

УДК 004.9

В.В. Бескорвайный, К.Е. Подоляка

Харьковский национальный университет радиотехники, Харьков

## ВЫБОР МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ РЕИНЖИНИРИНГЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

Рассматривается задача реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга с учетом показателей затрат, оперативности, надежности и живучести. В рамках кардиналистического подхода предложен метод многокритериальной оптимизации трехуровневых централизованных систем, использующий направленный перебор вариантов по количеству узлов в системе. В нем реализованы процедуры оценки важности критериев по методу анализа иерархии, формирования подмножества Парето-оптимальных вариантов и их количественной оценки. Результаты экспериментальных исследований подтвердили целесообразность параллельной генерации вариантов и формирования подмножества эффективных решений.

**Ключевые слова:** система крупномасштабного мониторинга, структура, топология, реинжиниринг, оптимизация, частные критерии, множество компромиссов, обобщенный критерий эффективности.

### Введение

Современные системы крупномасштабного мониторинга (СКММ) воздушного пространства, радиоэлектронной обстановки, космических объектов, экологии, других объектов характеризуются множеством противоречивых показателей, таких как оперативность, надежность, живучесть, затраты на создание и эксплуатацию. С учетом этого, выбор наилучшего варианта при их создании или реинжиниринге требует решения задачи многокритериального выбора компромиссного решения в условиях большей или меньшей неопределенности. Неопределенность, в первую очередь, связана с неполным знанием предпочтений между показателями качества и альтернативами.

Современная теория принятия решений предполагает выбор альтернатив на основе ординалистического (предпочтений лица, принимающего решения – ЛПР) или кардиналистического (с использованием формальных моделей) подходов. В качестве методологической основы для построения метрики ранжирования альтернатив используется теория полезности, в соответствии с которой для каждой из альтернатив, принадлежащих множеству допустимых  $s \in S$ , может быть определено значение ее полезности (ценности)  $P(s)$  [1]. При этом для любой пары альтернатив  $s, v \in S$ :

$$s \sim v \leftrightarrow P(s) = P(v); \quad s \succ v \leftrightarrow P(s) > P(v);$$

$$s \succeq v \leftrightarrow P(s) \geq P(v).$$

В рамках этого подхода выбор лучшей альтернативы осуществляется на основе аддитивной, мультипликативной или смешанной функции обобщенной полезности.

К настоящему времени создан широкий арсенал математических моделей и методов выбора решений в условиях многокритериальности. Значительная часть исследований в этой области направлена на измерение и шкалирование частных критериев [1], выбор функции нормирования частных критериев, оценку их важности [1 – 3]. В зависимости от роли ЛПР в процессе выбора лучшей альтернативы выделяется множество методов, которые отличаются способом перехода к скалярной оценке полезности альтернатив. В работах [4 – 10] предложены и (или) детально описаны методы принятия решений на основе теории полезности, анализа иерархий, теории нечетких множеств, методов ELECTRE и PROMETHEE, эвристических методов (взвешенной суммы оценок критериев, компенсации).

К числу достоинств существующего аппарата теории полезности относят возможность учета неопределенности и качественных предпочтения ЛПР [2, 7].

Преимуществами метода анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process – AHP) являются наглядное системное представление структуры проблемы в виде иерархии и возможность четкого задания суждений экспертов. К числу недостатков этого метода относят его сложность и неустойчивость получаемых оценок к введению недоминирующих альтернатив. Это может приводить к противоречиям при ранжировании критериев и альтернатив [2, 6, 7].

Аппарат теории нечетких множеств позволяет использовать нечеткие данные и учитывать неполную информацию. Недостатком этой группы методов является то, что их применение требует значительных затрат на предварительное моделирование [2, 7].

Метод ELECTRE позволяет учитывать неопределенность данных, однако требует дополнительных данных для выполнения процедуры ранжирования альтернатив и не позволяет непосредственно идентифицировать сильные и слабые стороны альтернатив [2, 7, 10].

PROMETHEE прост в использовании и не требует выполнения предположения о пропорциональности критериев, предоставляет графический инструмент для представления ранжирования альтернатив. При этом метод не предоставляет четкого подхода к назначению весов [7, 10].

На последних этапах реинжиниринга необходимо более тщательный анализ альтернативных решений. На практике с этой целью применяют сочетания различных методов, что позволяет компенсировать их недостатки для получения эффективного решения [7]. Кроме того, для сокращения времени выбора наилучшего варианта реинжиниринга СКММ целесообразно предварительно выделять подмножество компромиссных (Парето-оптимальных) решений.

Целью исследования является разработка метода выбора решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по множеству функционально-стоимостных показателей.

### Постановка и математическая модель задачи

Каждый вариант топологической структуры СКММ задается количеством узлов, местами их размещения и схемой связей между элементами, узлами и центром. Задаваемые ограничения на технологию функционирования, структуру и параметры определяют подмножество допустимых проектных решений. Задача выбора эффективных проектных решений состоит в поиске среди множества допустимых решений таких вариантов, которые являются лучшими в заранее определенном смысле [11]. Таким образом, на первом этапе реинжиниринга желательно максимально полно представить все возможные варианты построения системы. Выбор оптимального проектного решения проводится при ограничениях, определяемых допустимыми затратами на время и средства проектирования.

Задача реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга с радиально-узловой структурой 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), за-

даваемый местами расположения элементов, узлов (размещаются на базе элементов), 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 показателям затрат, оперативности, надежности и живучести 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  $C_C(a), a \in S$  состоят из затрат на центр  $C_C(a)$ , узлы  $C_U(a)$ , элементы  $C_E(a)$ , связи между узлами и центром  $C_{UC}(a)$ , элементами и узлами  $C_{EU}(a)$ . Критерий минимума затрат  $k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}$  (с учетом возможности использования топологической структуры существующей системы  $a \in S$ ) представим в виде:

$$k_1(a, s) = \sum_{i=1}^n [(c_i + e_i)(1 - x'_{ii})x_{ii} + (d_i - g_i)x'_{ii}x_{ii}] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(c_{ij} + e_{ij})(1 - x'_{ij})x_{ij} + (d_{ij} - g_{ij})x'_{ij}x_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S} \quad (1)$$

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 модерниза-

ции и стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы для связи между элементами  $i$  и  $j$ ;  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ.

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

$$k_2(s) = \max_{1 \leq i \leq n} \left[ \begin{aligned} & \tau_i^C + \frac{\alpha_i}{\gamma_{ij}} + \tau_i^E + \frac{\beta_i}{\gamma_{ij}} + \\ & + \left( \frac{\alpha_i}{\gamma_i} + \frac{\alpha_i}{h_1^i} + \frac{\beta_i}{h_2^i} + \frac{\beta_i}{\gamma_i} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ji} \end{aligned} \right], \quad (2)$$

где  $n$  – количество элементов системы;  $\tau_i^C$  – время выдачи запроса  $i$ -му элементу;  $\alpha_i = \text{const}$ ,  $\beta_i = \text{const}$  – 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.

При использовании в системе мониторинга не строго детерминированной технологии сбора информации, приводящей к возникновению в сети неоднородных потоков, соотношение (2) используется для предварительной оценки оперативности. При выборе окончательного решения для оценки времени получения информации в СКММ целесообразно использовать имитационное статистическое моделирование.

Для оценки надежности варианта построения СКММ  $s$  воспользуемся соотношением:

$$k_3(s) = k^C \times (k^U)^u \times (k^E)^n \times (k^{CU})^u \times (k^{UE})^n, \quad (3)$$

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):

$$k_4(s) = \min_{1 \leq j \leq n} \left\{ \left( n - \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n x_{ji} x_{ij} \right) / n, \frac{n-1}{n} \right\}, \quad (4)$$

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:

$$\begin{cases} k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}, k_1(a, s) \leq k_1^*; \\ k_2(s) \rightarrow \{ \max_{1 \leq i \leq n} \phi_i \} \rightarrow \min_{s \in S}, k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \rightarrow \max_{s \in S}, k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) = \{ \min_{1 \leq j \leq n} [k_{4j}^{CU}(s), k_{4j}^U(s)] \} \rightarrow \max_{s \in S}, k_4(s) \geq k_4^*, \end{cases} \quad (5)$$

где  $k_1^*, k_2^*, k_3^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей затрат на реинжиниринг  $k_1(a, s)$  (1), оперативности  $k_2(s)$  (2), надежности  $k_3(s)$  (3) и живучести  $k_4(s)$  (4).

### Метод решения задачи

В рамках кардиналистического подхода для многокритериальной количественной оценки качества вариантов реинжиниринга топологических структур СКММ воспользуемся аддитивной сверткой частных критериев [15 – 17]:

$$P(s) = \sum_{i=1}^4 \lambda_i \xi_i(s), \quad (6)$$

где  $\lambda_i, i = \overline{1, 4}$  – коэффициент важности критерия  $k_i(s)$ , выбираемый с учетом условий  $\lambda_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$ ;  $\xi_i(s)$  – функция полезности частного критерия  $k_i(s)$ ;

$$\xi_i(s) = \left( \frac{k_i(s) - k_i^-}{k_i^+ - k_i^-} \right)^{\mu_i}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (7)$$

где  $k_i^+, k_i^-, i = \overline{1, 4}$  – соответственно текущее, наилучшее и наихудшее значения  $i$ -го частного критерия;  $\mu_i$  – параметр, определяющий вид зависимости (7): выпуклая, линейная или вогнутая.

Тогда задача выбора наилучшего компромиссного решения (5) может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} s^0 &= \arg \max_{s \in S} \sum_{i=1}^4 \lambda_i \xi_i; \\ k_1(a, s) &\leq k_1^*; \quad k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) &\geq k_3^*; \quad k_4(s) \geq k_4^*, \end{aligned} \quad (8)$$

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

Для определения весовых коэффициентов аддитивной свертки частных критериев (6) воспользуемся методом анализа иерархий АНР [4 – 6].

В общем случае его реализация состоит из следующих этапов:

- описание задачи в виде иерархической структуры с уровнями: цель – критерии – альтернативы;
- формирование структуры модели;
- попарные сравнения элементов каждого уровня, с присвоением количественных оценок;
- вычисление коэффициентов важности элементов каждого уровня;
- вычисление веса каждой из альтернатив и определение наилучшей.

По результатам анализа решаемой задачи создана иерархическая структура модели (рис. 1). Для нее определим приоритеты критериев. Сравним важность критериев, сформируем матрицу парных

сравнений  $Y = [y_{ij}]$ , элементы которой служат оценками относительной важности критерия  $i$  относительно критерия  $j$ . При этом если  $y_{ij} = f_k$ , то  $y_{ji} = 1 / f_k$ , где  $f_k$  – оценка важности критерия  $i$  относительно критерия  $j$ .

Для матрицы  $Y = [y_{ij}]$  определим собственный вектор уровня критериев  $w = [w_i]_{i=1}^4$  и весовые коэффициенты аддитивной свертки частных критериев  $w_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 y_{ij}}$ ,  $i, j = \overline{1,4}$ ;  $\lambda_i = w_i / \sum_{j=1}^4 w_j$ ,  $i = \overline{1,4}$ . (9)

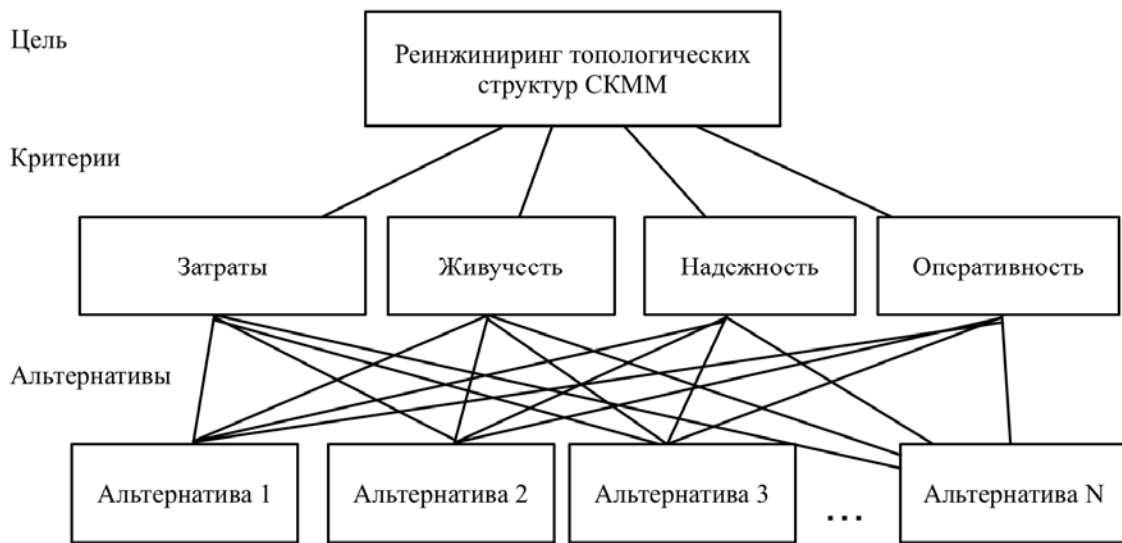


Рис. 1. Структура модели задачи оценки важности частных критериев на основе метода анализа иерархий

На последних этапах метод предполагает анализ всего множества возможных вариантов реинжиниринга топологических структур системы крупномасштабного мониторинга.

Его мощность в общем случае составляет:

$$N(n) = \sum_{u=1}^n C_n^u = \sum_{m=1}^n \frac{n!}{u!(n-u)!} = 2^n, \quad (10)$$

где  $n$  – количество мест возможного размещения узлов (элементов системы);  $u$  – количество узлов в системе.

Ввиду того, что ЛПР не под силу анализ огромного количества допустимых вариантов реинжиниринга топологических структур СКММ  $N$  (10), а количественные методы оптимизации позволяют определять численные значения функционально-стоимостных характеристик топологической структуры, предлагается реализовать последний этап метода в автоматическом режиме. С этой целью можно использовать комбинаторные методы направленного перебора или приближенные (эвристические) методы [18]. При этом, не зависимо от используемого метода анализа, целе-

сообразным является выделение подмножества эффективных (компромиссных, Парето-оптимальных) вариантов.

Традиционно в задачах выбора многокритериальных решений предполагается наличие сформированного множества допустимых решений  $S = \{s\}$ . При решении задач проектирования или реинжиниринга объектов это требует хранения огромных массивов излишних данных. Для уменьшения объема требуемой памяти и сокращения времени поиска наилучшего компромиссного решения предлагается формировать множество компромиссов  $S^K \subseteq S$  параллельно с формированием множества альтернативных решений.

Анализ зависимостей значений частных критериев  $k_1(a, s)$  (1),  $k_2(s)$  (2),  $k_3(s)$  (3) и  $k_4(s)$  (4) от количества узлов в системе  $u$  позволил выявить границы подмножества компромиссов  $S^K [1, u_{\max}]$ . Значение  $u_{\max}$  соответствует количеству узлов в системе, после которого значения всех частных критериев ухудшаются (рис. 2).

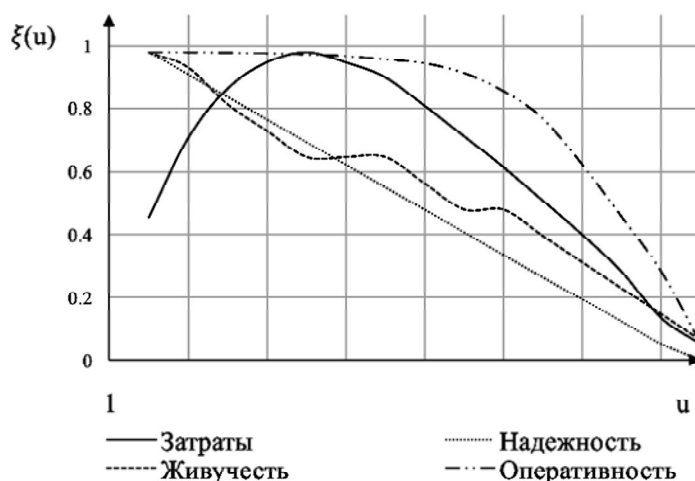


Рис. 2. Графики изменения функций полезности частных критериев (7) с увеличением количества узлов в системе u

Алгоритм формирования подмножества компромиссов  $S^K$  включает следующую последовательность шагов.

1. Задать: начальное значение количества узлов  $u := 1$ ; начальное значение номера варианта решения  $i := 0$ ; множество компромиссных вариантов – пустое,  $S^K = \emptyset$ .

2. Увеличить значение счетчика  $i := i + 1$ , сформировать вариант топологической структуры  $s_i \in S$  и вычислить оценки затрат  $k_1(a, s)$  (1), оперативности  $k_2(s)$  (2), надежности  $k_3(s)$  (3), живучести  $k_4(s)$  (4).

3. Сравнить вариант  $s_i$  с каждым из вариантов  $s_j \in S^K, j = 1, \dots, |S^K|$ . Если хотя бы один вариант  $s_j \succ s_i$ , исключить  $s_i$  из дальнейшего рассмотрения и перейти к шагу 4; в противном случае, добавить  $s_i$  в  $S^K$  и удалить из  $S^K$  все  $s_j$ , которые по всем показателям хуже  $s_i$ .

4. Если условия останова метода формирования множества допустимых решений  $S$  для заданного значения количества узлов  $u$  не выполняются, перейти к п. 2, в противном случае – к п. 5.

5. Если наилучшие значения всех показателей (1) – (4) для значения  $u$  хуже, чем для  $u - 1$ , перейти к пункту 6; в противном случае  $u = u + 1, i := 0$  и перейти к п. 2.

6. Окончание работы алгоритма: выделено подмножество компромиссных решений  $S^K$ .

Для оценки относительных размеров (мощностей) подмножеств компромиссных решений при реинжиниринге топологических структур  $S^K$  была проведена серия компьютерных экспериментов, в

ходе которых было решено 60 задач (по 10 задач с количеством элементов  $n = 15 \div 40$ ) (табл. 1, 2).

При этом были получены оценки средних  $\delta N$  и максимальных  $\delta N_{max}$  относительных мощностей подмножеств компромиссных решений  $S^K$  в зависимости от количества элементов СКММ  $n$ .

Таблица 1

Относительные мощности подмножеств компромиссных вариантов  $S^K$  в множествах допустимых вариантов  $S$ , %

n	15	20	25	30	35	40
$\delta N$	2.7	0.89	0.19	0.11	0.07	0.009
$\delta N_{max}$	3.4	1.86	0.25	0.15	0.09	0.012

Данные для средних значений  $\delta N(n)$  относительных мощностей подмножеств компромиссных решений  $S^K$  аппроксимируются с достоверностью  $R = 0.96$  функцией

$$\delta N(n) = 56.786 \cdot e^{-0.21 \cdot n}$$

Параллельное формирование подмножества компромиссов  $S^K$  позволяет существенно уменьшить время решения задачи (табл. 2).

Таблица 2

Среднее относительное сокращение времени формирования множества компромиссов, %

n	15	20	25	30	35	40
$\delta t$	2.4	4.8	11.6	18.7	25.1	36.2

Данные для среднего относительного сокращения времени формирования подмножества компро-

миссов  $S^K$  за счет распараллеливания процесса аппроксимируются с достоверностью  $R = 0.99$  функцией

$$\delta t(n) = 0.0299 \cdot n^2 - 0.2918 \cdot n - 0.325.$$

Анализ поведения функций полезности частных критериев оперативности, надежности и живучести  $\xi_i(u), i = \overline{2,4}$  (7) при увеличении количества узлов в системе  $u$ , позволяет сделать вывод о том, что ограничения по оперативности  $k_2(a) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(a) \geq k_3^*$  и живучести  $k_4(a) \geq k_4^*$  выполняются уже для  $u = 1$  или не могут быть выполнены ни для одного варианта на всем интервале  $[1, u_{\max}]$ .

С учетом этого, а также возможной многоэкстремальности функции (1) от количества узлов в системе  $k_1(u)$ , для поиска глобального оптимального решения задачи предлагается использовать идею направленного перебора [18].

Суть ее состоит в определении отрезка  $[u_{\min}, u_{\max}]$ , который гарантированно содержит оптимальное решение.

В качестве нижней границы количества узлов в системе выберем  $u_{\min} = 1$ .

Для определения верхней границы  $u_{\max}$  необходимо определить минимум максимальных затрат  $\Delta C_{\max}$ .

С этой целью требуется решить задачу синтеза оптимальной топологии сети (без учета существующей топологии).

Поиск оптимального решения задачи будем производить на отрезке  $[1, u_{\max}]$ , изменяя количество узлов в системе по правилу  $u := u + 1$ .

Для решения задачи предложенным методом необходимо решение двух подзадач поиска минимума максимальных затрат  $\Delta C_{\max}$  и поиска минимума функции затрат на реинжиниринг. Каждая задача сравнима по сложности с классической задачей структурно-топологического синтеза. С учетом этого временная сложность предлагаемого метода имеет порядок  $2 \cdot O[t(n)]$ , где  $t(n)$  – временная сложность метода решения базовой задачи структурно-топологического синтеза.

Точность предлагаемого метода определяется точностью метода размещения узлов. Для уменьшения времени решения задачи предлагается ряд модификаций метода направленного перебора с использованием различных процедур определения мест размещения узлов.

В качестве базовой использована комбинаторная процедура, реализующая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качест-

ве альтернативных предлагается использовать процедуры на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига (Simulated annealing), поиска с запретами (Tabu Search), эволюционного синтеза, кластеризации на основе k-means.

По результатам экспериментальных исследований определены оценки точности  $O[\varepsilon(n)]$  и временной сложности  $O[t(n)]$  предлагаемых модификаций метода, выполнены их полиномиальные аппроксимации.

Это позволяет выбирать наиболее эффективную модификацию метода при решении практических задач, исходя их требуемой точности и имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Рейтинг модификаций метода по показателю точности: покоординатная оптимизация, поиск с запретами, эволюционный синтез на основе генетического алгоритма, имитация отжига, кластеризация на основе k-means.

Рейтинг модификаций метода по показателю временной сложности: метод имитация отжига, кластеризация на основе k-means, поиск с запретами, эволюционный синтез на основе генетического алгоритма, покоординатная оптимизация.

## Выводы

Разработан метод реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести. В нем рационально сочетаются достоинства экспертной оценки важности частных критериев путем анализа иерархии и направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе с параллельным выделением подмножества Парето-оптимальных решений и выбором единственного решения.

Практическое применение метода позволит сократить время решения задачи за счет параллельного с генерацией вариантов формирования подмножества Парето-оптимальных решений. При необходимости решения задач большой размерности предлагается использовать модификации метода, реализующие размещения узлов на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации на основе k-means.

Предложенный метод может быть развит в части формирования обобщенного критерия эффективности и использован при решении задач оптимизации информационных, транспортных, логистических систем и систем обслуживания. Его практическое применение позволит сократить сроки решения задач реинжиниринга и (или) затраты на реализацию топологических структур реструктуризируемых объектов.

## Список литературы

1. Овезгельдыев О. А. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации / О.А. Овезгельдыев, Э.Г. Петров, К.Э. Петров. – К.: Наукова думка, 2002. – 161 с.
2. Christodoulos A. Recent Advances in Global Optimization / A. Christodoulos, M. Pardalos. – Princeton: Princeton University Press, 2014. – 648 p.
3. Соболева Е.В. Модификации критериев обобщенной полезности в задачах идентификации многокритериального выбора / Е.В. Соболева // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2012. – № 3. – С. 58-65.
4. Xu L. Introduction to multi-criteria decision making and the evidential reasoning approach / L. Xu, J.B. Yang. – Manchester: Manchester School of Management, 2001. – P. 163-187.
5. Hwang C.L. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey / C.L. Hwang, K. Yoon – Springer Science & Business Media, 2012. – Vol. 186. – 270 p.
6. Саати Т. Теория принятия решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Velasquez M. An analysis of multi-criteria decision making methods // International Journal of Operations Research / M. Velasquez, P.T. Hester. – 2013. – Vol. 10. – № 2. – P. 56-66.
8. Ambrasaitė I. MCDA and risk analysis in transport infrastructure appraisals: The Rail Baltica case Ambrasaitė, I., Barfod, M., and Salling, K // Procedia Social and Behavioral Sciences. – 2011. – Vol. 20. – P. 944-953
9. Kiker G.A. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making / G.A. Kiker et al. // Integrated environmental assessment and management. – 2005. – Vol. 1, № 2. – P. 95-108.
10. Corrente S. Multiple criteria hierarchy process with ELECTRE and PROMETHEE / S. Corrente, S. Greco, R. Slowinski // Omega. – 2013. – Vol. 41, № 5. – P. 820-846.
11. Чеботарева Д.В. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи / Д.В. Чеботарева, В.М. Безрук. – Х.: Компания СМИТ, 2013. – 148 с.
12. 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.
13. Бескоровайный В.В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов / В. В. Бескоровайный // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 3. – С. 94-96.
14. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
15. Модели и методы управления устойчивым развитием социально-экономических систем: монография / Е.В. Губаренко, А.О. Овезгельдыев, Э.Г. Петров; под. общ. ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: Гринь Д.С., 2013. – 252 с.
16. Методы и модели принятия решений в условиях многокритериальности и неопределенности: моногр. / Э.Г. Петров, Н.А. Брынза, Л.В. Колесник, О.А. Писклякова; под. общ. ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 192 с.
17. Введение в нормативную теорию принятия решений. Методы и модели: монография / В.В. Крючковский, Э.Г. Петров, Н.А. Соколова, В.Е. Ходаков; под. общ. ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: Гринь Д.С., 2013. – 284 с.
18. Бескоровайный В.В. Метод реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескоровайный, К.Е. Подоляка // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 197–202.

Поступила в редакцию 1.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.И. Нефедов, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.

### ВИБІР БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ РІШЕНЬ ПРИ РЕІНЖІНІРИНГУ ТОПОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР СИСТЕМ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ МОНІТОРИНГУ

В.В. Бескоровайный, К.Е. Подоляка

Розглядається задача реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу з урахуванням показників витрат, оперативності, надійності та живучості. У рамках кардиналістичного підходу запропоновано метод багатокритеріальної оптимізації тривірневих централізованих систем, що використовує спрямований перебір варіантів за кількістю вузлів у системі. У ньому реалізовані процедури оцінки важливості критеріїв за методом аналізу ієрархії, формування підмножини Парето-оптимальних варіантів і їх кількісної оцінки. Результати експериментальних досліджень підтвердили доцільність паралельної генерації варіантів і формування підмножини ефективних рішень.

**Ключові слова:** система великомасштабного моніторингу, структура, топологія, реінжиніринг, оптимізація, часткові критерії, множина компромісів, узагальнений критерій ефективності.

### SELECTION MULTICRITERIA DECISION IN PROCESS OF REENGINEERING THE TOPOLOGICAL STRUCTURE OF LARGE-SCALE MONITORING SYSTEMS

V.V. Bezkorovainyi, K.E. Podoliaka

In paper considered the problem of reengineering of topological structures of large-scale monitoring systems based on indicators of cost, efficiency, reliability and survivability. As part cardinal approach proposed a method of multi-criteria optimization of three-level centralized systems using a directed search option on the number of nodes in the system. Proposed method implements the procedure of evaluating importance of criteria based on method of hierarchy analysis and forming a subset of the Pareto-optimal options and their quantification. The experimental results confirmed the appropriateness of parallel generation options and form a subset of effective solutions.

**Keywords:** large-scale monitoring system, structure, topology, re-engineering, optimization, particular criteria, set of compromises, the generalized criterion of efficiency.