

# МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Д.т.н. В.В. Бескорвайный, В.А. Иванова, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*Проведен анализ эффективности методов оптимизации топологии системы мониторинга производственного процесса с радиально-узловой структурой. 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 системи моніторингу виробничого процесу з радіально-вузловою структурою. 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 monitoring systems topology of manufacturing process 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:** производственный процесс, управление, система мониторинга, структура, топология, оптимизация.

## Введение

Наблюдаемое в настоящее время повышение сложности и требований к качеству продукции современных предприятий приводит к существенному усложнению производственных процессов и используемого технологического оборудования. Это делает актуальными задачи оптимизации технологических процессов и повышения эффективности использования оборудования. Основы решения таких задач закладываются уже на этапах проектирования производственных процессов и систем управления ими [1–3].

Источником информации для систем управления служат системы мониторинга (рис.1) [4].

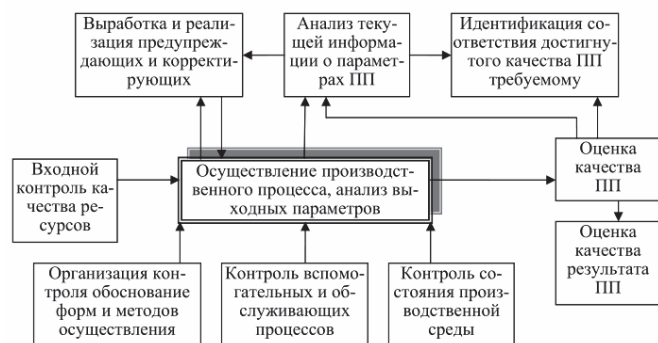


Рис. 1. Схема организации мониторинга производственного процесса

Современные системы мониторинга технологических процессов представляют собой территориально распределенные информационные системы контроля, диагностики и управления. Целью их создания является повышение эффективности и безопасности производства благодаря непрерывному мониторингу распределенных технологических объектов, управлению процессами производства, транспортировки и учета готовой продукции, замене физически и морально устаревших средств автоматизации и систем управления, повышению безопасности производства за счет средств диагностики и улучшения экологической обстановки, снижению трудоемкости управления технологическими процессами [5].

Внедрение таких систем на предприятиях позволяет обеспечить их эффективную работу в заданных режимах, повышать качество выпускаемой продукции, обеспечить безаварийность и экологическую безопасность производств, повысить производительность труда. При этом сами системы мониторинга являются сложными многокомпонентными системами, что делает целесообразным применение при их проектировании и эксплуатации системного подхода, методов исследования операций и математического моделирования [6].

Информацию для решения всего комплекса задач системы мониторинга обеспечивает подсистема информационного обеспечения, состоящая из компьютерных систем обработки информации и линий связи с измерительными устройствами на объектах контроля. К числу ее основных задач относятся сбор и обработка измерительной информации, формирование диагностической информации, создание баз данных, формирование и передача информационных потоков в виде электронного документооборота между другими подсистемами системы мониторинга.

Проектирование и реинжиниринг систем мониторинга производственных процессов предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации [7]. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей проектируемых систем мониторинга незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур.

Для решения задач оптимизации топологических структур используются комбинаторные и приближенные методы [8–10]. 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 [9–10]:

- 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.

Задача структурно-топологического синтеза состоит в доопределении варианта построения системы с заданными технологией функционирования, параметрами элементов и связей количеством узлов (подсистем), связями между ними и их топологией. Использование для ее решения методов ветвей и границ или направленного перебора локальных экстремумов функции цели не позволяет синтезировать системы с количеством элементов (мест возможного размещения узлов) более 50–60 [10]. Кроме того, задача традиционно решается в два этапа (размещение центра и размещение узлов), что снижает точность решения общей задачи.

При этом задачи размещения узлов системы мониторинга 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 систем мониторинга, различающихся по показателям точности и сложности, имеющих меньшую временную сложность, чем комбинаторные методы и большую точность, чем существующие приближенные методы. Таким образом, актуальной является проблема разработки методов решения общей задачи с меньшими временными затратами и (или) более высокой точностью.

*Целью статьи* является анализ и оценка эффективности методов оптимизации топологии систем мониторинга производственных процессов с радиально-узловыми структурами.

#### Постановка и математическая модель задачи

Будем рассматривать в качестве задачи оптимизации топологии задачу проектирования топологических структур системы мониторинга производственного процесса с радиально-узловой структурой по показателю затрат в следующей постановке [14].

Задано: множество рассредоточенных по территории элементов системы и их характеристики, типы узлов и связей, на базе которых создается система, места возможного размещения ее узлов и технология ее функционирования.

Необходимо определить: место размещения центра (центрального узла); оптимальное количество узлов (подсистем); места их размещения; множества элементов, непосредственно связанных с каждым из узлов. В

качестве критерия оптимизации используем минимум приведенных затрат на создание и эксплуатацию системы мониторинга.

Затраты на систему можно представить состоящими из затрат на ее центр  $C_C$ , узлы  $C_U$ , элементы  $C_E$ , связи между узлами и центром  $C_{UC}$ , связи между элементами и узлами  $C_{EU}$ :

$$C = C_C + C_U + C_{UC} + C_E + C_{EU}. \quad (1)$$

Для представления структуры и топологии используем матрицу смежности  $R = [r_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n_E}$ , где  $r_{ij} = 1$ , если вершины  $i$  и  $j$  связаны дугой,  $r_{ij} = 0$  – в противном случае. Для всех элементов, на базе которых размещаются узлы,  $r_{ii} = 1$ .

С учетом этого критерий задачи может быть представлен в виде:

$$C = C_C + \sum_{i=1}^{n_E} (c_U + c'_{iC} + c'_{Ci}) \cdot r_{ii} + c_E \cdot n_E + \sum_{i=1}^{n_E} \sum_{j=1}^{n_E} c_{ij} \cdot r_{ij} \rightarrow \min_{r_{ij}} \quad (2)$$

где  $C_C$  – стоимость центра;  $n_E$  – количество элементов, входящих в состав системы;  $c_U$  – стоимость узла;  $c'_{iC}$ ,  $c'_{Ci}$  – стоимости связи  $i$ -го узла с центром и центра с  $i$ -м узлом;  $c_E$  – стоимость элемента;  $c_{ij}$  – стоимость связи между элементами  $i$  и  $j$ .

Основные ограничения: каждый элемент системы мониторинга должен быть связан с одним из узлов; к узлу должно быть подключено не менее одного элемента; общее количество связей равно  $2 \cdot (n_E - 1) + n_U$ , где  $n_U$  – количество узлов в системе; элемент  $j$  присоединяется к узлу  $i$  по минимуму стоимости  $\min_i c_{ij}$ ; каждый из узлов связывается с центром, т.е.  $r_{ii} = 1 \rightarrow r_{iC} = 1$  и  $r_{Ci} = 1$ ; узлы не связываются между собой, т.е. ( $r_{ii} = 1$  и  $r_{jj} = 1$ )  $\rightarrow (r_{ij} = 0$  и  $r_{ji} = 0)$ .

Для решения задачи проектирования топологических структур необходимо применение методов, позволяющих получить эффективные решения с учетом многоэкстремальности целевой функции (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 для поиска глобального оптимального решения задачи предлагается использовать идею метода, предложенного в [14]. Суть ее состоит в определении отрезка  $[u_{min}, u_{max}]$ , который гарантированно содержит оптимальное решение.

В качестве нижней границы количества узлов в системе мониторинга выберем  $u_{min} = 1$ , что будет соответствовать непосредственной связи всех элементов с центром. Для определения верхней границы  $u_{max}$  необходимо определить минимумы затрат для вариантов построения системы с количествами узлов  $u := u + 1$ .

Увеличивать количество узлов следует до тех пор, пока значение приведенных затрат на систему не начнет увеличиваться.

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 оптимизации системы для  $1 \leq u \leq n$  составляет порядка  $2^n$  (где  $n$  – количество мест возможного размещения элементов системы).

Затраты на создание и (или) эксплуатацию центра  $C_C$  практически не зависят от количества узлов системы  $n_U$  и могут считаться постоянными. Затраты на создание и эксплуатацию узлов представляют собой в оговоренных условиях линейную зависимость от их количества  $C_U = c_U \cdot n_U$  (где  $c_U$  – затраты на 1 узел). Затраты на элементы системы  $C_E$  не зависят от количества ее узлов  $n_U$ . С увеличением количества узлов в системе затраты на их связи центром  $C_{UC}$  увеличиваются, а на связи между элементами и узлами  $C_{EU}$  снижаются. Анализ зависимости затрат  $C$  от количества узлов в системе показывает, что функция (1) и огибающая локальных экстремумов функции (2) могут быть представлены одноэкстремальной зависимостью от количества узлов  $n_U$  (рис. 2).

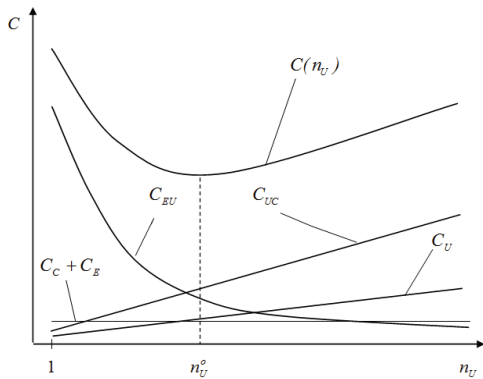


Рис. 2. Характер зависимости затрат на систему мониторинга от количества узлов в ней

Характер зависимости затрат на систему мониторинга от количества узлов в ней  $C(n_U)$  (1) позволяет использовать для решения задачи синтеза радиально-узловой топологической структуры идею направленного перебора *MDR* (*Method of directed recalculation*) по количеству узлов. Использование в базовом методе *MDR* размещения узлов путем покоординатного спуска (оптимизации) *MCD* (*Method of coordinate descent*) дает эвристический метод структурно-топологического синтеза *MDRCD*.

Идея покоординатной оптимизации для решения задачи размещения узлов *MCD* может быть реализована в различных версиях. Базовая схема этого метода *MCD*<sub>1</sub> предполагает улучшение некоторого начального решения путем последовательного (без ограничений) перемещения одного из узлов при фиксированном размещении  $n_U - 1$  остальных. При этом для каждого из вариантов размещения узлов определяется место наилучшего размещения центра.

### 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 [14].

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множества мест возможного размещения узлов; количества узлов  $u$ ; индекса текущего узла –  $j := 1$ ; значения текущей итерации –  $i := 1$ ; значения счетчика прохода по всем точкам  $l := 0$ ; начальных значений для наилучшего варианта размещения узлов  $w^0$ ; лучшего текущего значения критерия  $C(w^l) := \infty$ .

2. Сформировать начальное размещение узлов  $w_i^l$ , рассчитать для него значение критерия  $C(w_i^l)$ .

3. Увеличить значение счетчика количества итераций  $i := i + 1$ ; для узла  $j$  в  $w_i^l$  изменить место его размещения при фиксированных значениях для  $u - 1$  узлов.

4. Рассчитать значение критерия (2). Если  $C(w^l) \leq C(w_{i-1}^l)$ , то  $C(w^l) := C(w_i^l)$ ,  $w^0 := w_i^l$  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  $w_i^{l+1} := w_i^l$ ,  $l := l + 1$ ,  $j := 1$ , и перейти к шагу 3, в противном случае – к шагу 7.

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

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

### Оценка эффективности методов

Оценка точности метода *MDRCD* производилась путем сравнения решений множества задач синтеза трехуровневых топологических структур, включающих от 10 до 50 элементов, с точными решениями, полученными по методу *MDRCR*. Среднее значение относительной погрешности решений составило  $\bar{\varepsilon} = 0,0025$ , а максимальное ее значение –  $\varepsilon_{max} = 0,0475$ . При этом в 89,6 % задач были получены точные решения.

Для снижения сложности базового метода предлагается сократить множество возможных перемещений узлов окрестностью фиксированного радиуса  $\rho$  (модификация *MCD*<sub>2</sub>) или множеством мест размещения элементов, связанных с этим узлом (модификация *MCD*<sub>3</sub>). Обе модификации метода несколько снижают точность получаемых решений. Для повышения их точности предлагается использовать «мультистарт», предполагающий многократную реализацию процедуры покоординатной оптимизации для

различных начальных размещений узлов (модификация  $MCD_4$ ).

Использование в методе направленного перебора  $MDR$  способов размещения узлов  $MCD_1, MCD_2, MCD_3$  и процедуры «мультистарт»  $MCD_4$  дает множество модификаций метода направленного перебора по способу размещения узлов  $MDRCD_1, MDRCD_2, MDRCD_3, MDRCD_{14}, MDRCD_{24}, MDRCD_{34}$ .

Результаты экспериментальных исследований показали, что скорости роста сложности и повышения точности различны в направлениях увеличения радиуса окрестности поиска  $\rho$  (в долях от максимального расстояния между местами расположения элементов системы) и увеличения количества перезапусков процедуры оптимизации  $\eta$ .

Для определения лучшей модификации метода использован комплексный показатель «точность-сложность». Значения комплексного показателя эффективности по результатам решения задачи для систем с  $n_E = 100$  и  $n_U = 40$  приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Оценка эффективности модификаций метода  $MDRCD$   
по комплексному показателю «точность-сложность»

$\eta$	$MDRCD_1$	$MDRCD_{24}$				$MDRCD_{34}$
		$\rho=0,2$	$\rho=0,4$	$\rho=0,6$	$\rho=0,8$	
1	0,913	0,807	0,882	<b>0,933</b>	0,920	0,795
2	0,798	0,812	0,860	0,853	0,803	0,806
3	0,692	0,811	0,799	0,782	0,715	0,806
4	0,591	0,800	0,759	0,720	0,630	0,806
5	0,497	0,783	0,685	0,642	0,540	0,801
6	0,483	0,779	0,611	0,567	0,452	0,798

Анализ результатов показывает, что наилучшее значение окрестности поиска при однократной реализации процедуры оптимизации  $MDRCD_{24}$  составляет  $\rho = 0,6$ . При ограничениях на время решения задачи или ограниченных вычислительных ресурсах следует уменьшать радиус окрестности поиска  $\rho$  и увеличивать количество перезапусков процедуры размещения узлов.

### Выводы

В работе выполнен анализ и оценка эффективности методов направленного перебора для оптимизации топологии систем мониторинга производственных процессов с радиально-узловыми структурами.

Экспериментальным путем установлено, что рациональное значение размера окрестности перемещения узлов изменяется в диапазоне от 0,3 до 0,8 и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением количества перезапусков процедуры поиска решений. Его конкретное значение зависит от соотношения между количествами элементов, узлов системы и мест их возможного размещения.

Сложность всех модификаций метода направленного перебора без потери точности может быть существенно снижена путем предварительного вычисления оценки оптимального количества узлов в системе. Это позволяет за счет сокращения перебора по количеству узлов снижать время решения задачи для

систем с количеством элементов от 40 до 100 по сравнению в среднем на 41,2 %.

Направлениями дальнейших исследований в этой области могут быть совершенствование и развитие предложенного метода оптимизации для решения задач проектирования и реинжиниринга систем мониторинга по множеству функционально-стоимостных показателей. Его практическое применение позволит сократить время проектирования, повысить качество принимаемых решений, оптимизировать затраты на организацию мониторинга.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Белов А.А. Моделирование и организация информационного обеспечения управления качеством производственных процессов / А.А. Белов, А.В. Малафеев // Вестник ИГЭУ. – 2004. – № 3. – С. 25–29.
2. Иванова, В.А. Имитационное моделирование системы мониторинга производственного процесса / В.А. Иванова // 20-й Юбилейный Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» [Текст]: зб. матеріалів форуму. Т. 2. – Харків: ХНУРЕ. 2016. – С. 115–116.
3. 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.
4. Компьютерное моделирование технологических процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tstu-isman.tstu.ru/pdf/> – 06.05.2016 г. – Загл. с экрана.
5. Ализде М.Ф. История использования контрольно-измерительных приборов на предприятиях нефтедобычи, нефтепереработки и нефтехимии Ашиерона / М.Ф. Ализде: автореферат дис. канд. техн. наук. – Уфа: Уфимский гос. нефтяной тех. университет, 2003. – 25 с.
6. Перегудов Ф.И. Основы системного анализа / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. Томск: Изд-во НТЛ, 1997. – 396 с.
7. Бескоровайный В. В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем / В. В. Бескоровайный // Автоматизированные сети управления и приборы автоматики. – 2002. – № 120. – С. 29–37.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Stützle T. G. Local search algorithms for combinatorial problems: analysis, improvements, and new applications. Sankt Augustin: Infix, 1999. – 203 p.
12. 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.
13. 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.
14. Бескоровайный В.В. Эвристический метод структурного синтеза территориально распределенных систем // Системи обробки інформації. – 2003. – Вип. 3. – С. 69–74.