

## МЕТОД РЕИНЖИНИРИНГА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

*В.В. БЕСКОРОВАЙНЫЙ, К.Е. ПОДОЛЯКА*

---

В работе сформулирована постановка задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по стоимостному показателю с учетом дополнительных затрат на демонтаж и модернизацию оборудования, а также возможности его дальнейшего использования. Разработана математическая модель задачи с учетом накладываемых ограничений на показатели оперативности, надежности и живучести системы. На основе анализа особенностей целевой функции и ограничений задачи предложен эффективный метод направленного перебора вариантов, позволяющий получать оптимальные решения.

*Ключевые слова:* система крупномасштабного мониторинга, структура, топология, реинжиниринг, оптимизация.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные системы крупномасштабного мониторинга (СКММ) радиоэлектронной обстановки, космических объектов, экологии, других объектов функционируют в непрерывно изменяющихся условиях. Это связано с появлением новых объектов наблюдения, повышением требований к оперативности и точности наблюдений, совершенствованием средств и технологий мониторинга. Как следствие, на определенном этапе существующие системы становятся неэффективными или перестают удовлетворять изменившимся требованиям.

Попытки их модернизации путем решения традиционных задач структурно-топологической оптимизации в большинстве случаев не гарантируют получения эффективных вариантов. В качестве альтернативы на практике для адаптации антропогенных объектов все чаще используется подход на основе реинжиниринга, который предполагает фундаментальный анализ существующих вариантов их построения (средств, структуры, топологии, параметров, технологии) и радикальное перепроектирование. Это требует решения комплекса задач технологической, структурной, параметрической, топологической оптимизации, многофакторной оценки и выбора проектных решений [1, 2]. При этом могут быть кардинально пересмотрены принципы построения системы, что потребует глубоких изменений в технологии ее функционирования, в ее структуре, параметрах элементов и связей, топологии (территориальной или пространственной реализации).

Характерной особенностью СКММ является то, что их функциональные и затратные показатели во многом определяются не только используемой технологией, структурой, параметрами элементов и связей, а в значительной степени их топологией. Это приводит к необ-

ходимости в процессе реинжиниринга СКММ совместного решения комплекса задач технологической, структурной, топологической и параметрической оптимизации. С учетом того, что в практике мониторинга используется относительно небольшое множество технологий, типов элементов, узлов и связей, основную трудность составляют задачи оптимизации структуры и топологии СКММ.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Традиционно в качестве критериев для выбора инфраструктуры систем мониторинга используются показатели оперативности, надежности, живучести, полноты контроля и затрат [3, 4]. Предлагаемые модели и методы ориентированы на оптимизацию размещения пунктов наблюдения с регулярным и нерегулярным радиусом покрытия, но не учитывают структурно-топологических особенностей существующей системы.

Большинство современных СКММ имеют трехуровневые радиально-узловые структуры, предполагающие наличие единого центра, уровня промежуточных узлов и множества элементов (пунктов мониторинга), связанных с узлами системы и покрывающих заданное множество объектов мониторинга. В таких системах основу задачи их структурно-топологической оптимизации составляет задача определения количества и размещения узлов, а единственной или одной из основных целей является минимизация затрат для достижения требуемых показателей качества (оперативности, определяемой временем получения информации, надежности, живучести).

К настоящему времени накоплен широкий арсенал математических моделей и методов решения задач оптимизации систем мониторинга различного целевого назначения на этапе их проектирования [5–10]. Однако предлагаемые мо-

дели и методы неприменимы для решения задач реинжиниринга СКММ, в которых необходимо учитывать возможность использования части существующей инфраструктуры.

В работе [11] приведены результаты исследования для оценки существующей структуры системы мониторинга и ее возможного реинжиниринга. Для решения задачи по показателю затрат на сеть мониторинга предложено использовать алгоритм имитации отжига (*Simulated annealing*) и методы многомерной классификации данных. Предложенная целевая функция направлена на максимизацию финансовой выгоды от перераспределения множества из  $n$  объектов наблюдения между элементами системы мониторинга и представлена в обобщенном виде выражением:

$$NB_n = \sum_n B - \sum_n C \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $NB_n$  – прибыль от перераспределения объектов мониторинга между элементами системы;  $\sum_n B$  – суммарный эффект (доход) от перераспределения объектов мониторинга;  $\sum_n C$  – суммарные затраты в денежном выражении на перераспределение объектов между элементами системы.

Целевая функция (1) ориентирована на оценку изменений топологической структуры системы, но не позволяет учитывать возможность использования или модернизации средств (центра, элементов, узлов, каналов связи) существующей системы.

Для учета возможности использования части существующей системы мониторинга может быть использована математическая модель задачи реинжиниринга топологических структур территориально распределенных систем [12]. В ней в качестве критерия предлагается использовать минимум дополнительных затрат на реинжиниринг. Целевая функция задачи, отражающая в явном виде зависимость дополнительных затрат от структуры и топологии системы мониторинга, имеет вид:

$$\Delta C = \sum_{i=1}^{n'_E} [c'_i \cdot (1 - y_i^o) \cdot y'_i + \Delta c_i \cdot y_i^o \cdot y'_i] + \sum_{i=1}^{n'_E} \sum_{j=1}^{n'_E} [c'_{ij} \cdot (1 - r_{ij}^o) \cdot r'_{ij} + \Delta c_{ij} \cdot r_{ij}^o \cdot r'_{ij}] \rightarrow \min_{r'_{ij}} \quad (2)$$

где  $c'_i$ ,  $i = \overline{1, n'_E}$  – затраты на создание элементов, узлов и центра в новом варианте системы (после реинжиниринга);  $c'_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n'_E}$  – затраты на создание связей между элементами (узлами, центром)  $i$  и  $j$  в новом варианте системы;  $\Delta c_i$ ,  $i = \overline{1, n'_E}$  – затраты на модернизацию элемента (узла, центра)  $i$  в новой структуре;  $\Delta c_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n'_E}$  – затраты на модернизацию связей между элементами (узлами, центром)  $i$  и  $j$  в новой структуре;  $R^o = [r_{ij}^o]$  – матрица связей между элементами, узлами и центром ( $r_{ij}^o = 1$ ,  $r'_{ij} = 1$ , если, соответственно, между элементами

$i$  и  $j$  существует непосредственная связь,  $r_{ij}^o = 0$ ,  $r'_{ij} = 0$  – в противном случае);  $Y = [y_i^o]$  – вектор, отражающий места расположения узлов ( $y_i^o$ ,  $i = \overline{1, n'_E}$  – булева переменная:  $y_i^o = 1$ , если на базе  $i$ -го элемента существует узел;  $y_i^o = 0$  – в противном случае).

Предложенный в работе [12] метод гарантирует получение оптимума по количеству и размещению узлов в территориально распределенной системе  $n_U$ . Его временная сложность составляет  $3 \cdot O[A(n)]$ , где  $A(n)$  – временная сложность метода решения задачи структурно-топологического синтеза территориально распределенной системы. Однако в предложенной математической модели задачи не учитываются возможные дополнительные затраты на демонтаж узлов и оборудования для организации связей, а также возможность повторного использования оборудования узлов и связей в новом варианте построения системы.

Проведенный анализ показал, что большинство современных публикаций по проблеме реинжиниринга систем мониторинга посвящено решению различных задач размещения элементов системы (пунктов) мониторинга без учета схемы передачи данных на другие уровни информационного взаимодействия. Кроме того при оценке затрат на реинжиниринг не учитываются дополнительные затраты на демонтаж и возможность повторного использования (или реализации) задействованных в существующей системе ресурсов.

С учетом этого, целью статьи является разработка математической модели и метода решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по критерию минимума дополнительных затрат с учетом затрат на демонтаж и возможности повторного использования задействованных в существующей системе ресурсов.

## 2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Базовая задача реинжиниринга топологической структуры трехуровневой СКММ, построенной на однотипных элементах, узлах и каналах, рассматривается в следующей постановке [12]. Задано:

– множество элементов системы  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , покрывающих с заданной кратностью все множество объектов мониторинга;

– существующий вариант топологической структуры системы  $a \in S$  (где  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур), задаваемый местами расположения элементов  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , узлов  $y' = [y'_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$  ( $y'$  – булева переменная,  $y'_i = 1$ , если на базе  $i$ -го элемента существует узел;  $y'_i = 0$  – в противном случае), центра (центр системы расположен на базе элемента  $i = 1$ ), а также связями между элементами, узлами и центром  $x' = [x'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  ( $x'_{ij}$  – булева переменная,  $x'_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$

существует непосредственная связь;  $x'_{ij} = 0$  – в противном случае);

– затраты на создание или модернизацию узлов  $[c_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$  и связей  $[c_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ .

Необходимо определить наилучший по показателю минимума дополнительных затрат вариант топологической структуры СКММ  $s^0 \in S$ , задаваемый количеством узлов  $u$ , местами их размещения (центральный узел размещается на базе первого элемента) и схемой связей между элементами, узлами и центром с учетом заданных ограничений на функциональные показатели (оперативности, надежности и живучести).

Затраты на создание существующего варианта СКММ  $C(a)$ ,  $a \in S$  можно представить состоящими из затрат на создание центра  $C_C(a)$ , узлов  $C_U(a)$ , элементов  $C_E(a)$ , связей между узлами и центром  $C_{UC}(a)$ , элементами и узлами  $C_{EU}(a)$  [12]:

$$C(a) = C_C(a) + C_U(a) + C_{UC}(a) + C_E(a) + C_{EU}(a). \quad (3)$$

По аналогии затраты на оптимальный вариант новой СКММ  $b \in S$  (без использования существующей топологической структуры  $a \in S$ ) можно представить в виде:

$$C(b) = C_C(b) + C_U(b) + C_{UC}(b) + C_E(b) + C_{EU}(b). \quad (4)$$

Желательной целью является минимизация дополнительных затрат  $\Delta C(a, b)$ . При этом разность затрат (3) и (4):

$$\Delta C(a, b) = C(a) - C(b) \quad (5)$$

не учитывает возможности использования части топологической структуры существующей системы  $a \in S$ .

Критерий минимума дополнительных затрат  $k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}$  (с учетом возможности использования топологической структуры существующей системы  $a \in S$ ) представим в виде:

$$k_1(a, s) = \Delta C(a, s) = \sum_{i=1}^n [(c_i + e_i)(1 - x'_{ii})x_{ii} + (d_i - g_i)x'_{ii}x_{ii}] + \quad (6)$$

$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n [(c_{ij} + e_{ij})(1 - x'_{ij})x_{ij} + (d_{ij} - g_{ij})x'_{ij}x_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S}$ ,  
 где  $c_i$  – стоимость элементов, узлов или центра в новой структуре,  $i = \overline{1, n}$ ;  $e_i$  – затраты на демонтаж узлов существующей структуры  $i = \overline{1, n}$ ;  $x'_{ij}$  и  $x_{ij}$  – соответственно элементы матриц смежности (связей) между элементами, узлами и центром в существующей  $x' = [x'_{ij}]$  и структуре после реинжиниринга  $x = [x_{ij}]$  ( $x'_{ij} = 1$  или  $x_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$  существует непосредственная связь;  $x'_{ij} = 0$  или  $x_{ij} = 0$  – в противном случае);  $d_i$  – стоимость модернизации элемента, узла или центра в новой структуре  $i = \overline{1, n}$ ;  $g_i$  – стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы (реализованы) после демонтажа оборудования узлов  $i = \overline{1, n}$ ;  $c_{ij}$ ,  $e_{ij}$ ,  $d_{ij}$  и  $g_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  – соответственно стоимость связи, затраты на демонтаж, стоимость модернизации и стоимость ресурсов, которые могут быть по-

вторно использованы для связи между элементами  $i$  и  $j$ ;  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ.

Для оценки показателей оперативности, надежности и живучести воспользуемся соотношениями из работы [13].

В качестве оценки оперативности варианта построения СКММ  $s$  используем значение максимального времени получения центром информации о наблюдаемом объекте:

$$k_2(s) = \max_{1 \leq i \leq n} \left[ \tau_i^C + \frac{\alpha_i}{\gamma_{ij}} + \tau_i^E + \frac{\beta_i}{\gamma_{ij}} + \left( \frac{\alpha_i}{\gamma_i} + \frac{\alpha_i}{h_i^1} + \frac{\beta_i}{h_i^2} + \frac{\beta_i}{\gamma_i} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n x_{ij}x_{ji} \right], \quad (7)$$

где  $n$  – количество элементов системы;  $\tau_i^C$  – время выдачи запроса  $i$ -му элементу;  $\alpha_i = const$ ,  $\beta_i = const$  – объемы запросов и ответов;  $\gamma_i$  и  $\gamma_{ij}$  – пропускные способности каналов связи центр-узел и узел-элемент;  $h_1$  и  $h_2$  – скорости обработки запроса и ответа на запрос в узлах системы.

С учетом принятых в работе [13] допущений для оценки надежности варианта построения СКММ  $s$  воспользуемся соотношением:

$$k_3(s) = k^C \times (k^U)^u \times (k^E)^n \times (k^{CU})^u \times (k^{UE})^n, \quad (8)$$

где  $k^C, k^U, k^E, k^{CU}, k^{UE}$  – соответственно, коэффициенты готовности топологической структуры СКММ в целом, технических средств верхнего уровня (центра), среднего уровня (узлов), нижнего уровня (элементов), каналов связи верхнего уровня (центр – узлы), каналов связи нижнего уровня (узлы – элементы);  $u$  – количество узлов;  $n$  – количество элементов системы.

В качестве показателя живучести используем значение доли элементов в функционирующей СКММ, связанных с центром при единичных повреждениях (для равновероятного единичного повреждения центра, узлов, элементов или одной из связей) [13]:

$$k_4(s) = \min_{1 \leq j \leq n} \left\{ \frac{n - \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n x_{ji}x_{ij}}{n}, \frac{n-1}{n} \right\}, \quad (9)$$

где  $x_{ij}$  – булева переменная ( $x_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$  существует непосредственная связь;  $x_{ij} = 0$  – в противном случае),  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  – количество элементов системы.

Формально рассматриваемая задача реинжиниринга топологических структур СКММ может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}; \\ k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) \geq k_4^*, \end{cases} \quad (10)$$

где  $k_1^*$ ,  $k_2^*$ ,  $k_3^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей затрат на реинжиниринг  $k_1(s)$ , оперативности  $k_2(s)$  (7), надежности  $k_3(s)$  (8) и живучести  $k_4(s)$  (9).

### 3. АНАЛИЗ МНОЖЕСТВА ДОПУСТИМЫХ РЕШЕНИЙ

В принятых выше обозначениях множество допустимых решений задачи определяется условиями [13]:

$$S = \{s\} = \left\{ \begin{array}{l} x = [x_{ij}], x_{ij} \in \{0,1\}, i, j = \overline{1, n}, x_{i1} = 1; \\ \sum_{j=i}^n x_{ij} \geq 1, \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n x_{ij} = n + \sum_{i=1}^n x_{ii}; \\ x_{ii} = 1 \rightarrow x_{i1} = 1 \forall i = \overline{1, n}; \\ x_{ii} = 1 \wedge x_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{1 \leq i' \leq n} c_{ij'} \forall i, j = \overline{1, n}, \end{array} \right. \quad (11)$$

где  $c_{ij}, i', j = \overline{1, n}$  – стоимости связи между элементами  $i'$  и  $j$ .

Количество вариантов топологических структур СКММ при заданном количестве узлов  $u$  (размещения  $u$  узлов на базе  $n$  элементов) равно количеству сочетаний:

$$N_u(n) = C_n^u = \frac{n!}{u!(n-u)!}. \quad (12)$$

Оптимальное количество узлов  $u^0$  на этапе реинжиниринга СКММ неизвестно. В процессе решения задачи количество узлов  $u$  может изменяться в диапазоне  $0 \leq u \leq n$ . Общее количество возможных вариантов топологических структур при реинжиниринге СКММ для  $1 \leq u \leq n$  составит:

$$N(n) = \sum_{m=1}^n C_n^m = \sum_{m=1}^n \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (13)$$

Поиск наилучшего варианта реинжиниринга СКММ, содержащих даже десятки элементов, методом полного перебора  $N(n)$  вариантов (13) невозможен из-за огромных вычислительных затрат.

Для реализации эффективной стратегии направленного перебора вариантов [14–16] необходим предварительный анализ зависимостей затрат на реинжиниринг  $k_1(s^0, u^0)$  (6), оперативности  $k_2(s^0, u^0)$  (7), надежности  $k_3(s^0, u^0)$  (8) и живучести  $k_4(s^0, u^0)$  (9) оптимального варианта СКММ  $s^0 \in S$  от количества узлов  $u^0$  в ней.

На практике возможны различные варианты реинжиниринга топологической структуры СКММ между двумя крайними.

Первый вариант предполагает полную замену оборудования без использования элементов, узлов и связей существующей топологической структуры. В этом случае новый вариант построения СКММ  $s \in S$  в корне отличается от существующего  $a \in S$ , т.е.:

$$x_{ij} \neq x'_{ij}, \forall i, j = \overline{1, n}$$

и требует максимальных дополнительных затрат  $\Delta C_{\max}(a, s)$ .

Стоимость ресурсов элементов, узлов и центра, которые могут быть повторно использованы, и затраты на их модернизацию в соотношении

(6) равны нулю, т.е.  $d_i = 0, g_i = 0, \forall i = \overline{1, n}$ . Таким образом, зависимость суммарных затрат на оборудование центра, узлов и элементов

$$C(u) = C_C(u) + C_U(u) + C_E(u)$$

от количества узлов  $u$  в новой реализации системы  $s \in S$  будет монотонно возрастающей. Скорость ее роста зависит от соотношения значений  $c_i$  и  $e_i, i = \overline{1, n}$ .

С увеличением количества узлов в системе  $u$  затраты на связи узел-центр  $C_{UC}(u)$  будут увеличиваться, затраты на связи элемент-узел  $C_{EU}(u)$  уменьшаться, а их суммарное значение представляет собой унимодальную функцию от количества узлов в системе  $u$ .

С учетом этого, можно утверждать, что зависимость затрат на систему  $C_{\max}(u)$  от количества узлов в ней будет одноэкстремальной.

Второй крайний вариант предполагает использование существующей топологической структуры:

$$x_{ij} = x'_{ij}, \forall i, j = \overline{1, n}$$

При этом дополнительные затраты отсутствуют  $\Delta C_{\min}(a, s) = 0$ , а зависимость затрат от количества узлов  $u$  в системе, построенной на старой элементной базе и технологиях, также будет унимодальной.

Между крайними существует множество вариантов, в которых могут использоваться или модернизироваться некоторые из существующих элементов, узлов, центров, а также связей между ними. При этом, модернизация требует меньших дополнительных затрат, чем создание новых элементов, узлов, центра и связей между ними, т.е.  $d_i < c_i, d_{ij} < c_{ij}$ .

Время получения информации о наблюдаемых объектах  $k_2(u)$  (7), как показатель оперативности СКММ, представляет собой монотонно возрастающую функцию от количества промежуточных узлов в системе  $u$ .

Значение коэффициента готовности, характеризующего показатель надежности СКММ  $k_3(u)$  (8), монотонно убывает с увеличением количества узлов в системе  $u$ .

Огибающая локальных экстремумов показателя живучести СКММ  $k_4(u)$  (9) представляет собой унимодальную функцию от количества узлов в ней  $u$ .

### 4. ПОИСК РЕШЕНИЯ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА

По результатам анализа зависимостей затрат на реинжиниринг  $k_1(u)$  (6), оперативности  $k_2(u)$  (7), надежности  $k_3(u)$  (8) и живучести  $k_4(u)$  (9) от количества узлов  $u$  в системе множество альтернатив, на котором целесообразно производить поиск наиболее экономного варианта (10), может быть существенно сокращено по сравнению с множеством допустимых решений (11).

Максимальные значения показателя оперативности  $k_2(u)$ , надежности  $k_3(u)$  и живучести

$k_4(u)$  имеют при минимальном количестве узлов в системе  $u$ .

Огибающая локальных экстремумов затрат (при фиксированном количестве узлов) на создание таких систем представляют собой одноэкстремальную функцию от количества узлов  $u$  [12, 14–15], минимум которой достигается при  $u < \frac{n}{2}$ .

Количество альтернативных вариантов, анализируемых в процессе поиска локального экстремума функции цели (6), резко возрастает при увеличении количества узлов в системе  $u$  (12).

Стоимость наилучшего варианта системы  $s^o$  после реинжиниринга  $C^o = C(s^o)$  не превышает стоимости наилучшего варианта системы  $C_b^o = C(b)$ , полученного без использования существующей топологической структуры  $a \in S$  (4).

Исходя из характера зависимостей (7) – (9), можно утверждать, что причиной невыполнения ограничений по оперативности  $k_2(a) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(a) \geq k_3^*$  и живучести  $k_4(a) \leq k_4^*$  может быть избыточное количество узлов в системе  $u$ .

С учетом этого для решения задачи реинжиниринга топологических структур СКММ (10) предлагается метод направленного перебора локальных экстремумов функции цели. Его суть состоит в следующем.

Начиная с  $u = 0$  (система не содержит промежуточных узлов), решать задачи оптимального размещения узлов с учетом существующей топологической структуры по критерию затрат  $k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}$  (6) для количества узлов  $u := u + 1$  пока выполняются все ограничения по оперативности  $k_2(a) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(a) \geq k_3^*$  и живучести  $k_4(a) \leq k_4^*$  [14–16]. Определить значение максимального количества узлов  $u_{\max}$ , для которого выполняются все накладываемые ограничения.

На полученном множестве решений задачи размещения  $u$  узлов ( $1 \leq u \leq u_{\max}$ ) выбрать то, которому соответствует минимальное значение критерия дополнительных затрат  $\Delta C(a, s)$  (6).

Точность предложенного метода определяется точностью метода решения задачи размещения узлов. При использовании точного метода решения задачи размещения узлов предложенный метод позволяет получать точное решение задачи реинжиниринга топологических структур СКММ.

Метод имеет тот же порядок временной сложности, что и метод направленного перебора локальных экстремумов функции цели для структурно-топологической оптимизации территориально распределенных объектов.

Для случаев, когда известно, что огибающая локальных экстремумов дополнительных затрат  $\Delta C(a, s)$  (6) является одноэкстремальной относительно количества узлов  $u$  в системе, предлагается модификация метода решения задачи. Ее суть состоит в том, что начиная с  $u = 0$ , решать

задачи оптимального размещения узлов с учетом существующей топологической структуры по критерию затрат  $k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}$  (6) для количества узлов  $u := u + 1$  пока выполняются все ограничения по оперативности  $k_2(a) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(a) \geq k_3^*$ , живучести  $k_4(a) \leq k_4^*$  и значение функции дополнительных затрат  $\Delta C(a, s)$  (6) убывает. Последнее из решений задачи размещения  $u$  узлов будет решением задачи (10).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках решения проблемы оптимизации территориально распределенных объектов сформулирована постановка задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по показателю минимума затрат.

Предложена математическая модель задачи, учитывающая затраты на модернизацию и демонтаж имеющегося оборудования, а также ограничения на показатели оперативности, надежности и живучести как функции от параметров топологической структуры системы.

На основе анализа особенностей целевой функции и ограничений задачи предложен эффективный метод направленного перебора вариантов, позволяющий получать оптимальные решения для систем с большим количеством структурных элементов.

Предложенные математическая модель и метод могут быть адаптированы для решения задач оптимизации информационных, логистических систем и систем обслуживания.

Практическое применение полученных результатов позволяет сократить сроки и повысить точность решения задач реинжиниринга систем большой размерности.

## Литература

- [1] Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. Синтез и планирование развития. – М.: Наука, 1993. – 160 с.
- [2] Бескорвайный В.В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – Вып. 120. – С. 29–37.
- [3] Кочкарь Д.А., Мединцев С.Ю., Орехов А.А. Оптимальное размещение вышек наблюдения наземных систем видеомониторинга лесных пожаров // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 7. – С. 311–314.
- [4] Комяк В.М., Панкратов А.В., Приходько А.Ю., Светличная С.Д. Оптимизация размещения пунктов наблюдения наземных систем видеомониторинга лесных пожаров // Проблемы пожарной безопасности. – 2014. – №36. – С. 117–126.
- [5] Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / В. В. Малышев, М. Н. Красильщиков, В. Т. Бобронников и др. ; под общ. ред. В. В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
- [6] Ahmed M. Remote monitoring with hierarchical network architectures for large-scale wind power farms

// Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2015. – № 10(3). – P. 1319–1327.

- [7] *Zhang Y.* An integrated environment monitoring system for underground coal mines – wireless Sensor Network subsystem with multi-parameter monitoring // *Sensors*. – 2014. – № 14(7). – P. 13149–13170.
- [8] *Нефёдов Л.И., Шевченко М.В., Кудырко О.Н.* Модель структурно-топологического синтеза системы мониторинга качества добычи газа // *ScienceRise*. – 2014. – № 2. – P. 61–67.
- [9] *Mogheir Y.* Entropy and Multi-Objective Based Approach for Groundwater Quality Monitoring Network Assessment and Redesign // *Water Resources Management*. – 2008. – № 28(3). – P. 1603–1620.
- [10] Water quality monitoring network design / N. B. Harmanciogamalu, N. B. Fistikoglu, O. Ozkul and other; ed. N. B. Harmanciogamalu. – Dordrecht : Springer Science & Business Media, 1999. – 290 p.
- [11] *Odom K.R.* Assessment and Redesign of the Synoptic water quality monitoring network in the Great Smoky Mountains National Park. Ph.D Dissertation, University of Tennessee. Knoxville, USA. – 2013. – 268 p.
- [12] *Бескорвайный В.В.* Метод структурно-топологической оптимизации для реинжиниринга территориально распределенных объектов // *Системы обработки информации*. – 2004. – Вып. 4. – С. 26–33.
- [13] *Бескорвайный В.В., Подоляка К.Е.* Разработка модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 4 (76). – С. 49–55.
- [14] *Петров Э.Г., Болотов А.Б., Шабанов С.В.* Алгоритм топологической оптимизации централизованных сетей передачи данных // *Механизация и автоматизация управления*. – 1980. – № 4. – С. 50–55.
- [15] *Петров Э.Г., Болотов А.Б., Бескорвайный В.В.* Алгоритм структурно-топологической оптимизации централизованных сетевых систем // *Механизация и автоматизация управления*. – 1986. – № 1. – С. 28–31.
- [16] *Бескорвайный В.В.* Модификация метода направленного перебора для синтеза топологии систем с радиально-узловыми структурами // *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. – 2003. – Вып. 123. – С. 110–116.

Поступила в редколлегию 11.09.2015



**Бескорвайный Владимир Валентинович**, доктор технических наук, профессор, академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, профессор кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: теория принятия решений;

математическое моделирование; структурный синтез и оптимизация территориально распределенных объектов.



**Подоляка Ксения Евгеньевна**, аспирантка кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: разработка и применение методов реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга.

УДК 004.9

**Метод реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу** / В.В. Бескорвайний, К.Є. Подоляка // *Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал*. – 2015. – Том 14. – № 3. – С. 204–209.

У роботі сформульовано постановку задачі реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу за вартісним показником з урахуванням додаткових витрат на демонтаж та модернізацію обладнання, а також можливості його подальшого використання. Розроблено математичну модель задачі з урахуванням обмежень на показники оперативності, надійності та живучості системи. На основі аналізу особливостей цільової функції і обмежень задачі запропоновано ефективний метод спрямованого перебору варіантів, що дозволяє оптимальне рішення.

*Ключові слова:* система великомасштабного моніторингу, структура, топологія, реінжиніринг, оптимізація.

Бібліогр.: 16 найм.

UDK 004.9

**Method of reengineering topological structures of large-scale monitoring systems** / V.V. Beskorovainyi, K.E. Podoliaka // *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* – 2015. – Vol. 14. – № 3. – P. 204–209.

The paper presents the formulated problem of reengineering the topological structures of large-scale monitoring systems by cost parameters, taking into account the additional costs of dismantling and modernization of equipment and the possibility of its further use. A mathematical model of the problem with the limitations on the performance efficiency, reliability and survivability of the system has been developed. Based on the analysis of the characteristics of the objective function and constraints of the problem an effective method of directional options sorting, allowing to get optimal solutions, is suggested.

*Keywords:* large-scale monitoring system, structure, topology, reengineering, optimization.

Ref.: 16 items.