

УДК 004.9:519.876

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Д.т.н. В.В. Бескорвайный, Ю.В. Мельничук, Харьковский национальный университет радиозлектроники

Проведен анализ эффективности методов оптимизации топологии корпоративных информационно-вычислительных сетей с радиально-узловыми структурами. Для методов, базирующихся на схемах направленного перебора вариантов по количеству узлов в сети, получены количественные оценки их качества по комплексному показателю «точность-сложность».

Виконано аналіз ефективності методів оптимізації топології корпоративних інформаційно-обчислювальних мереж з радіально-вузловими структурами. Для методів, які базуються на схемах спрямованого перебору варіантів за кількістю вузлів у мережі, отримані кількісні оцінки їх якості за комплексним показником «точність-складність».

The analysis of the effectiveness of corporate information networks topology optimization methods with radial-node structure. For methods based schemes directed enumeration of options for the number of nodes in the network, the quantitative assessment of their quality on a complex metric "accuracy-complexity".

Ключевые слова: корпоративная информационно-вычислительная сеть, структура, топология, оптимизация, метод, сложность, точность, оценка.

Введение

Одним из основных направлений информатизации деятельности, как государственных структур, так и частных компаний, является создание, дальнейшее развитие и совершенствование корпоративных информационно-вычислительных сетей (ИВС) [1, 2]. С ростом масштабов таких сетей их стоимостные и функциональные характеристики становятся все более зависимыми от топологии, т.е. пространственной организации.

Проектирование и реинжиниринг ИВС предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации [3]. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей ИВС незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур.

Для решения задач оптимизации топологических структур используются комбинаторные и приближенные методы [4–6]. Точные методы позволяют гарантированно найти оптимальное решение, однако, ввиду NP-сложности задач, они применимы только для оптимизации простейших сетей с небольшим количеством элементов.

Для снижения временной сложности и повышения точности приближенных методов структурно-

топологической оптимизации применяют специальные процедуры [6–10]:

- предварительное определение множества элементов, на базе которых целесообразно создавать узлы сети (анализ минимального стягивающего дерева, анализ стягивающего дерева связывающего элементы с центром, анализ матрицы ближайших соседей);
- предварительную оценку оптимального количества узлов сети;
- предварительную кластеризацию элементов существующей сети (k-means, c-means, k-means++);
- перезапуск алгоритмов с множеством различных начальных размещений элементов и (или) узлов сети (процедура Multi-start);
- метаэвристики, предполагающие улучшение решения путем временного отхода к худшему варианту, что позволяет выходить из локальных оптимумов.

При этом задачи размещения узлов ИВС 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 проектирования и реинжиниринга топологических структур ИВС, различающихся по показателям точности и сложности, имеющих меньшую временную сложность, чем комбинаторные методы и большую точность, чем существующие приближенные методы.

Целью работы является анализ и оценка эффективности методов оптимизации топологии корпоративных информационно-вычислительных сетей с радиально-узловыми структурами.

Постановка и математическая модель задачи оптимизации топологии сети

Будем рассматривать в качестве задачи оптимизации топологии задачу реинжиниринга топологических структур ИВС системы крупномасштабного мониторинга с радиально-узловой структурой по показателю затрат в следующей постановке [6]. Задано:

- множество элементов системы $I = \{i\}$, $i = \overline{1, n}$, покрывающих все множество объектов мониторинга;
- существующий вариант топологической структуры системы $s' \in S$ (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'_i – булева переменная, $y'_i = 1$, если на базе i -го элемента существует узел; $y'_i = 0$ – в противном случае), центра (будем считать, что центр системы расположен на базе

элемента $i = \overline{1, n}$), а также связями между элементами, узлами и центром $[s'_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ (s'_{ij} – булева переменная, $s'_{ij} = 1$, если между элементами i и j существует непосредственная связь; $s'_{ij} = 0$ – 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 затрат вариант топологической структуры системы $s^0 \in S$ (где S – допустимое множество вариантов).

Каждый вариант реинжиниринга топологической структуры системы задается, количеством узлов u , местами их размещения и схемой связей между элементами, узлами и центром $[s_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$.

Множество допустимых решений задачи определяется условиями:

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

где S – множество допустимых вариантов топологических структур системы мониторинга; s – вариант топологической структуры системы;

$[s_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ – матрица связей (s_{ij} – булева переменная, $s_{ij} = 1$, если между элементами i и j существует непосредственная связь иначе – $s_{ij} = 0$;

$s_{ii} = 1$, $i = \overline{1, n}$, если на базе элемента i размещается узел системы, $s_{ii} = 0$, $i = \overline{1, n}$ – в противном случае); n – количество элементов системы; c_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$ – стоимость связи между элементами i и j .

В качестве критерия используем показатель минимума затрат на реинжиниринг [6]:

$$k(s', s) = \sum_{i=1}^n [c_i(1-s'_{ii})s_{ii} + d_i s'_{ii} s_{ii} + e_i(1-s_{ii})s'_{ii} - g_i(1-s_{ii})s'_{ii}] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n [c_{ij}(1-s'_{ij})s_{ij} + d_{ij} s'_{ij} s_{ij}] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n [e_{ij}(1-s_{ij})s'_{ij} - g_{ij}(1-s_{ij})s'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S} \quad (2)$$

где c_i – затраты на i -й элемент, узел или центр в новой структуре, $i = \overline{1, n}$; s'_{ij} , s_{ij} – соответственно элементы матриц смежности (связей) между элементами, узлами и центром в существующей структуре $[s'_{ij}]$ и структуре после реинжиниринга $[s_{ij}]$ ($s'_{ij} = 1$ или $s_{ij} = 1$, если между

элементами i и j существует непосредственная связь; $s'_{ij} = 0$ или $s_{ij} = 0$ – в противном случае); d_i – затраты на модернизацию i -го элемента, узла или центра в новой структуре, $i = \overline{1, n}$; e_i – затраты на демонтаж i -го узла существующей структуры, $i = \overline{1, n}$; g_i – стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы (или реализованы) после демонтажа оборудования i -го узла, $i = \overline{1, n}$; c_{ij} – стоимость связи между элементами i и j , $i, j = \overline{1, n}$; S – множество допустимых вариантов топологических структур системы (1).

Основные ограничения, учитываемые при оптимизации трехуровневых централизованных топологических структур территориально распределенных объектов [6]:

– каждый элемент системы i , $i = \overline{1, n}$ должен быть связан с одним из узлов, т.е. $\sum_{j=1}^i s_{ij} + \sum_{i=j}^n s_{ij} = 1$ для всех i ,

для которых $s_{ii} = 0$, $i = \overline{1, n}$ или непосредственно с центром $s_{11} = 1$, $i = \overline{1, n}$;

– к каждому узлу должно быть подключено более одного элемента $\sum_{j=1}^i s_{ij} + \sum_{i=j}^n s_{ij} > 1$, для всех i , для которых $s_{ii} = 1$, $i = \overline{1, n}$;

– каждый элемент i присоединяется к узлу j по минимуму стоимости:

$$s_{ii} = 1 \wedge s_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{i \leq j \leq n} c_{ji} \quad \forall i, j = \overline{1, n};$$

– каждый из узлов системы j связывается с центром $s_{jj} = 1 \rightarrow s_{1j} = 1$;

– количество узлов может изменяться в интервале от 1 до n , т.е. $1 \leq \sum_{i=1}^n s_{ii} \leq n$;

– количество симметричных связей в структуре трехуровневой централизованной системы равно

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n s_{ij} = n + \sum_{i=1}^n s_{ii}.$$

Для решения задачи реинжиниринга топологических структур необходимо применение методов, позволяющих получить эффективные решения с учетом многоэкстремальности функции $k(s', s)$ (2) в ее зависимости от количества узлов в сети $1 \leq u \leq n$.

Методы решения задачи

С учетом возможной многоэкстремальности функции (2) от количества узлов в сети $k(s', s, u)$ для поиска глобального оптимального решения задачи предлагается использовать идею метода, предложенного в [11]. Суть ее состоит в определении отрезка $[u_{min}, u_{max}]$, который гарантированно содержит оптимальное решение.

В качестве нижней границы количества узлов в сети выберем $u_{min} = 1$. Для определения верхней границы u_{max} необходимо определить минимум из максимальных дополнительных затрат $\Delta C_{max}(u)$. С этой

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

Поиск оптимального решения задачи производится на отрезке $[1, u_{max}]$, изменяя количество узлов в сети по правилу $u := u + 1$. Для решения задачи этим методом необходимо решение двух подзадач поиска минимума максимальных дополнительных затрат и поиска 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 системы для $1 \leq u \leq n$ составляет:

$$N_u(n) = \sum_{u=1}^n C_n^u = \sum_{u=1}^n \frac{n!}{u!(n-u)!} \approx 2^n, \quad (3)$$

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

К числу наиболее эффективных, учитывающих возможную многоэкстремальность целевой функции, относят методы направленного (усеченного) перебора и их модификации, реализующие размещения узлов на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации на основе *k-means*.

Предлагается ряд модификаций метода направленного перебора с использованием различных процедур определения мест размещения узлов. В качестве базовой использована комбинаторная процедура, использующая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качестве альтернативных использованы процедуры на основе методов покоординатной оптимизации (МПО, *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* [6].

Алгоритм метода покоординатной оптимизации

Суть метода состоит в улучшении начального варианта путем поочередной оптимизации мест возможного размещения для каждого узла при фиксированных размещениях $u-1$ узла. Процедура повторяется до достижения локального экстремума целевой функции [6].

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множества мест возможного размещения узлов; количества узлов u ; индекса текущего узла $-j:=1$; значения текущей итерации $-i:=0$; значения счетчика прохода по всем точкам l ; начальных значений для наилучшего варианта размещения узлов w^0 ; лучшего текущего значения 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 $\Delta C(w_i^1) \leq \Delta C(w_{i-1}^1)$, то $\Delta C(w^1) := \Delta C(w_i^1)$, $w^0 := w_i^1$ и перейти к шагу 5.

5. Увеличить значение $j:=j+1$. Если $j < u$ перейти к шагу 3, в противном случае – 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 – к шагу 7.

7. Если $\Delta C(w^l) \leq \Delta C(w^{l-1})$, то $w_i^{l+1} := w_i^1$, $l:=l+1$, $j:=1$ и перейти к шагу 3, иначе – к шагу 8.

8. Окончание алгоритма: получено решение с наименьшим из рассмотренных значений затрат $\Delta C(w^0)$.

Алгоритм метода имитации отжига

Метод имитирует физический процесс кристаллизации вещества. Основная идея состоит в том, чтобы для ухода из локальных минимумов позволить движение алгоритма в направлении ухудшения решения. Вероятность выполнить такой шаг уменьшается по ходу поиска. Время и точность решения задачи зависят от начального значения «температуры» процесса и функции ее понижения.

В процессе решения задачи необходим расчет значения изменения энергии процесса ΔE , вероятности перехода к полученному значению $p(\Delta E)$, функции понижения температуры T .

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

$$\Delta E = \Delta C(w_i) - \Delta C(w_{i-1}), \quad (4)$$

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:

$$p(\Delta E) = e^{-\Delta E/t_i}, \quad (5)$$

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

В простейшем случае используется линейная функция понижения температуры:

$$T(i) = t_1/i, \quad (6)$$

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

Алгоритм [6]

1. Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов; минимальной t_{min} , максимальной t_{max} и начальной $t_1 = t_{max}$ температуры отжига; значения текущей итерации $i:=0$; количества узлов $u := u_{max}$; количества выбираемых узлов $k := u_{max}$.

2. Формирование начального решения: множества мест размещения узлов w_0 , $w^0 := w_0$; матрицы связей

элементов, узлов и центра $x = [x_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$.

3. Проверка условия окончания: если $t_1 \leq t_{\max}$ перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 4.
4. Изменение значения $i := i + 1$ и генерация $w_i(k)$.
5. Определение изменения энергии ΔE (4).
6. Если $\Delta E \leq 0$, то лучшее решение $w^0 := w_i$ и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 7.
7. Рассчитать вероятность $p(\Delta E)$ (5) 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 значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Алгоритм метода *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 формирования списка «ближайших соседей».

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

Алгоритм [6]

1. Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов; списка запретов $T := \emptyset$; окрестности поиска ближайших соседей; количества итераций $i := 0$; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. Сформировать список «ближайших соседей».
3. Сформировать решение w_0 , $w^0 := w_0$.
4. Если условие останова выполнено перейти к шагу 8, в противном случае – 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. Изменить значение $i := i + 1$ и перейти к шагу 4.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Генетический алгоритм

В алгоритме реализуются процедуры наследования, мутации, отбора, кроссинговера. 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 [6]

1. Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов, размера популяции хромосом; вероятности мутации p , номера итерации $i := 0$; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. Изменить значение $i := i + 1$ 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 p .
7. Сформировать новую популяцию. Переход к шагу 3.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Алгоритм кластеризации 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:

$$v_k^j = (1/n_v) \sum_{i=1}^{n_v} x_i^j, \quad (7)$$

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 [6]

1. Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов, количества кластеров; множества оптимальных мест размещения узлов $w^0 = \emptyset$; значение текущей итерации $i := 0$.
2. Изменить значение $i := i + 1$ 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. Проверка окончания: если $w_i = w_{i-1}$ переход к шагу 3, в противном случае – 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 значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Оценка эффективности методов

Показатели точности (погрешности) и временной сложности методов, использующих процедуры размещения узлов на основе схем по координатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма и кластеризации на основе *k-means* во многом зависят от значений их параметров (количества перезапусков, размеров окрестностей поиска, схем кроссовера и мутаций, других). Для совершенствования существующих методов предлагается отобрать более эффективные из них. Это позволит выявить методы,

лучше других использующие возможности от повышения производительности вычислительных средств систем автоматизации проектирования.

С этой целью проведем их предварительную оценку по комплексному показателю «точность-время решения задачи»:

$$o_m = \frac{1}{\varepsilon_m t_m}, \quad (8)$$

где ε_m – относительная погрешность решения задачи с использованием m -ой модификации метода, %; t_m – время решения задачи с использованием m -ой модификации метода относительно точного решения комбинаторным методом, %.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1 и 2 [6].

Таблица 1

Относительная погрешность решения ε_m , %

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
$\bar{\varepsilon}$	0.61	4.43	2.09	3.86	8.38

Таблица 2

Время решения задачи t_m , %

n	COM	SA	TS	GA	k -means
15	10,0474	2,94302	4,23617	8,46491	3,81998
20	3,98009	0,40569	0,72830	1,40208	0,59642
25	0,54665	0,04609	0,14285	0,19387	0,07685
30	0,06559	0,00462	0,01433	0,02164	0,00855
35	0,00624	0,00041	0,00152	0,00238	0,00081
40	0,00055	0,00004	0,00015	0,00022	0,00007
\bar{t}	2,44110	0,56664	0,85389	1,68085	0,75045

Усредненные оценки эффективности методов по комплексному показателю (8) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценки эффективности методов o_m

COM	SA	TS	GA	k -means
0,67156	0,39837	0,56034	0,15413	0,15901

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее перспективными для использования в системах автоматизации проектирования при решении задач структурно-топологической оптимизации корпоративных информационно-вычислительных сетей являются модификации метода направленного перебора, использующие методы размещения узлов на основе покоординатной оптимизации, поиска с запретами и имитации отжига.

Выводы

Проведен обзор современных методов решения задачи оптимизации топологических структур централизованных информационно-вычислительных сетей. Рассмотрено шесть модификаций комбинаторного метода направленного перебора вариантов по количеству узлов в сети: в качестве базовой – модификация, использующая полный перебор всевозможных вариантов

размещения узлов, в качестве альтернативных – построенные на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации на основе k -means.

Такие методы можно использовать при проектировании централизованных информационно-вычислительных сетей с радиально-узловыми структурами в информационных системах различных сфер деятельности [12].

На основе результатов экспериментальных исследований их точности и временной сложности получены оценки эффективности методов по комплексному показателю «точность-время решения задачи». Полученные оценки позволили выявить методы, лучше других использующие возможности от повышения производительности вычислительных средств систем автоматизации проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2010. – 916 с.
2. Герасимова Е.К. Создание сети оценки и управления качеством корпоративной информационно-вычислительной сети / Е.К. Герасимова, Г.И. Горемыкина, И.Н. Мастяева // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 8. – С. 903–908.
3. Бескоровайный В. В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных сет / В. В. Бескоровайный // *Автоматизированные сети управления и приборы автоматики*. – 2002. – № 120. – С. 29–37.
4. Han L. Z. Optimal placement of sensors for monitoring systems on suspension bridges using genetic algorithms / L. Z. Han, J. Q. Zhang, Y. Yang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – № 530. – P. 320–331.
5. Wang K. Optimization of air pollutant monitoring stations with constraints using genetic algorithm / K. Wang, H. Zhao, Y. Ding, T. Li, L. Hou, F. Sun // *Journal of High Speed Networks*. – 2015. – № 21(2). – P. 141–153.
6. Бескоровайный В. В. Модификации метода направленного перебора для реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескоровайный, К. Е. Подолька // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2015. – № 3 (70). – С. 55–62.
7. Stützle T. G. Local search algorithms for combinatorial problems: analysis, improvements, and new applications. Sankt Augustin: Infix, 1999. – 203 p.
8. Xu Y. Fast Scalable k -means++ Algorithm with MapReduce / Y. Xu, W. Qu, Z. Li, Y. Wu // *Springer International Publishing*. – 2014. – № 1. – P. 15–28.
9. Martí R. Multi-start methods for combinatorial optimization / R. Martí, M. G. C. Resende, C. C. Ribeiro // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – Т. 226, № 1. – P. 1–8.
10. Martí R. Multi-start methods for combinatorial optimization / R. Martí, M. G. C. Resende, C. C. Ribeiro // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – Т. 226, № 1. – P. 1–8.
11. Бескоровайный В. В. Метод структурно-топологической оптимизации для реинжиниринга территориально распределенных объектов / В. В. Бескоровайный // *Системы обработки информации*. – 2004. – Вып. 4. – С. 26 – 33.
12. Інформаційні системи та мережі військ. Ч. 1 / В. І. Ткаченко, Є. Б. Смірнов, І. О. Романенко та ін.; за ред. І. В. Рубана. – Х.: ХУПС, 2013. – 328