

## МЕТОД СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РЕИНЖИНИРИНГА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

к.т.н. В.В. Бескорвайный  
(представил д.т.н., проф. Э.Г. Петров)

*Предлагаются математическая модель и метод направленного перебора для решения задачи структурно-топологической оптимизации территориально распределенных систем на этапе их реинжиниринга. Приведена оценка временной сложности предложенного метода.*

**Постановка проблемы.** В процессе проектирования любой антропогенной системы, при ее реорганизации или планировании ее развития неизбежно возникают задачи синтеза структуры. При этом организационные структуры современных систем становятся недолговечными и неустойчивыми. Если раньше они не изменялись в течение нескольких поколений, то теперь существует необходимость в проведении постоянных крупных реорганизаций [1]. Изменение в организационной структуре, как правило, приводят к необходимости изменений других структур: топологической (пространственной), функциональной, технологической.

Особую важность задачи реинжиниринга приобретают для территориально распределенных систем (ТРС). Для них увеличение расстояний между функциональными подсистемами приводит к тому, что их структурные, стоимостные и функциональные характеристики становятся все более зависимыми от топологии (размещения) их подсистем и элементов [2].

Проблема структурного синтеза в процессе проектирования и реинжиниринга ТРС представляется достаточно сложной, включающей комплексы задач выбора или реорганизации структуры, топологии, технологии функционирования, параметров элементов и связей, всесторонней оценки и выбора вариантов на различных этапах ее жизненного цикла [3]. С целью обеспечения эффективности решений на всех этапах жизненного цикла ТРС необходима разработка единой методологии их структурного синтеза, предполагающая корректную декомпозицию проблемы на комплексы задач, относящихся к различным уровням описания объекта и этапам его синтеза (проектирования), разработку комплекса соответствующих моделей, проектных процедур и логической схемы (технологии) проектирования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время реальная польза от применения автоматизированных систем проектирования и управления объектами является не столь большой, как ожидалось при их создании. Среди причин этого называют ориентацию на автоматизацию существующих процессов (без их совершенствования), а также то, что используемые технологии разработки систем, базируются на так называемой каскадной схеме (*waterfall model*) [4]. При такой организации работ предполагается последовательная разработка систем с разделением на стадии и этапы. При этом вследствие относительно длительного времени проектирования и быстрого изменения объектов (или требований к ним) создаваемые модели устаревают вскоре после их создания.

Для устранения этого противоречия параллельно разрабатываются новые подходы (технологии) к проектированию, управлению объектами и процессами их создания [1]. В настоящее время приобретает все большую популярность созданный Э. Демингом (E. Deming) подход, называемый трансформацией и непрерывным совершенствованием бизнес-процессов СРІ (Continuous Process Improvement). Для него, в частности, характерны: ориентация на постоянное повышение эффективности; трансформация и динамичное совершенствование организации работ (процессов функционирования); исследование и устранение недостатков организационной структуры в целом, а не отдельных ее элементов. Еще более радикальным является созданный М. Хаммером (M. Hammer) подход управления деятельностью, получивший название реинжиниринг бизнес-процессов ВРР (Business Process Reengineering [5]. Он представляет собой фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование бизнес-процессов компаний для достижения коренных улучшений в основных актуальных показателях их деятельности (стоимость, качество, темпы).

Это делает проблему структурного синтеза ТРС еще более актуальной и наделяет ее задачи характерной особенностью. Суть ее состоит в том, что в отличие от классических задач синтеза, требуется решение множества задач с учетом особенностей и средств существующих структур, которые могут быть использованы в создаваемых структурах. При этом предположение об одноэкстремальности огибающей локальных экстремумов целевой функции от количества элементов (узлов), характерное для традиционных задач синтеза централизованных систем, может не выполняться [6, 7]. Это делает непригодными для решения задач реинжиниринга топологических структур известные методы структурно-топологической оптимизации ТРС.

**Целью статьи** является изложение разработанной математической модели и метода решения задачи оптимизации структуры и топологии в процессе реинжиниринга территориально распределенных систем.

**Постановка и математическая модель задачи.** Анализ взаимосвязи задач структурного синтеза ТРС [3] показывает, что выбор структуры, топологии элементов и связей теснейшим образом связаны между собой и должны, по возможности, осуществляться совместно в рамках одной задачи. Агрегированная задача структурно-топологического синтеза состоит в доопределении варианта построения системы, для которой заданы технология функционирования, параметры элементов и связей, количество узлов (подсистем), связи между ними и их топология. Конкретные особенности задачи определяются схемой декомпозиции проблемы структурного синтеза ТРС, логической схемой их системного проектирования и методом формирования проектных решений [8].

В подавляющем большинстве задач синтеза и оптимизации ТРС в качестве единственного или основного критерия выступают затраты на ее создание и (или) эксплуатацию. Будем полагать, что узлы системы (включая центральный) образуются на базе ее элементов. Тогда при использовании в качестве показателя затрат на ТРС ее стоимости  $C$  критерий оптимизации может быть представлен в виде

$$C = \sum_{i=1}^{n_E} c_i(r_{ij}) + \sum_{i,j=1}^{n_E} c_{ij} \cdot r_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $n_E$  – количество составляющих системы (собственно элементов и элементов, на базе которых оборудованы узлы и центры);  $c_i(r_{ij})$  – стоимость  $i$ -й составляющей ТРС,  $i = \overline{1, n_E}$ ;  $r_{ij}$  – булева переменная ( $r_{ij} = 1$ , если между составляющими  $i$  и  $j$  системы существует непосредственная связь;  $r_{ij} = 0$  – в противном случае;  $r_{ij} = 1$ , если  $i$ -я составляющая является узлом или центром;  $r_{ij} = 0$ , если  $i$ -я составляющая является элементом).

Ограничения задачи определяются видом структуры ТРС. Основными ограничениями для неизбыточных (централизованных) структур являются:

1. Каждый элемент  $j = \overline{1, n_E}$  должен быть связан с одним из узлов,

т.е.  $\sum_{i=1}^{n_E} r_{ij} = 1$  для всех  $j = \overline{1, n_E}$ , для которых  $r_{jj} = 0$ .

2. К узлу должно быть подключено не менее двух составляющих (элементов, узлов), т.е.  $\sum_{i=1}^{n_E} r_{ij} > 1$  для всех  $j = \overline{1, n_E}$ , для которых  $r_{jj} = 1$ .

3. Общее количество связей между составляющими должно быть равно

$$\sum_i \sum_j r_{ij} = 2 \cdot (n_E - 1) + n_U, \text{ где } n_U - \text{ количество узлов в системе, } n_U = \sum_{i=1}^{n_E} r_{ii}.$$

4. Элемент  $j$  присоединяется к узлу  $i$  по минимуму стоимости  $\min_i c_{ij}$ .

5. Каждый из узлов системы  $i = \overline{1, n_U}$  связывается с одним из промежуточных узлов или с центральным узлом, т.е.  $r_{ii} = 1 \rightarrow \sum_{j=1}^{n_E} r_{ij} > 1$  и

существует хотя бы одно  $j$ , для которого  $\sum_{k=1}^{n_E} r_{jk} > 1$ .

6. Количество узлов  $n_U$  может меняться от 0 до  $n_E$ , т.е.  $1 \leq \sum_{i=1}^{n_E} r_{ii} \leq n_E$ .

Затраты (1) можно представить состоящими из затрат на ее центр  $C_C$ , узлы  $C_U$ , элементы  $C_E$ , а также связи между узлами  $C_{UU}$ , узлами и центром  $C_{UC}$ , элементами и узлами  $C_{EU}$  в виде

$$C = C_C + C_U + C_{UU} + C_{UC} + C_E + C_{EU}. \quad (2)$$

Оптимальной по критерию затрат топологической структуре ТРС соответствуют минимумы функций (1) и (2). Оптимизируемыми параметрами задачи являются количество узлов системы  $n_U$ , места размещения узлов  $Y = [y_i]$ ,  $i = \overline{1, n_E}$  ( $y_i$  – булева переменная,  $y_i = 1$ , если  $i$ -я составляющая системы является узлом;  $y_i = 0$  – в противном случае), подмножества элементов, связанных с каждым из узлов, схемы связи между элементами и узлами, узлов между собой, узлов с центром  $R = [r_{ij}]$ . При оптимизации по критерию затрат схемы связей элементов, узлов и центра  $R = [r_{ij}]$  могут быть однозначно определены по минимуму стоимости подключения.

Анализ зависимости функции затрат (1) от количества узлов в системе  $C(n_U)$  показывает, что по аналогии с [6] огибающая ее локальных минимумов может быть представлена одноэкстремальной зависимостью от количества узлов  $n_U$ .

В ситуации реинжиниринга ТРС не обязательно требуется полная замена существующей топологической структуры. Как правило, необходимы дополнительные затраты на создание нескольких новых и реконструкцию существующих элементов, узлов, центра и связей между ними  $\Delta C$ . Поэтому при реинжиниринге топологических структур в качестве целевой функции целесообразно использовать функцию необходимых дополнительных затрат  $\Delta C(n_U)$ , характер зависимости которой может отличаться от (1) и (2).

Постановка задачи реинжиниринга топологической структуры ТРС может быть сформулирована следующим образом. Известны:

– существующая топологическая структура системы, заданная местами расположения узлов  $Y^0 = [y_i^0]$ ,  $i = \overline{1, n_E}$  ( $y_i^0$  – булева переменная,  $y_i^0 = 1$ ,

если на базе  $i$ -го элемента существует узел;  $y_i^0 = 0$  – в противном случае), а также связями между элементами, узлами и центром  $R^0 = [r_{ij}^0]$ ; затраты на создание элементов, узлов и центра в новой структуре  $c'_i$ ,  $i = \overline{1, n_E}$ ; затраты на создание связей между элементами, узлами и центром в новой структуре  $c'_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n_E}$ ; затраты на модернизацию элемента, узла и центра в новой структуре  $\Delta c_i$ ,  $i = \overline{1, n_E}$ ; затраты на модернизацию связей между элементами, узлами и центром в новой структуре  $\Delta c_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n_E}$ .

Необходимо определить новый вариант топологической структуры, задаваемый местами размещения узлов  $Y' = [y'_i]$ ,  $i = \overline{1, n'_E}$  (где  $n'_E$  – количество элементов в новой структуре) и схемой связей между элементами, узлами и центром  $R' = [r'_{ij}]$ , требующий минимальных дополнительных затрат

$$\Delta C = \sum_{i=1}^{n'_E} [c'_i \cdot (1 - y_i^0) \cdot y'_i + \Delta c_i \cdot y_i^0 \cdot y'_i] + \sum_{i=1}^{n'_E} \sum_{j=1}^{n'_E} [c'_{ij} \cdot (1 - r_{ij}^0) \cdot r'_{ij} + \Delta c_{ij} \cdot r_{ij}^0 \cdot r'_{ij}] \rightarrow \min_{r'_{ij}}. \quad (3)$$

При этом возможны различные варианты реформирования топологических структур между двумя крайними. Первый предполагает полную замену оборудования без использования элементов, узлов и связей существующей топологической структуры. При этом требуются максимальные дополнительные затраты  $\Delta C_{\max} = \max \Delta C$ . Второй крайний вариант предполагает использование всей существующей топологической структуры. При этом дополнительные затраты минимальны  $\Delta C_{\min} = \min \Delta C$ . Между ними существует множество ситуаций, в которых могут использоваться или модернизироваться некоторые из существующих элементов, узлов, центров, а также некоторые из связей между ними. Модернизация требует дополнительных затрат, которые, однако, меньше, чем на создание новых элементов, узлов, центров или связей между ними, т.е.  $\Delta c_i < c'_i$ ,  $\Delta c_{ij} < c'_{ij}$ .

**Метод решения задачи.** Представим общие дополнительные затраты на элементы, узлы и центр в новой топологической структуре как функцию от количества узлов в виде  $\Delta C_1(n_U) = \Delta C_E + \Delta C_U(n_U) + \Delta C_C$ , дополнительные затраты на связи между ними в виде  $\Delta C_2(n_U) = \Delta C_{EU}(n_U) + \Delta C_{UU}(n_U) + \Delta C_{UC}(n_U)$ , а их минимальные и максимальные значения, соответствующие выше описанным крайним случаям, через  $\Delta C_{1\min}(n_U)$ ,  $\Delta C_{1\max}(n_U)$ ,  $\Delta C_{2\min}(n_U)$ ,  $\Delta C_{2\max}(n_U)$ . С учетом этого минимальные и максимальные дополнительные затраты на новую топологическую структуру можно представить в виде:

$$\Delta C_{\min}(n_U) = \Delta C_{1\min}(n_U) + \Delta C_{2\min}(n_U); \quad (4)$$

$$\Delta C_{\max}(n_U) = \Delta C_{1\max}(n_U) + \Delta C_{2\max}(n_U).$$

Огибающая локальных минимумов функции  $\Delta C(n_U)$  (3) в отличие от функции (1) может оказаться многоэкстремальной. Это связано с тем, что при добавлении узлов в стратегии Add [7] на некоторых из шагов  $n_U := n_U + 1$  может оказаться целесообразной модернизация узлов и связей существующей топологической структуры, а на других – создание новых. Затраты на модернизацию и создание новых элементов и связей различны. Чередование ситуаций модернизации и создания может привести к появлению нескольких экстремумов на интервале определения функции  $\Delta C(n_U)$  (3). Использование стратегии направленного перебора, предполагающей унимодальность целевой функции [7], в этом случае не гарантирует достижение глобального минимума.

Для поиска глобального оптимального решения задачи синтеза топологической структуры в процессе реинжиниринга ТРС предлагается новый метод. Суть его состоит в следующем.

Определим отрезок  $[n'_{\min}, n'_{\max}]$ , гарантировано содержащий оптимум функции дополнительных затрат  $\Delta C(n_U)$ . С этой целью найдем оптимум функции максимальных дополнительных затрат  $\Delta C_{\max}(n_U)$ , решив с помощью метода направленного перебора локальных экстремумов функции цели или его модификаций [2] задачу  $n'_U = \arg \min \Delta C_{\max}(n_U)$ . Это позволит определить минимум затрат  $\Delta C_{\max}(n'_U)$  при полной смене оборудования в топологической структуре. Полученное решение может быть улучшено при частичной или полной модернизации оборудования. Определим отрезок  $[n'_{\min}, n'_{\max}]$ , на котором значение функции затрат  $\Delta C(n_U)$  (3) может быть не хуже найденного минимума  $\Delta C_{\max}(n'_U)$  (рис. 1). Для определения оптимального решения  $\Delta C(n^0_U)$  необходимо пройти отрезок  $[n'_{\min}, n'_{\max}]$ , увеличивая или уменьшая значение количества узлов системы  $n_U := n_U \pm 1$ .

Предложенный метод требует решения трех задач (поиск минимума функции максимальных затрат  $\Delta C_{\max}(n_U)$ , определение отрезка  $[n'_{\min}, n'_{\max}]$ , поиск минимума функции затрат  $\Delta C(n_U)$ ), каждая из которых сравнима по сложности с задачей структурно-топологического синтеза. С учетом этого его сложность может быть принята равной  $3 \cdot O[a(n)]$ , где  $a(n)$  – временная сложность метода решения задачи структурно-топологического синтеза. При этом во всех случаях он гарантирует получение оптимума по количеству узлов в системе  $n_U$ .

Сложность предложенного метода может быть снижена путем ис-

пользования специальных приемов. Так могут быть использованы оценки оптимального количества узлов структуры  $n_U^0$ , позволяющие существенно сократить поиск по переменной  $n_U$  [2]. Кроме того, поиск минимума функции затрат  $\Delta C(n_U)$  может быть ограничен путем сужения интервала  $[n'_{\min}, n'_{\max}]$  справа. Для этого необходимо на каждом шаге поиска  $n_U^0$  выполнять проверку, все ли узлы и связи существующей топологической структуры включены в создаваемую, т.е. выполняется ли условие  $Y^0 \cap Y' = Y^0$  и  $R^0 \cap R' = R^0$ . Для решения базовой задачи могут быть использованы приближенные методы.

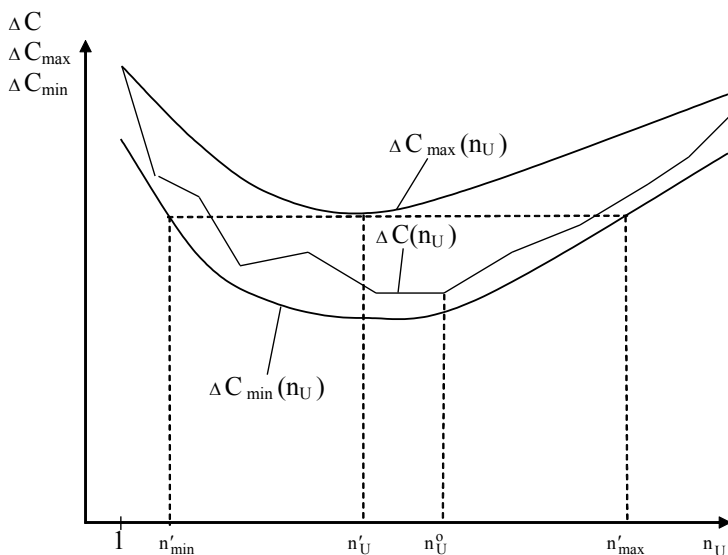


Рис. 1. Схема поиска минимума целевой функции (3)

**Практические результаты и выводы.** Использование разработанного метода при реинжиниринге территориально распределенных систем позволит сократить сроки проектирования, повысить качество проектных решений за счет синтеза более экономичных вариантов топологических структур.

Предложенные модель и метод были использованы при решении контрольной задачи реинжиниринга структуры и топологии информационно-вычислительной сети. Их применение позволило анализировать варианты построения ИВС с частичной модернизацией оборудования

узлов. За счет этого был получен вариант сети, требующий на 3,63% меньше дополнительных приведенных затрат, чем базовый вариант.

Направлением дальнейших исследований в этом направлении могут быть: разработка модификаций метода для различных видов структур (радиально-узловых, древовидных, кольцевых, смешанных); определение временной и емкостной сложности модификаций метода; для систем с количеством элементов  $n_E > 45 - 50$  в процессе поиска локальных экстремумов могут быть использованы известные и разработаны новые приближенные методы, что позволит получать рациональные решения задач большой размерности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур И.И., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г. *Управление проектами*. – М.: *Омега-Л*, 2004. – 664 с.
2. Петров Э.Г., Пискалова В.П., Бескоровайный В.В. *Территориально распределенные системы обслуживания*. – К.: *Техника*, 1992. – 208 с.
3. Бескоровайный В.В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем // *АСУ и приборы автоматизации*. – 2002. – Вып. 120. – С. 29 – 37.
4. Зиндер Е. Реинжиниринг + информационные технологии = новое системное проектирование // *Открытые системы*. – 1996. – № 1(15). – С. 56 – 59.
5. Хаммер М., Чампи Дж. *Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе: Пер. с англ.* – С.Пб.: *Изд-во С.-Пб. ун-та*, 1997. – 332 с.
6. *Technick und Technologie des Fernmeldewessens. Optimierung von Telekommunikationsnetzen. Optimale Knoten / Verfasst von L. Schade*. – Dresden: *Zentralst. fuer HSFS*, 1991. – 64 p.
7. Бескоровайный В.В. Эвристический метод структурного синтеза территориально распределенных систем // *Системы обработки информации*. – Х.: *ХВУ*. – 2003. – Вып. 3. – С. 69 – 74.
8. Бескоровайный В.В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов // *Радиоэлектроника и автоматизация*. – 2002. – № 3. – С. 94 – 96.

Поступила 1.03.2004

**БЕСКОРОВАЙНЫЙ Владимир Валентинович**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники. В 1979 году окончил Харьковский институт радиоэлектроники. Области научных интересов – структурный синтез территориально распределенных систем; математическое моделирование; теория многофакторного оценивания и выбора решений.