неизбежно возникают задачи оптимизации их структур. При этом предполагается синтез или оптимизация существующей организационной, топологической, функциональной, других видов структур. Важность подобных задач возрастает для территориально распределенных, крупномасштабных объектов (транспорта, связи, управления, обработки информации). Учет топологии служит еще одним фактором, влияющим на стоимостные и функциональные характеристики подобных объектов. Это требует совместно с традиционными задачами структурного синтеза решать комплексы задач топологической оптимизации систем и, таким образом, приводит к проблеме структурно-функционально-параметрического и топологического синтеза [1-4].

В современных условиях, характеризующихся быстрым изменением экономических и технологических условий, приобретают актуальность проекты планирования эффективного развития и реинжиниринга существующих крупномасштабных объектов.

Важность проблемы выбора обоснованных решений на всех этапах жизненных циклов крупномасштабных объектов, требуемые при этом значительные материальные, временные и финансовые

затраты, делают актуальными задачи совершенствования методологии формирования и выбора эффективных решений в проектах их оптимизации с учетом множества разнородных факторов и изменяющихся условий.

## Декомпозиция проблемы оптимизации крупномасштабных объектов

Традиционно проблема структурного синтеза систем рассматривается методом, состоящим из совокупности неполностью определенных задач проектирования, для которых не сконструированы схемы проектирования и не синтезированы модели проектирования, что позволяет отнести ее к числу слабоструктурированных [5]. Сложность КМО не позволяет создавать их единое формализованное описание в виде модели и находить по нему эффективное проектное решение в рамках единой проектной процедуры.

Существующие методологии структурного синтеза КМО базируются на идеях агрегативно-декомпозиционного и блочно-иерархического подходов, предполагающих разбиение описания объекта по степени детализации на иерархические уровни и аспекты, а процесса проектирования – на группы проектных процедур, связанных с получением и преобразованием описаний (решений) относительно выделенных уровней и аспектов с последующим их объединением (агрегацией) для получения на соответствующем уровне решений по системе в целом [6].

Будем представлять рассматриваемую проблему в качестве метазадачи *MetaTask*, состоящей из множества задач, относящихся к различным иерархическим уровням декомпозиции, с их взаимосвязями по исходным данным и результатам решения [7, 8]

$$MetaTask = \{Task^l\}, \quad Task^l = \{Task^l_i\}, \quad i = \overline{1, i_l}, \quad l = \overline{1, n_l}, \quad (1)$$

где  $Task^l$  – множество задач синтеза, относящихся к уровню  $l$ ;  $n_l$  – количество уровней описания КМО;  $i$  – номер задачи (этапа, стадии проектирования);  $i_l$  – количество задач, подлежащих решению на уровне  $l$ .

Каждую из задач на этом этапе будем представлять в виде некоторого преобразователя данных

$$Task^l_i := In_i^l \rightarrow Out_i^l, \quad i = \overline{1, i_l}, \quad l = \overline{1, n_l}, \quad (2)$$

где  $In_i^l, Out_i^l$  – соответственно входные и выходные данные  $i$ -й задачи  $l$ -го уровня.

При этом каждую из выделенных задач

$$Task^l_i, \quad i = \overline{1, i_l}, \quad l = \overline{1, n_l}$$

можно представить в виде множества взаимосвязанных подзадач

$$Task^l_i = \{Task^l_{ij}\}, \quad j = \overline{1, j_i},$$

где  $j_i$  – количество подзадач задачи  $Task^l_i$ .

Системологический анализ проблемы синтеза КМО и обзор ее современного состояния позволяют

сделать вывод о целесообразности использования в конструкторском и технико-экономическом аспектах трех степеней детализации их описания на *мета-, макро- и микроуровнях* [7].

На *метауровне* проблема *MetaTask* рассматривается в целом, анализируется ее место среди других проблем управления муниципального, ведомственного, регионального или другого масштаба.

Большинство задач *макроуровня* по своей сути являются задачами системного проектирования и отличаются ограничениями, отражающими специфику основных этапов жизненного цикла КМО [4, 7]:

$$Task^1 = \{Task_i^1\}, i = \overline{1,5},$$

где  $Task_1^1$  – формирование требований к КМО и разработка технического задания на проектирование (оптимизацию);  $Task_2^1$  – системное проектирование;  $Task_3^1$  – планирование развития;  $Task_4^1$  – структурная адаптация;  $Task_5^1$  – реинжиниринг КМО.

Основными задачами, связанными с решением вопросов системного проектирования крупномасштабных объектов, являются [4]:

$$Task_2^1 = \{Task_i^2\}, i = \overline{1,6},$$

где  $Task_1^2$  – выбор принципов построения объектов;  $Task_2^2$  – выбор структуры объектов;  $Task_3^2$  – определение топологии элементов и связей;  $Task_4^2$  – выбор технологии функционирования;  $Task_5^2$  – определение параметров элементов и связей;  $Task_6^2$  – оценка эффективности вариантов и выбор решений.

**Итерационная схема технологии системного проектирования крупномасштабных объектов**

В процессе разработки метода формирования решений для базовой задачи системного проектирования КМО необходимо провести анализ ее разрешимости на трех уровнях: по входам, по ресурсам, по процессу [5]. Из разрешимости задачи на каждом из уровней будет следовать ее разрешимость в целом. При этом следует учитывать характерные особенности задач системного проектирования КМО [4]: тесная взаимосвязь задач структурного, топологического, параметрического, технологического синтеза, требующая их совместного решения; комбинаторный характер большинства входящих в ее состав задач (подзадач); необходимость решения задач большой размерности; наличие в постановках задач трудно формализуемых факторов; высокая динамичность или неопределенность исходных данных; широкий диапазон условий решения задач.

Анализ приведенных выше особенностей задач позволяет сформулировать требования, которым должны удовлетворять эффективные методы и процедуры их решения.

1. Тесная взаимосвязь задач и неполная информационная определенность задач выбора принципов построения КМО, структурного, топологического, параметрического и технологического синтеза, а также анализа и выбора проектных решений  $Task_i^2$  по наборам исходных данных  $InDat_i^2$  и ограничений  $Res_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$  обуславливает итерационный

характер методов и процедур их решения. Таким образом, обеспечивается разрешимость задач  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$  по входам.

2. Высокая сложность методов решения (решающих процедур)  $MetDec_i^2$ , обусловленная комбинаторным характером большинства задач  $Task_i^2$ , и широкий диапазон условий их решения требуют при их решении использования множества методов  $\{MetDec_{ik}^2\}$ ,  $i = \overline{1,6}$ , имеющих различную сложность и точность решения. Это обеспечит разрешимость задач системного проектирования по ресурсам.

3. Для более полного использования опыта проектировщиков и учета трудноформализуемых факторов процесс решения целесообразно строить на основе интерактивных (человеко-машинных) процедур. Процесс поиска проектного решения при этом будет состоять из взаимодополняющих процедур автоматического и интеллектуального синтеза с участием оператора.

4. На всех этапах проектирования целесообразно использовать приемы, снижающие трудоемкость решения задач системного проектирования  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$ .

С этой целью могут быть использованы различного рода эвристики, учитывающие специфику задач, решения, полученные с помощью «быстрых» процедур, формальные или экспертные оценки.

С учетом выделенных особенностей задач и перечисленных требований к процедурам их решения, определенной последовательности решения задач, а также аксиом системного проектирования [5] метод формирования решения задачи системного проектирования предлагается строить на основе итерационной логической схемы (рис.1) [9].

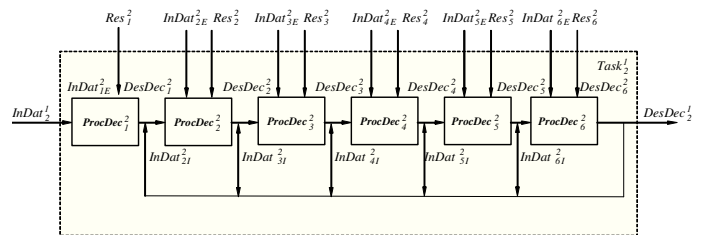


Рис. 1. Итерационная схема системного проектирования КМО

Вследствие неразрешенности задач по данным в линейной последовательности  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{2,5}$  формирование входных данных  $InDat_i^2$  и ограничений  $Res_i^2$  для них на начальной итерации осуществляется на основе экспертных данных. На других итерациях в качестве входных данных  $InDat_i^2$  и ограничений  $Res_i^2$  будут использоваться результаты решения других задач  $DesDec_j^2$ ,  $j > i$ ,  $i = \overline{1,5}$  последовательной схемы.

Суть метода системного проектирования КМО на основе итерационно-последовательной схемы логического проектирования может быть представлена следующим образом [10].

1. Начало решения. Ввод исходных данных  $InDat_1^2$  и ограничений  $Res_1^2$  задачи  $Task_1^2$ .

2. Формирование стратегии поиска решения.
3. Выбор варианта структуры системы (задача  $Task_2^2$ ).
4. Определение топологии элементов и связей (задача  $Task_3^2$ ).
5. Выбор технологии функционирования (задача  $Task_4^2$ ).
6. Определение параметров элементов и связей (задача  $Task_5^2$ ).
7. Проверка ограничений задачи  $Task_2^1$ . Если оценки свойств полученного варианта построения объекта по множеству критериев  $K(s)$  не удовлетворяют ограничениям задачи  $Res_2^1$ , перейти к п.3.
8. Оценка эффективности и выбор лучшего из сформированных варианта.
9. Если стратегия поиска решения не исчерпана, переход к п.3.
10. Формирование решений проектировщиком, оценка их эффективности и выбор лучшего варианта.
11. Окончание решения. Определены лучший вариант построения КМО  $s^o$  и его оценка по множеству частных критериев  $K(s^o)$ .

Исходные данные  $InDat_2^1$  и ограничения  $Res_2^1$  включают:  $K$  – множество частных критериев, используемых для оценки эффективности КМО;  $Q^*, C^*$  – предельные уровни показателей эффекта и стоимости КМО;  $S' = \{s\}$  – подмножество вариантов, определяющих область существования КМО;  $\Pi$  – возможные принципы построения КМО.

Стратегия поиска решения, формируемая в пункте 1, определяет условия итерационной реализации пунктов 3-8, а также выбор проектных процедур  $ProcDec_i^2$  для получения решений по задачам  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$ . Выбор стратегии осуществляется на основе решения задачи, формирующей область допустимых вариантов построения КМО  $S^* = \{s\}$ , исходя из выбранных принципов построения КМО  $\pi \in \Pi$ . Конкретные положения стратегии во многом определяются требуемой точностью решений  $DesDec_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$  и имеющимися вычислительными ресурсами.

Пункты 3 – 6 предполагают реализацию проектных процедур  $ProcDec_i^2$ ,  $i = \overline{2,5}$  для решения задач выбора структуры системы, определения топологии элементов и связей, выбора технологии функционирования, определения параметров элементов и связей в условиях исходных данных  $InDat_i^2$  и ограничений  $Res_i^2$ . Каждая из процедур  $ProcDec_i^2$ ,  $i = \overline{2,5}$  базируется на одной из моделей задачи  $ModTask_{ik}^2 = \{ModTask_{ik}^2\}$  и использует один из методов ее решения  $MetDec_{il}^2 = \{MetDec_{il}^2\}$ .

Проверка ограничений  $Res_i^2$  производится в процессе решения каждой из задач  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,5}$ . Пункт 5 предполагает проверку ограничений общей задачи  $Task_2^1$ .

Оценка эффективности и выбор лучшего варианта построения КМО (пункт 8) осуществляется с использованием формальных или экспертных процедур многофакторного оценивания и выбора из множества  $\{ProcDec_{op}^2\}$ .

Пункт 9 предполагает проверку условий завершения итерационного цикла решения задач комплекса  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{2,5}$ .

В пункте 10 предполагается формирование решений  $s \in S^*$  проектировщиком (лицом, принимающим решения) и автоматизированная оценка их свойств по множеству критериев  $K(s)$ , сравнение их с лучшим из полученных ранее и выбор лучшего среди них  $s^o$ .

В зависимости от имеющихся в наличии средств автоматизации проектирования и выбранной стратегии формирования проектных решений возможны различные формы участия оператора в формировании решений в пунктах 2 – 10: оператор-программист, оператор-исследователь, оператор-координатор.

Разрешимость по процессу задачи системного проектирования КМО в целом  $Task_2^1$  вытекает из разрешимости составляющих ее задач  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$  и сходимости всей итерационной процедуры их решения. При этом проектные решения  $DesDec_i^2$  задач  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$  на последующих итерациях предложенной схемы станут более точными, так как будут формироваться исходя из решений, полученных на предыдущих итерациях. Как следствие повысится и качество решения  $DesDec_2^1$  исходной задачи.

Дальнейшая детализация описанной логической схемы проектирования и предложенного метода формирования проектных решений предполагает выбор или разработку новых математических моделей  $ModTask_i^2$  и методов решения  $MetDec_i^2$  всех частных задач  $Task_i^2$ ,  $i = \overline{1,6}$ .

### Многофакторное оценивание и выбор проектных решений

Задача выбора проектных решений в проектах оптимизации крупномасштабных объектов традиционно формализуется в терминах «условия-цель» [11]. При этом условия определяют исходные данные  $InDat$  и ограничения  $Res$  задачи, а цель – лучший вариант построения КМО  $s^o$ .

Формально задача состоит в выборе альтернативы из допустимого множества вариантов построения КМО  $s^o \in S^*$ . Эффективность каждого решения  $s \in S^*$  определяется степенью соответствия поставленной цели и оценивается посредством множества частных критериев эффективности  $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$ .

При этом сложность заключается в том, что частные критерии  $k_i(s)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , используемые для оценки эффективности вариантов построения КМО, имеют различный физический смысл, размерность, интервал измерения и являются противоречивыми.

Процесс многофакторного выбора решения относительно структуры КМО может быть представлен в

виде следующей схемы [11]:

$$Sit \rightarrow Axs \rightarrow U(s) \rightarrow s^o,$$

где *Sit* (*om Situation*) – ситуация выбора проектного решения; *Axs* (*om Axioms*) – аксиоматика выбора решения; *U(s)* – полезность (ценность) *s*-го варианта построения КМО; *s<sup>o</sup>* – лучшее решение.

Ситуация выбора проектного решения каждой задачи *Task* полностью определяется заданием ее исходных данных *InDat* и ограничений *Res*.

Этапы определения аксиоматики *Axs* и формирования полезности *U(s)* являются эвристическими. Они посвящены выявлению предпочтений лица, принимающего решения, и формированию на этой основе правила для ранжирования альтернативных решений  $s \in S^*$ .

Предлагается осуществлять оценивание вариантов и выбор лучшего из них  $s^o \in S^*$  с использованием эргатического подхода, позволяющего объединять достоинства автоматической и операторной технологий.

Известно, что множество допустимых решений  $S^*$  состоит из двух подмножеств  $S^* = S^S \cup S^K$ , где  $S^S$  – подмножество согласия, в котором все частные критерии могут изменяться согласовано;  $S^K$  – подмножество компромиссов (Парето-оптимальных, эффективных, неулучшаемых, недоминируемых решений), в котором хотя бы пара критериев является строго противоречивой. Так как множество допустимых решений  $S^*$  при синтезе КМО, как правило, является достаточно большим, а оптимальное решение  $s^o$  принадлежит подмножеству компромиссов  $s^o \in S^K$ , практически во всех случаях целесообразно выделять подмножество  $S^K \subseteq S^*$ .

Формирование множества  $S^K$  путем полного перебора непосредственно из множества  $S^*$  в худшем случае требует попарного сравнения всех вариантов множества по всем частным критериям. Для этого требуется выполнить порядка  $f_0(n^*, m) = o[2m C_n^{2*}]$  операций сравнения (где  $m$  – количество частных критериев;  $n^* = Card(S^*)$  – мощность множества  $S^*$ ).

При большой мощности множества  $S^*$  точное определение  $S^K$  представляет собой достаточно сложную задачу с вычислительной точки зрения. С учетом этого в процессе проектирования предлагается параллельно с генерацией вариантов решений формировать подмножество компромиссов  $S^K$ .

Суть этого подхода состоит в следующем. Первый из сформированных альтернативных вариантов  $s$  включается в множество компромиссных  $S^K$ . Каждый из далее формируемых вариантов  $x \in S^*$  сравнивается с каждым (на первом этапе с единственным) из вариантов  $y \in S^K$ . Если сформированный вариант  $x$  лучше всех вариантов из  $S^K$  по всем показателям, он включается в  $S^K$ . Если некоторый вариант  $y \in S^K$  хуже, чем  $x$ , он исключается из  $S^K$ . После завершения генерации альтернативных вариантов  $x \in S^*$  будет сформировано подмножество компромиссных вариантов  $S^K$ .

При этом, в общем случае,  $Card S^* \gg Card S^K$ , что позволяет сократить объем памяти для хранения альтернативных вариантов и существенно уменьшить затраты на их дальнейший анализ [12, 13].

**Выводы.** На основе анализа особенностей проблемы структурной оптимизации крупномасштабных объектов разработана схема ее декомпозиции на комплексы задач метауровня, макроуровня и микроуровня по степени детализации их описания и этапам их жизненных циклов. На основе анализа взаимосвязи подзадач по входным и выходным данным обоснована итерационная логическая схема системного проектирования, определяющая рациональную последовательность решения отдельных задач.

Практическое применение полученных результатов позволит формировать эффективные технологии проектирования и планирования развития объектов, сокращать затраты на их создание и эксплуатацию, за счет совместного решения задач повысить качество решений и на этой основе улучшать функциональные характеристики создаваемых объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Цвиркун А.Д. Управление развитием крупномасштабных систем в новых условиях / А. Д. Цвиркун // Проблемы управления. – 2003. – № 1. – С. – 34–43.
2. Цвиркун А.Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев. – М.: Наука, 1993. – 157 с.
3. Андриюшкевич С.К. построение информационной модели крупномасштабных объектов технологического управления с применением аспектно-ориентированного подхода / С.К. Андриюшкевич // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2010. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 34–45.
4. Петров Э.Г. Территориально распределенные системы обслуживания / Э. Г. Петров, Пискалкова В. П., Бескоровайный В. В. – К.: Техника, 1992. – 208 с.
5. 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 / За ред. В.І. Бикова. – К.: Либідь, 2000. – 272 с.
6. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 336 с.
7. Бескоровайный В.В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем / В.В. Бескоровайный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – Вып. 120. – С. 29 – 37.
8. Бескоровайный В.В. Разработка системологической модели проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескоровайный, К. Е. Подолька // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №3(75). – С. 37 – 42.
9. Бескоровайный В.В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов / В.В. Бескоровайный // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – №. 3. – С. 94 – 96.
10. 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.
11. Овезгельдыев А.О. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации / А.О. Овезгельдыев, Э.Г. Петров, К.Э. Петров. – К.: Наук. думка, 2002. – 164 с.
12. Бескоровайный В.В. Формирование множества эффективных вариантов при решении задач структурного синтеза территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – №.4. – С.113 – 116.
13. Бескоровайный В. В. Выбор многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подолька // Системи обробки інформації. – 2016. – № 5(142). – С. 80–86