

МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ РЕИНЖИНИРИНГА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

БЕСКОРОВАЙНЫЙ В.В., ПОДОЛЯКА К.Е.

Предлагаются модификации метода решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, использующие схемы направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе. По результатам экспериментальных исследований получены оценки точности и временной сложности предложенных модификаций метода для решения задачи по критерию минимума затрат.

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

Key words: Large-scale monitoring system, structure, topology, reengineering, optimization, directed search.

Введение

Реинжиниринг систем крупномасштабного мониторинга (СКММ) предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации [1]. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей СКММ незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур. Для их решения используются точные (комбинаторные) и приближенные (в том числе эвристические) методы [2, 3]. Точные методы позволяют гарантированно найти оптимальное решение, однако, ввиду NP-сложности задач, они применимы только для оптимизации простейших систем с небольшим количеством элементов.

Среди приближенных методов, используемых для решения задач топологической оптимизации по критерию минимума затрат, широко распространены методы эволюционного синтеза, основанные на применении генетических алгоритмов (ГА) [4 – 7], и методы, использующие идеи покоординатной оптимизации [8, 9].

Анализ методов локального поиска для решения задач топологической оптимизации представлен в работах [10 – 12].

Для снижения временной сложности и повышения точности приближенных методов структурно-топологической оптимизации применяют:

– предварительное определение множества элементов, на базе которых целесообразно создавать узлы

(анализ матрицы ближайших соседей, анализ минимального стягивающего дерева, анализ стягивающего дерева, связывающего элементы с центром) системы [13 – 15];

– предварительную оценку оптимального количества узлов системы [3, 16, 17];

– предварительную кластеризацию элементов существующей системы или объектов мониторинга (k-means, c-means, k-means++) [18 – 20];

– перезапуск алгоритмов с множеством различных начальных размещений элементов и (или) узлов системы (процедура Multi-start) [21];

– метаэвристики, предполагающие улучшение решения путем временного отхода к худшему варианту, что позволяет выходить из локального оптимума [22, 23].

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

Целью работы является модификация метода направленного перебора [24] для снижения временной сложности решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых СКММ.

1. Постановка и математическая модель задачи

Задача реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга с радиально-узловой структурой рассматривается в следующей постановке [25]. Задано:

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

– существующий вариант топологической структуры системы $a \in S$ (где S – множество допустимых вариантов), задаваемый местами расположения элементов

$I = \{i\}$, $i = \overline{1, n}$, узлов (размещаются на базе элементов), центра (без потери общности будем считать, что он расположен на базе элемента $i = 1$), а также связи 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 эксплуатацию (созданные или приведенные) центра, элементов, узлов $[c_i]$, $i = \overline{1, n}$ и связей $[c_{ij}]$, $i = \overline{1, n}$.

Необходимо определить наилучший $s^0 \in S$ по показателю затрат $k_1(a, s)$ вариант реинжиниринга топологической структуры СКММ с учетом заданных ограничений на показатели оперативности (времени получения информации) $k_2(s) \leq k_2^*$, надежности $k_3(s) \geq k_3^*$ и живучести $k_4(s) \geq k_4^*$.

Множество допустимых решений задачи определяется условиями:

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

где S – множество допустимых вариантов; s – вариант топологической структуры; $x = [x_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ – матрица связей (x_{ij} – булева переменная, $x_{ij} = 1$, если между элементами i и j существует непосредственная связь; $x_{ij} = 0$ – в противном случае; $x_{ii} = 1$, если на базе элемента i размещается узел системы, $x_{ii} = 0$ – в противном случае $i = \overline{1, n}$); n – количество элементов системы; $c_{i'j}$, $i', j = \overline{1, n}$ – стоимость связи между элементами i' и j .

В качестве критерия используется показатель минимума затрат на реинжиниринг [25]:

$$\begin{aligned} k_1(a, s) = \Delta C = & \sum_{i=1}^n [c_i(1-x'_{ii})x_{ii} + d_i x'_{ii}x_{ii} + \\ & + e_i(1-x_{ii})x'_{ii} - g_i(1-x_{ii})x'_{ii}] + \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n [c_{ij}(1-x'_{ij})x_{ij} + d_{ij}x'_{ij}x_{ij} + \\ & + e_{ij}(1-x_{ij})x'_{ij} - g_{ij}(1-x_{ij})x'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S}, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь a – существующий вариант топологической структуры системы, $a \in S$; S – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ; c_i – затраты на создание элементов, узлов и центра в новой структуре, $i = \overline{1, n}$; 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 – затраты на модернизацию элемента, узла или центра в новой структуре $i = \overline{1, n}$; e_i

– затраты на демонтаж узлов существующей структуры $i = \overline{1, n}$; g_i – стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы (или 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 повторно использованы для связи между элементами i и j .

Предполагается, что затраты на модернизацию, демонтаж и стоимость повторно использованных ресурсов не превышают затрат на создание новых элементов, узлов, центра и связей между ними:

$$\begin{aligned} e_i & \leq c_i, \quad d_i \leq c_i, \quad g_i \leq c_i, \quad i = \overline{1, n}; \\ e_{ij} & \leq c_{ij}, \quad d_{ij} \leq c_{ij}, \quad g_{ij} \leq c_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в результате реинжиниринга образуется топологическая структура, не содержащая узлов и связей ранее существовавшей системы, она потребует максимальных дополнительных затрат ΔC_{\max} . Такая топологическая структура может быть получена путем решения традиционной задачи проектирования. В этом случае функция затрат от количества узлов является унимодальной [24].

В случае реинжиниринга функция затрат от количества узлов может быть многоэкстремальной. Анализ компонентов $k_1(a, s)$ показал, что основные затраты обусловлены затратами на создание и модернизацию связей между элементами системы. Изменение количества узлов в системе, введение дополнительных ограничений приводит к изменению топологической структуры, соответственно, добавлению новых и удалению существующих связей. При этом в процессе реинжиниринга возможны ситуации, когда с изменением количества узлов на каждом шаге используются различные части существующей топологической структуры, что приводит к появлению локальных экстремумов на интервале определения функции $\Delta C(u)$.

Таким образом, для решения задачи реинжиниринга топологических структур СКММ необходимо применение методов, позволяющих получить эффективные решения с учетом многоэкстремальности функции $\Delta C(u)$ (2) в зависимости от количества узлов в системе $1 \leq u \leq n$.

2. Методы решения задачи

Предположим, что для всех анализируемых вариантов топологических структур выполняются ограничения по оперативности $k_2(s) \leq k_2^*$, надежности $k_3(s) \geq k_3^*$ и живучести $k_4(s) \geq k_4^*$.

С учетом многоэкстремальности функции (2) от количества узлов в системе $k_1(u)$ для поиска глобального оптимального решения задачи предлагается исполь-

зовать идею метода, описанного в [24]. 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 найти минимум максимальных дополнительных затрат ΔC_{\max} . С этой целью требуется решить задачу синтеза оптимальной топологии сети (без учета существующей топологии).

Оптимальное решение задачи будем искать на отрезке $[1, u_{\max}]$, изменяя количество узлов в системе по правилу $u := u + 1$.

Таким образом, для решения задачи предложенным методом необходимо решение двух подзадач поиска минимума максимальных дополнительных затрат ΔC_{\max} и поиск минимума функции дополнительных затрат на реинжиниринг. Каждая задача сравнима по сложности с классической задачей структурно-топологического синтеза. С учетом этого временная сложность предлагаемой модификации базового метода имеет порядок $2 \cdot O[t(n)]$, где $t(n)$ – временная сложность метода решения задачи структурно-топологического синтеза.

Точность предложенной модификации базового метода определяется точностью методов решения задач определения количества узлов u и мест их размещения. Общее количество возможных вариантов топологических структур при реинжиниринге СКММ для $1 \leq u \leq n$ составляет:

$$N(n) = \sum_{u=1}^n C_n^u = \sum_{m=1}^n \frac{n!}{u!(n-u)!} = 2^n, \quad (4)$$

где n – количество мест возможного размещения узлов (элементов системы).

Предлагается ряд модификаций метода направленного перебора с применением различных процедур определения мест размещения узлов. В качестве базовой использована комбинаторная процедура, применяющая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качестве альтернативных использованы процедуры на основе методов покоординатной оптимизации (МПО), имитации отжига (Simulated annealing), поиска с запретами (Tabu Search), эволюционного синтеза, кластеризации на основе k-means.

Метод покоординатной оптимизации. Суть метода состоит в улучшении начального варианта путем очередной оптимизации мест возможного размещения для каждого узла при фиксированных размещениях $u-1$ узла. Эта процедура циклически повторяется до достижения локального экстремума целевой функции [26].

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов; количество узлов u ; индекс текущего узла $j := 1$; значение текущей итерации $i := 0$; значение счетчика полного прохода по всем точкам l , начальные значения для наилучшего варианта размещения узлов w^0 ; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. Сформировать начальное размещение узлов w_i^1 , рассчитать значение критерия $\Delta C(w_i^1)$.
3. Увеличить значение счетчика количества итераций $i := i + 1$; для узла j в w_i^1 изменить место его размещения при фиксированных значениях для $u-1$ узлов.
4. Рассчитать значение критерия (2). Если $\Delta C(w_i^1) \leq \Delta C(w_{i-1}^1)$, присвоить $\Delta C(w^1) := \Delta C(w_i^1)$, $w^0 := w_i^1$ и перейти к шагу 5.
5. Увеличить индекс текущего узла $j := j + 1$. Если $j < u$, перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 6.
6. Если $l = 0$, присвоить $w_i^{l+1} := w_i^1$, $l := l + 1$, $j := 1$, и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 7.
7. Если $\Delta C(w^l) \leq \Delta C(w^{l-1})$, присвоить $w_i^{l+1} := w_i^1$, $l := l + 1$, $j := 1$ и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 8.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значений затрат $\Delta C(w^0)$.

Метод имитации отжига. Метод имитирует физический процесс, который происходит при кристаллизации вещества. Основная идея состоит в том, чтобы позволить движение алгоритма в направлении ухудшения решения для ухода из локальных минимумов. Вероятность выполнить такой шаг уменьшается по ходу поиска. Время и точность решения задачи зависят от выбора начального значения «температуры» процесса и функции ее понижения (для решения данной задачи был выбран линейный вид зависимости). В процессе решения задачи необходим расчет значения изменения энергии процесса ΔE , вероятности перехода к полученному значению $p(\Delta E)$, функции понижения температуры T [27].

Изменение энергии перехода определяется как разность значения заданного критерия (2) на текущей и предыдущей итерации по следующей формуле [27]:

$$\Delta E = \Delta C(w_i) - \Delta C(w_{i-1}), \quad (5)$$

где w_{i-1} , w_i – множества мест размещения узлов, определенные на $i-1$ и i -й итерациях.

Вероятность перехода к полученному варианту определяется выражением [27]:

$$p(\Delta E) = e^{-\Delta E/t_i}, \quad (6)$$

где t_i – «температура» процесса на i -й итерации.

Температура понижается в процессе поиска. Таким образом, с одной стороны, при фиксированной температуре чем больше ΔE , тем меньше вероятность перехода от w_{i-1} к w_i , а с другой – чем выше температура, тем больше вероятность принятия худшего решения.

Выбор вида функции понижения температуры во многом определяет свойства процедуры: для линейной функции время счета может оказаться достаточно большим; для степенной функции время счета значительно меньше, но и качество получаемых при этом решений – хуже.

Для дальнейшего исследования была выбрана линейная функция понижения температуры:

$$T(i) = t_1/i, \quad (7)$$

где t_1 – начальная температура процесса; i – номер итерации.

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов; минимальную t_{\min} , максимальную t_{\max} и начальную $t_1 = t_{\max}$ температуры отжига; значение текущей итерации $i := 0$; количество узлов $u := u_{\max}$; количество узлов, выбираемых случайным образом $k := u_{\max}$.
2. Сформировать начальное решение: множество мест размещения узлов w_0 , $w^0 := w_0$; матрицу связей элементов, узлов и центра $x = [x_{ij}]$, $i, j = 1, n$.
3. Проверить условие окончания: если $t_1 \leq t_{\min}$, перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 4.
4. Увеличить значение счетчика итераций $i := i + 1$ и сгенерировать решение $w_i(k)$.
5. Определить изменение энергии процесса ΔE (5).
6. Если $\Delta E \leq 0$, сохранить лучшее решение $w^0 := w_i$ и перейти к шагу 3, в противном случае перейти на шаг 7.
7. Рассчитать вероятность перехода $p(\Delta E)$ (6) и перейти с поученной вероятностью к полученному варианту.
8. Понизить температуру процесса $t_{i+1} := T(i)$ (2), уменьшить значение k и перейти к шагу 3.
9. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Метод Tabu Search. В основу метода Tabu Search положена процедура анализа матрицы ближайших соседей. Для выхода из локального оптимума используется список запретов, в который входит предыстория поиска. В процессе реализации метода необходимо решение дополнительной задачи – формирование списка «ближайших соседей». Сложность методов решения таких задач оценивается величиной порядка $O[n^2]$. На практике используются различные критерии остановки алгоритма [28]:

- по достижению фиксированного количества итераций;
- по достижению фиксированного количества итераций, когда значение функции не улучшается;
- по достижению заданной точности.

В дальнейшем исследовании было использовано условие остановки алгоритма по достижению заданного количества итераций.

При формировании списка «ближайших соседей» применяются вспомогательные структуры данных, наиболее популярными среди которых являются kd-дерево, R-дерево, X-дерево [29 – 30], и используются дополнительные техники, например Locality-sensitive hashing (LSH).

Для решения задачи был выбран поиск соседей внутри фиксированной окрестности, поэтому в качестве структур данных были выбраны ассоциативные структуры.

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов; список запретов $T := \emptyset$; окрестность поиска «ближайших соседей»; количество выполненных итераций $i := 0$; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. Сформировать список «ближайших соседей».
3. Сформировать начальное решение w_0 , $w^0 := w_0$.
4. Если условие останова выполнено, перейти к шагу 8, в противном случае перейти к шагу 5.
5. Сформировать решение w_i на основании матрицы «ближайших соседей» и списка запретов T .
6. Если $\Delta C(w_i) < \Delta C(w_{i-1})$, то $w^0 := w_i$, добавить элементы множества T в список запретов.
7. Увеличить значение счетчика количества итераций $i := i + 1$ и перейти к шагу 4.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

В процессе решения задачи в список запретов вносились вся предыстория поиска.

Эволюционный синтез на основе генетического алгоритма. В алгоритме реализуются процедуры наследования, мутации, отбора, кроссинговера [31]. Каждая хромосома отображает множество мест размещения узлов w_i на итерации i . В качестве гена используется код индекса узла, а в качестве функции приспособленности – критерий (2).

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов, размер популяции хромосом; вероятность мутации p , номер итерации (популяции) $i := 0$; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. $i := i + 1$ и сформировать начальную популяцию.
3. Рассчитать значения функции приспособленности (2) для всех хромосом популяции и выбрать лучшую хромосому по минимальному значению функции приспособленности $\Delta C(w_i)$; $w^0 := w_i$.
4. Если $\Delta C(w_{i-1}) > \Delta C(w_i)$, то $w^0 := w_i$ и перейти к шагу 8, в противном случае – к шагу 5.
5. Селекция хромосом.
6. Выполнить операции скрещивания и (с заданной вероятностью) мутации.
7. Сформировать новую популяцию. Перейти к шагу 3.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Кластеризация методом k-Means. Суть метода k-Means заключается в минимизации суммарного отклонения точек кластеров от их центров. Каждая точка кластера представлена местом возможного размещения узлов, ее координаты определяются координатами элемента. Центроид v является центром масс кластера и определяется по формуле [32]:

$$v_k^j = (1/n_v) \sum_{i=1}^{n_v} x_i^j, \quad (8)$$

где v_k^j – j -я координата k -го центроида, $j = \overline{1, 2}$, $k = \overline{1, u}$; n_v – количество точек в k -м кластере (количество элементов, подключенных к узлу); x_i^j – j -я координата i -й точки кластера.

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов, количество кластеров; множество оптимальных мест размещения узлов $w^0 = \emptyset$; значение текущей итерации $i := 0$.
2. $i := i + 1$ и сгенерировать начальное множество центроидов w_0 .

3. Для каждого центроида вычислить расстояния до каждой точки, сформировать кластеры.
4. Вычислить новые центроиды по среднему значению координат всех точек кластеров.
5. Проверить окончание: если $w_i = w_{i-1}$, перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 6.
6. Определить лучшее решение w^0 путем определения для каждого кластера точки, ближайшей к центроиду.
7. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

3. Результаты экспериментальных исследований

Для анализа эффективности предложенных модификаций метода, реализованных с использованием различных процедур размещения u узлов на n элементах, была проведена серия экспериментов. Топологическая структура «существующей» СКММ создавалась путем формирования мест размещения элементов и узлов с использованием генератора случайных чисел и присоединения элементов к узлам по минимуму стоимости (расстояния). Далее проводился реинжиниринг сгенерированной топологической структуры предложенным методом. В качестве базовой использована комбинаторная процедура, применяющая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качестве альтернативных использованы процедуры на основе методов покоординатной оптимизации (COM – coordinatewise optimization method), имитации отжига (SA – Simulated annealing), поиска с запретами (TS – Tabu Search), эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма (GA – Genetic algorithm) кластеризации на основе k-Means. Эксперименты проводились на персональном компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-4770 (тактовая частота 3.40 ГГц).

Для сравнения точности предложенных модификаций метода использован показатель относительной погрешности $\delta C' = 100 \cdot |\Delta C - \Delta C'| / \Delta C$, где ΔC – значение показателя затрат (2), полученное по методу полного перебора, $\Delta C'$ – значение показателя затрат (2), полученное с использованием предложенной модификации метода. В процессе исследования модификаций метода было решено 60 задач (по 10 задач для $n = 15 \div 40$) и получены оценки их точности и временной сложности (табл. 1, 2).

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

Для прогноза оценок погрешностей предложенных модификаций метода по результатам экспериментов проведена аппроксимация данных табл. 1. Функции погрешности для предложенных модификаций метода от размерности $\delta C'(n)$ аппроксимированы полиномами с достоверностью R :

- COM: $\delta C'(n) = 0.1663x + 0.0247$, $R=0.99$;
- SA: $\delta C'(n) = 0.4423x + 2.8387$, $R = 0.96$;
- TS: $\delta C'(n) = 0.7017x - 0.366$, $R = 0.99$;
- GA: $\delta C'(n) = 0.1571x^2 - 0.2126x + 2.224$, $R = 0.96$;
- k - m e a n s : $\delta C'(n) = 0.0225x^2 + 0.8999x + 4.894$, $R = 0.99$.

Таблица 1

Средняя относительная погрешность решения $\delta C'$, %

n	COM	SA	TS	GA	k-means
15	0.18	3.21	0.27	1.85	5.94
20	0.33	3.56	1.02	2.95	6.49
25	0.56	4.66	1.79	3.11	7.96
30	0.71	4.81	2.58	3.61	8.89
35	0.87	4.95	3.11	4.82	9.95
40	0.99	5.39	3.77	6.84	11.08
$\delta \bar{C}'$, %	0.61	4.43	2.09	3.86	8.38

Таблица 2

Среднее время решения задачи t , с

n	COM	SA	TS	GA	k-means
15	0.53	0.07	0.11	0.22	0.10
20	3.02	0.21	0.37	0.71	0.30
25	5.24	0.44	1.37	1.85	0.73
30	11.87	0.83	2.59	3.91	1.54
35	21.34	1.39	5.19	8.14	2.78
40	35.26	2.31	9.78	14.01	4.70
\bar{t}	12.88	0.88	3.24	4.81	1.69

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

Для прогноза времени решения задач с использованием предложенных модификаций метода по результатам экспериментов проведена аппроксимация данных табл. 2. Функции временной сложности для предложенных модификаций метода от размерности $t(n)$ аппроксимированы полиномами с достоверностью R :

- COM:
- $t(n) = 0.1745x^3 - 0.2938x^2 + 1.4809x - 0.6756$, $R = 0.99$;

- SA: $t(n) = 0.0941x^2 - 0.2258x + 0.2423$, $R = 0.99$;
- TS: $t(n) = 0.5016x^2 - 1.6805x + 1.5128$, $R = 0.99$;
- GA: $t(n) = y = 0.7006x^2 - 2.2385x + 2.0225$, $R = 0.99$;
- k-means: $t(n) = 0.2109x^2 - 0.5832x + 0.539$, $R = 0.99$.

Аппроксимации, полученные по данным табл. 1 и 2, позволяют выбирать наиболее подходящую модификацию метода при решении практических задач, исходя из требуемой точности и имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Выводы

Для решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга предложено шесть модификаций метода направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе. В качестве базовой предложена модификация, использующая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов, а в качестве альтернативных – построенные на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционно-го синтеза, кластеризации на основе k-Means.

Получены оценки их точности и временной сложности. При этом базовая модификация метода позволяет получать точное решение и имеет на треть меньшую временную сложность по сравнению с известным методом. Результаты экспериментальных исследований позволили установить их существенное различие по показателям точности и временной сложности. Это позволит выбирать наиболее подходящую модификацию метода при решении практических задач, исходя из требуемой точности и имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Полученные модификации метода направленного перебора могут быть использованы также при решении задач оптимизации информационных, транспортных, логистических систем и систем обслуживания. Их практическое применение позволит сократить сроки решения задач реинжиниринга и (или) затраты на реализацию топологических структур реструктуризуемых систем.

Литература: 1. Бескоровайный 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. 2. Stutzle T. G. Local search algorithms for combinatorial problems: analysis, improvements, and new applications. Sankt Augustin: Infix, 1999. 203 p. 3. Бескоровайный В.В., Соболева Е.В. Эвристическая процедура для методов оптимизации топологии систем с радиально-узловыми структурами // Системи обробки інформації. 2008. № 7. С. 22 – 27. 4. Han L.Z., Zhang J.Q., Yang Y. Optimal placement of sensors for monitoring systems on suspension bridges using genetic algorithms // Applied Mechanics and Materials. 2014. № 530. P. 320–331. 5. Wang K., Zhao H., Ding Y., Li T., Hou L., Sun

- F.* Optimization of air pollutant monitoring stations with constraints using genetic algorithm // *Journal of High Speed Networks*. 2015. № 21(2). P. 141–153. **6.** *Pasandideh S.H.R., Niaki S.T.A.* Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012. № 23 (3). P. 651–659. **7.** *Zhang Z., Zhang N., Feng Z.* Multi-satellite control resource scheduling based on ant colony optimization // *Expert Systems with Applications*. 2014. № 41 (6). P. 2816–2823. **8.** *Kolda T.G., Lewis R.M., Torczon V.* Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods // *SIAM review*. 2003. № 45(3). P. 385–482. **9.** *Бескоровайный В.В., Соболева Е.В.* Модификация метода направленного перебора для оптимизации топологии систем с регулярым распределением элементов // *Системы обработки информации*. 2013. №1. С. 12–16. **10.** *Hentenryck P., Michel L.* Constraint-based local search. London: The MIT Press, 2009. 448 p. **11.** *Lourenzo H.R., Martin O.C., Stutzle T.* Iterated local search: Springer, 2003. 448 p. **12.** *Lenstra J.K.* Local search in combinatorial optimization. New Jersey: Princeton University Press, 2003. 515 p. **13.** *Hansen P., Mladenović N.* Variable neighborhood search: Principles and applications // *European journal of operational research*. 2001. № 130 (3). P. 449–467. **14.** *Toksar M.D., Gьner E.* Solving the unconstrained optimization problem by a variable neighborhood search // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2007. № 328(2). P. 1178–1187. **15.** *Бескоровайный В.В., Имангулова З.А.* Алгоритмы оптимизации топологии ИВС на множестве радиально-узловых структур // *Радиоэлектроника и информатика*. 2000. №2. С. 100–104. **16.** *Бескоровайный В.В.* Метод предварительной оценки стоимости территориально распределенных объектов // *Радиоэлектроника и информатика*. 2003. №. 2. С. 104 – 107. **17.** *Бескоровайный В.В., Имангулова З.А., Петрова А.И.* Оптимизация количества и местоположения распределенных центров транспортно-складской системы // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 5. №. 3 (59). С. 24 – 28. **18.** *Kanungo T., Mount D.N., Netanyahu N.S., Piatko C.D., Silvermann R., Wu A.Y.* An Efficient k-Means Clustering Algorithm: Analysis and Implementation // *Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002. № 24(7). P. 881–892. **19.** *Xu R., Wunsch D.* Survey of clustering algorithms // *IEEE Trans Neural Netw.* 2005. № 16 (3). P. 645–678. **20.** *Bahmani B., Moseley B., Vattani A., Kumar R., Vassilvitskii S.* Scalable k-means++ // *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2012. №5 (7). P. 622–633. **21.** *Martin R., Resende M.G.C., Ribeiro C.C.* Multi-start methods for combinatorial optimization // *European Journal of Operational Research*. 2013. Т. 226, № 1. P. 1–8. **22.** *Osman I.H., Kelly J.P.* Meta-Heuristics: Theory & Applications. Massachusetts: Springer US, 1996. 690 p. **23.** *Glover F.A., Kochenberger G.A.* Handbook of metaheuristics. Massachusetts: Springer Science & Business Media, 2010. 648 p. **24.** *Бескоровайный В.В.* Метод структурно-топологической оптимизации для реинжиниринга территориально распределенных объектов // *Системы обработки информации*. 2004. Вип. 4. С. 26 – 33.
- 25.** *Бескоровайный 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. **26.** *Петров Э.Г., Писклакова В.П., Бескоровайный В.В.* Территориально распределенные системы обслуживания. К: Техника, 1992. 208 с. **27.** *Eglese R.W.* Simulated annealing: a tool for operational research // *European journal of operational research*. 1990. Т. 46, №3. P. 271 – 281. **28.** *Du D.Z., Pardalos P.M.* Handbook of combinatorial optimization. New York: Springer Science & Business Media, 2013. 3409 p. **29.** *Mahapatra R.P., Chakraborty P.S.* Comparative Analysis of Nearest Neighbor Query Processing Techniques // *Procedia Computer Science*. 2015. №. 57. P. 1289–1298. **30.** *Hapala M., Havran V.* Review: Kd-tree Traversal Algorithms for Ray Tracing // *Computer Graphics Forum*. 2011. №. 30 (1). P. 199 – 213. **31.** *Beasley J.E., Chu P.C.* A genetic algorithm for the set covering problem // *European Journal of Operational Research*. 1996. №. 96 (2). P. 392–404. **32.** *Likas A., Vlassis N., Verbeek J.J.* The global k-means clustering algorithm // *Pattern recognition*. 2003. Vol. 36, № 2. P. 451 – 461.

Поступила в редколлегию 11.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Нефедов Л.И.

Бескоровайный Владимир Валентинович, д-р техн. наук, профессор кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: теория принятия решений; математическое моделирование; оптимизация территориально распределенных объектов. Хобби: путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. (057) 702-13-76. E-mail: vvbeskorovainyi@mail.ru.

Подоляка Ксения Евгеньевна, аспирантка кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: разработка и применение методов реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга. Хобби: путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. (057) 702-13-76. E-mail: podolyakakseniya@gmail.com.

Bezkorovainyi Vladimir V., Dr. Sc. Sciences, prof., professor of systems engineering of Kharkiv National University of Radio Electronics. Research interests: the theory of decision making; math modeling; optimization of geographically distributed objects. Hobbies: travel. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, avenue of Science, 14, tel. (057) 702-16-73. E-mail: vvbeskorovainyi@mail.ru.

Podolyaka Ksenia E., systems engineering graduate student of Kharkov National University of Radio Electronics. Research interests include the development and application reengineering methods of large-scale monitoring systems. Hobbies: travel. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, avenue of Science, 14, tel. (057) 702-16-73. E-mail: podolyakakseniya@gmail.com.