

В роботі виділена множина вимог, що пред'являються до сучасних систем великомасштабного моніторингу, які впливають на структурно-топологічні характеристики цього класу систем. Розроблено математичну модель багатокритеріальної задачі реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу (за показниками витрат, оперативності, надійності та живучості). Використання моделі дозволяє поліпшити рішення практичних завдань реінжинірингу

Ключові слова: система великомасштабного моніторингу, структура, топологія, реінжиніринг, ефективність, багатокритеріальна задача, модель

В работе выделено множество требований, предъявляемых к современным системам крупномасштабного мониторинга, которые влияют на структурно-топологические характеристики этого класса систем. Разработана математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга (по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести). Использование модели позволяет улучшить решений практических задач реинжиниринга

Ключевые слова: система крупномасштабного мониторинга, структура, топология, реинжиниринг, эффективность, многокритериальная задача, модель

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МНОГО- КРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ РЕИНЖИНИРИНГА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНО- МАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

В. В. Бескорвайный

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: vvbeskorovainyi@mail.ru

К. Е. Подоляка

Аспирант*

E-mail: podolyakakseniya@gmail.com

*Кафедра системотехники

Харьковский национальный

университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Глобализация процессов в различных сферах человеческой деятельности приводит к необходимости сбора информации, обмена информацией и принятия решений на основании сведений, получаемых от множества источников, расположенных на значительной территории. Источниками информации при этом могут служить объекты радиационного, экологического, геологического, гидрометеорологического, экономического, астрономического, медицинского, других видов мониторинга.

При изменении условий и средств мониторинга (объемов получаемой и передаваемой информации, совершенствовании элементов и технологии функционирования) существующий вариант построения системы оказывается неэффективным и, таким образом, возникает необходимость его совершенствования. Наиболее эффективный вариант построения системы может быть получен в результате ее реинжиниринга. Проведение реинжиниринга предполагает фундаментальное переосмысление существующего состояния объектов, системы, средств и технологий мониторинга (радикальное перепроектирование).

Реинжиниринг систем крупномасштабного мониторинга (СКММ) предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической (территориальной), параметрической и технологической оптимизации. Системологический анализ проблемы синтеза территориально распределенных объектов показал, что важнейшими задачами, во многом определяющими показатели их оперативности, надежности, живучести, затрат на их создание и эксплуатацию, являются задачи оптимизации структуры и топологии [1]. При этом их объединение в комплексную задачу структурно-топологической оптимизации позволяет повысить качество проектных решений. Это делает актуальной проблему разработки методологии реинжиниринга СКММ, включая разработку комплексов адекватных и экономичных математических моделей их структурно-топологической оптимизации.

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Различные аспекты проблем проектирования, управления, оптимизации структуры и топологии

территориально-распределенных объектов, включая СКММ, рассматриваются во многих отечественных и зарубежных публикациях [1–13]. В них в большинстве случаев СКММ представляются многоуровневыми системами с радиальной, радиально-узловой или смешанной структурой, включающей подсистемы: сбора данных (пункты мониторинга, элементы); обработки и хранения информации (узлы); распространения информации (единый центр или множество центров).

Целевое назначение конкретной СКММ определяет перечень критериев эффективности, используемых при решении задач ее оптимизации. Считается, что преимущественно целью систем мониторинга является сбор необходимой информации с минимальными затратами.

Модель реинжиниринга территориально распределенных систем с радиально-узловыми структурами, предложенная в [2], использует только критерий минимизации дополнительных затрат и не учитывает ограничений на показатели оперативности, надежности и живучести.

В работе [3] при проектировании и реинжиниринге основное внимание уделяется задачам выбора и размещения систем сбора информации с учетом зон повышенного контроля. Основными критериями выступали минимизация стоимости системы мониторинга и требуемый уровень контроля (повышенный контроль с многократным покрытием зоны мониторинга).

В работах [4–6] рассматриваются критерии максимизации покрытия объектов мониторинга (с регулярным и нерегулярным радиусами покрытия).

В работе [7] рассмотрена система космического мониторинга, как часть единой системы международного мониторинга. В качестве критериев эффективности предлагается использовать вероятность того, что количество потребителей, обеспеченных информацией, будет не меньше заданного и обобщенный критерий, включающий также показатель стоимости системы.

В работах [8, 9] рассматриваются модели оценки производительности сети передачи данных в зависимости от конфигурации, топологии и используемых технологий передачи данных.

В работе [10] в качестве основных критериев оптимизации используется критерий минимизации приведенных затрат и критерий минимизации интенсивности отказов системы.

В качестве основного в работе [11] предложено использовать критерий минимизации затрат на реинжиниринг системы мониторинга при ограничениях на места расположения пунктов мониторинга и частоту проведения мониторинга.

В работе [12] проведен анализ существующих систем мониторинга качества воды. В качестве критериев оптимизации системы мониторинга выбраны минимизация среднего времени обнаружения события загрязнения и максимизация надежности системы.

Проведенный анализ показал, что наибольшее распространение получают системы мониторинга с радиально-узловыми структурами, содержащие в своем составе единый центр, один уровень узлов и множество элементов, распределенных между узлами системы, каждый из которых покрывает свое подмножество объектов мониторинга. В качестве показателей эффективности систем мониторинга чаще всего исполь-

зуются затраты на создание и (или) эксплуатацию, оперативность и вероятность того, что количество потребителей, обеспеченных информацией, будет не меньше заданного (живучесть). При этом разработаны разные математические модели для решения задач реинжиниринга по стоимостным показателям, показателям оперативности и охвата объектов мониторинга. Это делает актуальной задачу разработки универсальной математической модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур СКММ, учитывающей множество показателей затрат, оперативности, надежности и живучести.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка универсальной математической модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, учитывающей множество показателей дополнительных затрат, оперативности, надежности и живучести.

Достижение поставленной цели предполагает решение комплекса задач:

- постановка базовой задачи реинжиниринга топологической структуры СКММ;
- формализация частных критериев эффективности варианта реинжиниринга топологической структуры СКММ (дополнительных затрат, оперативности, надежности и живучести);
- формирование математической модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур СКММ, охватывающей ее возможные частные случаи.

4. Формализация задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга

4.1. Постановка задачи реинжиниринга топологических структур трехуровневых СКММ

Рассмотрим базовую задачу реинжиниринга топологической структуры трехуровневой СКММ, построенной на однотипных элементах, узлах и каналах связи.

Задано:

– множество элементов системы мониторинга $I = \{i\}$, $i = \overline{1, n}$, покрывающих 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 $y'_i = [y'_i]$, $i = \overline{1, n}$ (y'_i – булева переменная, $y'_i = 1$, если на базе i -го элемента существует узел; $y'_i = 0$ – в противном случае), центра (центр системы расположен на базе элемента $i = 1$), а также связями между элементами, узлами и центром $x'_i = [x'_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ (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 (функционирование) узлов $[c_i]$, $i = \overline{1, n}$ и связей $[c_{ij}]$, $i = \overline{1, n}$.

Необходимо определить наилучший по множеству функционально-стоимостных показателей вариант топологической структуры СКММ $s^0 \in S$ (где S – допустимое множество вариантов) с учетом заданных ограничений на затраты, время получения информации, показатели надежности и живучести системы. Каждый вариант топологической структуры задается количеством узлов u , местами их размещения $y = [y_i]$, $i = \overline{1, n}$ (центральный узел размещается на базе первого элемента, т. е. $y_1 = 1$) и схемой связей между элементами, узлами и центром $x = [x_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$.

При этом: все множество объектов мониторинга с заданной кратностью находится под наблюдением элементов системы мониторинга; узлы системы могут размещаться только на базе ее элементов; к каждому из элементов $I = \{i\}$, $i = \overline{1, n}$ поступают запросы объемом $\alpha_i = [\alpha_i]$, $\alpha_i = \text{const}$; от каждого из элементов объемом $\beta_i = [\beta_i]$, $\beta_i = \text{const}$; элементы подключаются к узлу по минимуму стоимости (расстояния).

Такое представление задачи базируется на модели [2]. С целью упрощения модели: с учетом симметричности квадратную матрицу связей заменим верхней диагональной; места размещения узлов систем представим через значения элементов матрицы связей: $x'_{ii} = 1$, если на базе элемента i размещается узел системы, $x'_{ii} = 0$ – в противном случае $i = \overline{1, n}$.

Тогда исходное множество допустимых решений задачи определяется условиями:

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

где S – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ; 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; $c_{ij}, i, j = \overline{1, n}$ – стоимость связи между элементами i и j .

В качестве критериев предлагается использовать: минимум дополнительных капитальных, эксплуатационных или приведенных затрат; максимум оперативности; максимум надежности; максимум живучести.

Критерий минимума затрат. Затраты на существующий вариант СКММ $C(a)$, $a \in S$ в соответствии с [2] 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 $C_{eu}(a)$ [2]:

$$C(a) = C_c(a) + C_u(a) + C_{uc}(a) + C_e(a) + C_{eu}(a). \quad (2)$$

По аналогии с (2) оценку затрат $C(b)$ на оптимальный вариант СКММ для новых условий функциониро-

вания $b \in S$ (без учета существующей топологической структуры $a \in S$) можно представить в виде:

$$C(b) = C_c(b) + C_u(b) + C_{uc}(b) + C_e(b) + C_{eu}(b). \quad (3)$$

Желательной целью является минимизация дополнительных затрат $\Delta C(a, b)$. При этом разность затрат (2) и (3)

$$\Delta C(a, b) = C(a) - C(b) \quad (4)$$

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

Частный критерий дополнительных затрат на реинжиниринг СКММ $k_i(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}$ с учетом возможности использования части топологической структуры существующей системы $a \in S$ можно представить в виде:

$$k_i(a, s) = \Delta C(a, s) = \sum_{i=1}^n [c_i(1-x'_{ii})x_{ii} + d_i x'_{ii} x_{ii} + e_i(1-x'_{ii})x_{ii} - g_i x'_{ii} x_{ii}] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [c_{ij}(1-x'_{ij})x_{ij} + d_{ij} x'_{ij} x_{ij} + e_{ij}(1-x'_{ij})x_{ij} - g_{ij} x'_{ij} x_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S} \quad (5)$$

где 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 $i = \overline{1, n}$; $c_{ij}, i, j = \overline{1, n}$ – стоимость связи между элементами i и j ; s – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ (1).

Выражение (5) может быть упрощено путем группирования переменных:

$$k_i(a, s) = \Delta C(a, s) = \sum_{i=1}^n [(c_i + e_i)(1-x'_{ii})x_{ii} + (d_i - g_i)x'_{ii}x_{ii}] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(c_{ij} + e_{ij})(1-x'_{ij})x_{ij} + (d_{ij} - g_{ij})x'_{ij}x_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S} \quad (6)$$

Основные ограничения, учитываемые при оптимизации трехуровневых централизованных топологических структур территориально распределенных систем, применимы и для СКММ [2]:

– каждый элемент системы $i, i = \overline{1, n}$ должен быть связан с одним из узлов, т. е. $\sum_{i=1}^j x_{ij} + \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$ для всех i , для которых $x_{ii} = 0$, $i = \overline{1, n}$ или непосредственно с центром $x_{ii} = 1$, $i = \overline{1, n}$;

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

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

$$x_{ii} = 1 \wedge x_{ij} = 1 \rightarrow ij = \operatorname{argmin} \left\{ \min_{|s| \leq j} l_{ij}, \min_{|s| \leq n} l_{ji} \right\} \forall i \leq n,$$

$$i, j = \overline{1, n} \text{ (или расстояния);}$$

– каждый из узлов системы j связывается с центром

$$x_{jj} = 1 \rightarrow x_{ij} = 1;$$

– количество узлов может изменяться в интервале от 1 до n , т. е.

$$1 \leq \sum_{i=1}^n x_{ii} \leq n;$$

– количество симметричных связей в структуре трехуровневой централизованной СКММ равно

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

В отличие от известного критерия минимизации дополнительных затрат, используемого в модели [2], критерий (6) учитывает необходимые затраты на демонтаж узлов и оборудования для организации связей, а также возможность повторного использования оборудования узлов. Формула (6) остается справедливой для указанных в [2] крайних случаев, когда требуются максимальные дополнительные затраты $\Delta C_{\max} = \max \Delta C$ при полной замене узлов и связей существующего варианта топологической структуры СКММ, и минимальные дополнительные затраты $\Delta C_{\min} = \min \Delta C$, когда не требуется производить изменений топологической структуры.

Критерий максимума оперативности. В рамках рассматриваемой постановки задачи может использоваться детерминированная модель оперативности СКММ, учитывающая зависимость времени получения информации о состоянии объектов мониторинга от топологической структуры системы. Она позволит получать оценки для строго определенной технологии функционирования, однозначно определяющей интенсивности однотипных потоков данных от центра и к центру объемами $\alpha_i = [\alpha_i], \alpha_i = \text{const}, \beta_i = [\beta_i], \beta_i = \text{const}, i = \overline{1, n}$ в каналах и узлах системы.

Общее время получения информации от каждого из элементов системы $I = \{i\}, i = \overline{1, n}$ будем представлять, состоящим из времен: выдачи запроса центром τ_i^C ; передачи запроса по каналу центр-узел τ_i^{CU} ; обработки запроса в узле τ_i^{U1} ; передачи запроса по каналу узел-элемент τ_i^{UE} ; получения информации элементом системы τ_i^E ; передачи ответа по каналу элемент-узел τ_i^{EU} ; обработки ответа в узле τ_i^{U2} ; передачи ответа по каналу узел-центр τ_i^{UC} :

$$k_2(s) = \tau_i(s) = \tau_i^C + \tau_i^{CU}(s) + \tau_i^{U1}(s) + \tau_i^{UE} + \tau_i^E + \tau_i^{EU} + \tau_i^{U2}(s) + \tau_i^{UC}(s), i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

При этом время передачи запросов и ответов по каналам центр-узел $\tau_i^{CU}(s)$, элемент-узел $\tau_i^{EU}(s)$, а также обработки запросов и ответов в узлах $\tau_i^{U1}(s), \tau_i^{U2}(s) i = \overline{1, n}$, зависят от количества элементов, подключенных к каждому из узлов (топологической струк-

туры СКММ), а время выдачи запроса центром τ_i^C , получения информации элементом системы τ_i^E и передачи ответа по каналу элемент-узел τ_i^{EU} не зависят топологической структуры системы.

Для детерминированных однотипных потоков данных с учетом введенных выше обозначений соответствующие оценки времени могут быть получены с помощью следующих выражений:

$$\tau_i^{CU}(s) = \frac{\alpha_i}{g_i} \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ii}; \quad \tau_i^{U1}(s) = \frac{\alpha_i}{h_1} \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ii};$$

$$\tau_i^{UE}(s) = \frac{\alpha_i}{g_{ij}} = \text{const}; \quad \tau_i^E = \text{const}; \quad (8)$$

$$\tau_i^{EU}(s) = \frac{\beta_i}{g_{ij}} = \text{const}; \quad \tau_i^{U2}(s) = \frac{\beta_i}{h_2} \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ii};$$

$$\tau_i^{UC}(s) = \frac{\beta_i}{g_i} \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ii},$$

где g_i и g_{ij} – пропускные способности каналов связи центр-узел и узел-элемент; h_1 и h_2 – скорость обработки запроса и ответа на запрос в узлах системы.

С учетом того, что желательной целью для системы является минимизация максимального времени получения информации о состоянии объектов мониторинга, критерий оперативности, построенный на основе (7)–(8), можно представить в виде:

$$k_2(s) = \max_{1 \leq i \leq n} \left[\tau_i^C + \frac{\alpha_i}{g_{ij}} + \tau_i^E + \frac{\beta_i}{g_{ij}} + \left(\frac{\alpha_i}{g_i} + \frac{\alpha_i}{h_1} + \frac{\beta_i}{h_2} + \frac{\beta_i}{h_1} \right) \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ii} \right] \rightarrow \min_{s \in S}. \quad (9)$$

При использовании в системе мониторинга не строго детерминированной технологии сбора информации, приводящей к возникновению в сети неоднородных потоков, для оценки оперативности используются имитационные модели [14].

Критерий максимума надежности. Показатели надежности СКММ зависят от количества узлов и схемы связей в ней, надежности каждого отдельного ее компонента, а так же кратности резервирования элементов, узлов и связей.

В качестве оценки надежности СКММ выбран комплексный показатель – коэффициент готовности системы $k_3(s)$.

Надежность топологической структуры СКММ в целом зависит от надежности комплекса технических средств ее составных частей (центра, узлов, элементов) и связей на каждом иерархическом уровне (центр – узел, узел – элемент).

При оценке надежности топологической структуры СКММ будем учитывать ряд известных допущений и ограничений [15, 16]:

- время между возникновениями отказов является случайной величиной с экспоненциальным распределением;
- время восстановления работоспособности СКММ является случайной величиной с произвольным распределением;
- нарушения работоспособности СКММ являются взаимно независимыми событиями.

Для моделирования учитывается общая оценка надежности системы по выбранному показателю, однако на практике проводится оценка надежности всех элементов и связей между ними. Для детального расчета надежности территориально распределенных систем с различной топологией можно использовать работы [15–19].

Общую оценку надежности СКММ $k_3(s)$ будем производить по формуле [16]:

$$k_3(s) = k_3^C(s) \text{Ч} k_3^U(s) \text{Ч} k_3^E(s) \text{Ч} k_3^{CU}(s) \text{Ч} k_3^{UE}(s), \quad (10)$$

где $k_3(s)$, $k_3^C(s)$, $k_3^U(s)$, $k_3^E(s)$, $k_3^{CU}(s)$, $k_3^{UE}(s)$ – 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).

Надежность центрального узла не зависит от топологической структуры СКММ и определяется исключительно надежностью используемого в центре оборудования k^C .

Значение надежности комплекса технических средств среднего уровня зависит от топологической структуры СКММ $k_3^U(s)$, а комплекса технических средств нижнего уровня k_3^E не зависит от топологической структуры СКММ. Они могут быть определены по формулам:

$$k_3^U(s) = (k^U)^u \text{ и } k_3^E = (k^E)^n,$$

где k^U – коэффициент готовности отдельного узла; $u = \sum_{i=1}^n x_{ii}$ – количество узлов в системе; n – количество элементов системы; x_{ii} , $i = \overline{1, n}$ – диагональные элементы матрицы связей между элементами, узлами и центром системы; k^E – коэффициент готовности отдельного элемента.

Значения показателей надежности системы, каналов связи верхнего и нижнего уровней в принятых выше обозначениях могут быть представлены в виде: $k_3^{CU}(s) = (k^{CU})^u$ и $k_3^{UE} = (k^{UE})^n$ где k^{CU} и k^{UE} – коэффициенты готовности отдельных каналов связи верхнего и нижнего уровней.

С учетом этого критерий оптимизации надежности будет иметь вид:

$$k_3(s) = k^C \times (k^U)^u \times (k^E)^n \times (k^{CU})^u \times (k^{UE})^n \rightarrow \max_{s \in S}, \quad (11)$$

где S – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ (1).

Критерий максимума живучести. Под живучестью СКММ будем понимать ее способность сохранять функцию сбора информации (с допустимым сокращением множества объектов или кратности их мониторинга) при воздействии факторов внешней среды (неблагоприятных условий эксплуатации). Вследствие воздействия факторов внешней среды может происходить сокращение количества наблюдаемых объектов, связанное с выходом из строя элементов, узлов или каналов связи системы. Рассмотрим ситуацию равновероятного единичного выхода из строя (повреждения) центра, узлов, элементов или одной из связей системы мониторинга.

В качестве показателя живучести используем значение доли элементов в функционирующей системе связанных с центром, при единичных повреждениях:

- при выходе из строя центра $k_4^C = 0$;
- при учете выхода из строя одной связи центр-узел (1-j):

$$k_{4j}^{CU}(s) = \frac{n - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ji} x_{ij}}{n};$$

- при учете выхода из строя одного узла (на базе элемента j)

$$k_{4j}^U(s) = \frac{n - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{ji}}{n};$$

- при учете выхода поочередно из строя связи узел-элемент

$$k_4^{UE} = \frac{n-1}{n};$$

- при выходе из строя одного элемента

$$k_4^E = \frac{n-1}{n}.$$

Показатели k_4^C , k_4^{UE} и k_4^E могут быть исключены из рассмотрения, так как они не зависят от вариантов топологической структуры системы $s \in S$.

С учетом этого критерий живучести может быть представлен в виде:

$$k_4(s) = \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} \left(\frac{n - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ji} x_{ij}}{n} \right) \right\} \rightarrow \max_{s \in S}. \quad (12)$$

Формула (12) дает возможность оценки живучести СКММ (при единичных повреждениях) по минимальному значению доли элементов, связанных с центром в функционирующей системе.

4. 2. Формирование математической модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур СКММ

Предлагаемая математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур СКММ включает формализованные критерии затрат $k_1(a, s) \rightarrow \min_{s \in S}$ (5), оперативности

$$k_2(s) = \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \tau_i \right\} \rightarrow \min_{s \in S},$$

где τ_i – время получения информации от i-го элемента (9), надежности $k_3(s) \rightarrow \max_{s \in S}$ (8), и живучести

$$k_4(s) = \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} [k_{4j}^{CU}(s), k_{4j}^U(s)] \right\} \rightarrow \max_{s \in S},$$

где $k_{4j}^{CU}(s)$ и $k_{4j}^U(s)$ – показатели живучести при выходе из строя связи центр-узел и узла на базе j-го элемента (12):

$$\begin{cases} k_1(a,s) \rightarrow \min_{s \in S} k_1(a,s) \leq k_1^*; \\ k_2(s) = \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \tau_i \right\} \rightarrow \min_{s \in S} k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \rightarrow \max_{s \in S} k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) = \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} [k_{4j}^{CU}(s), k_{4j}^U(s)] \right\} \rightarrow \max_{s \in S} k_4(s) \geq k_4^*, \end{cases} \quad (13)$$

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

При этом вводимые в модели (13) ограничения на показатели затрат $k_1(s) \leq k_1^*(s)$, оперативности $k_2(s) \leq k_2^*(s)$, надежности $k_3(s) \leq k_3^*(s)$, и живучести $k_4(s) \leq k_4^*(s)$ могут существенно изменять исходное множество допустимых решений задачи, определяемое условиями (1).

Из модели (13) могут быть получены (путем исключения соответствующих частных критериев и ограничений) все практически важные модели задач реинжиниринга по одному, двум или трем частным критериям. Это может быть реализовано, например, путем свертки частных критериев с использованием их функций полезности [20, 21]:

$$\xi_i(s) = \left(\frac{k_i(s) - k_i^-}{k_i^+ - k_i^-} \right)^{\mu_i}, \quad i = \overline{1,4}, \quad (14)$$

где $k_i(s)$, k_i^+ , k_i^- , $i = \overline{1,4}$ – соответственно текущее, наилучшее и наихудшее значения i -го частного критерия; μ_i – параметр, определяющий вид зависимости (14): выпуклая, линейная или вогнутая.

Выбор наилучшего компромиссного решения $s^0 \in S$ при большой мощности множества S может быть произведен в рамках кардиналистического подхода с использованием аддитивной функции общей полезности:

$$P(s) = \sum_{i=1}^4 \eta_i \xi_i(s), \quad (15)$$

где η_i , $i = \overline{1,4}$ – коэффициенты важности частного критерия $k_i(x)$, $0 \leq \eta_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^4 \eta_i = 1$; $\xi_i(x)$ – функция полезности частного критерия $k_i(x)$, $i = \overline{1,4}$ (14).

Для выбора наилучшего компромиссного варианта топологической структуры СКММ в рамках этого подхода требуется решить задачу оптимизации вида:

$$s^0 = \arg \max_{s \in S} P(s). \quad (16)$$

При относительно небольшой мощности множества S (или подмножества компромиссных решений) для решения задачи могут быть использованы экспертные методы.

5. Выводы

В рамках решения проблемы синтеза и реинжиниринга систем мониторинга была сформулирована постановка базовой задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, что позволило определить множество допустимых решений проблемы.

Выполнена формализация наиболее часто используемых частных показателей эффективности вариантов. При этом была усовершенствована целевая функция дополнительных затрат путем учета возможности повторного использования имеющегося оборудования и упрощена (с точки зрения сокращения используемой памяти) путем использования для хранения информации о связях элементов системы и размещения ее узлов диагональных матриц. Впервые предложены соотношения для оценки показателей оперативности, надежности и живучести с учетом их зависимости в явном виде от параметров топологической структуры системы.

Предложена новая математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга. В отличие от существующих, она позволяет получать решения с учетом ограничений и оценкой вариантов по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести. Путем исключения из предложенной модели некоторых частных критериев и ограничений могут быть получены все практически важные модели задач реинжиниринга по одному, двум или трем частным критериям.

Полученные модели могут быть использованы при решении задач оптимизации информационных, транспортных, логистических систем и систем обслуживания. Практическое применение полученных результатов позволяет сократить сроки решения задач реинжиниринга, за счет учета более широкого множества показателей эффективности и ограничений улучшать функционально-стоимостные характеристики реструктуризируемых систем.

Литература

1. Бескорвайный, В. В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем [Текст] / В. В. Бескорвайный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – № 120. – С. 29–37.
2. Бескорвайный, В. В. Метод структурно-топологической оптимизации для реинжиниринга территориально распределенных объектов [Текст] / В. В. Бескорвайный // Системи обробки інформації. – 2004. – Вып. 4. – С. 26–33.
3. Кочкарь, Д. А. Проектирование инфраструктуры наземной системы мониторинга лесных пожаров [Текст] / Д. А. Кочкарь, А. В. Порубянский, А. А. Орехов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 6. – С. 197–201.
4. Dell'Olmo, P. A multiperiod maximal covering location model for the optimal location of intersection safety cameras on an urban traffic network [Text] / P. Dell'Olmo, N. Ricciardi, A. Sgalambro // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2014. – Vol. 108. – P. 106–117. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.12.824

5. Астраков, С. Н. Построение эффективных моделей покрытия при мониторинге протяженных объектов [Текст] / С. Н. Астраков, А. И. Ерзин // Вычислительные технологии. – 2012. – № 17 (1). – Р. 26–34.
6. Кочкарь, Д. А. Оптимальное размещение вышек наблюдения наземных систем видео-мониторинга лесных пожаров [Текст] / Д. А. Кочкарь, С. Ю. Мединцев, А. А. Орехов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 7. – С.311–314.
7. Малышев, В. В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление [Текст] / В. В. Малышев, М. Н. Красильщиков, В. Т. Бобронников и др. ; под общ. ред. В. В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
8. Ahmed, M. Remote monitoring with hierarchical network architectures for large-scale wind power farms [Text] / M. Ahmed // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 10, Issue 3. – P. 1319–1327. doi: 10.5370/jeet.2015.10.3.1319
9. Zhang, Y. An integrated environment monitoring system for underground coal mines – wireless Sensor Network subsystem with multi-parameter monitoring [Text] / Y. Zhang // Sensors. – 2014. – Vol. 14, Issue 7. – P. 13149–13170. doi: 10.3390/s140713149
10. Нефёдов, Л. И. Модель структурно-топологического синтеза системы мониторинга качества добычи газа [Текст] / Л. И. Нефёдов, М. В. Шевченко, О. Н. Кудырко // ScienceRise. – 2014. – Т. 2, № 2. – С. 61–67. doi: 10.15587/2313-8416.2014.27269
11. Mogheir, Y. Entropy and Multi-Objective Based Approach for Groundwater Quality Monitoring Network Assessment and Redesign [Text] / Y. Mogheir, J. L. M. P. de Lima, V. P. Singh // Water Resources Management. – 2008. – Vol. 28, Issue 3. – P. 1603–1620. doi: 10.1007/s11269-008-9343-8
12. Harmanciogamalu, N. B. Water quality monitoring network design [Text] / N. B. Harmanciogamalu, N. B. Fistikoglu, O. Ozkul et. al.; N. B. Harmanciogamalu (Ed.). – Dordrecht : Springer Science & Business Media, 1999. – 290 p.
13. Петров, Э. Г. Территориально-распределенные системы обслуживания [Текст] / Э. Г. Петров, В. И. Пискалкова, В. В. Бескоровайный. – К: Техніка, 1992. – 208 с.
14. Бескоровайный, В. В. Оценка времени доступа к информационным ресурсам распределенных баз данных при решении задач синтеза их физических структур [Текст] / В. В. Бескоровайный, О. С. Ульянова // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – № 3(15). – С. 210–214.
15. O'Connor, P. Practical reliability engineering [Text] / P. O'Connor, A. Kleyner. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 512 p. doi: 10.1002/9781119961260
16. Акимова, Г. П. Методология оценки надежности иерархических информационных систем [Текст] / Г. П. Акимова, А. В. Соловьев // Труды ИСА РАН. – 2006. – № 23. – С. 18–47.
17. Gertsbakh, I. B. Models of network reliability: analysis, combinatorics, and Monte Carlo [Text] / I. B. Gertsbakh, Y. Shpungin. – Chicago: CRC Press, 2009. – 217 p. doi: 10.1201/b12536
18. Levinson, D. Network Reliability in Practice: Selected Papers from the Fourth International Symposium on Transportation Network Reliability [Text] / D. Levinson, H. X. Liu, M. Bell.– Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2011. – 268 p.
19. Beichelt, F. Reliability and maintenance: networks and systems [Text] / F. Beichelt, P. Tittmann. – Chicago: CRC Press, 2009. – 344 p.
20. Бескоровайный, В. В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов [Текст] / В. В. Бескоровайный // Радиоелектроника и информатика. – 2002. – №. 3. – С. 94–96.
21. Овезгельдыев, О. А. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации [Текст] / О. А. Овезгельдыев, Э. Г. Петров, К. Э. Петров. – К.: Наукова думка, 2002. – 161 с.