

## **К ВОПРОСУ О ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АСУТП**

<sup>1</sup> Казань, Россия, ООО «НЕКСТ инжиниринг», zr@nexteng.ru

**Аннотация.** В статье дано описание задачи синтеза оптимальной структуры программно-технического комплекса автоматизированной системы управления технологическими процессами для крупных промышленных объектов. Дано формальное описание задачи, определены критерии, выделены ограничения, вызванные техническими особенностями серийно выпускаемых компонентов системы. Предложены методы решения задачи, определены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** распределенная система управления, структурный синтез, структурная оптимизация, иерархическая структура, система управления технологическим процессом.

*Ruslan M. Zakirzyanov*<sup>1</sup>,  
Chief technology officer

## **ON THE ISSUE OF THE PROBLEM OF SYNTHESIS THE OPTIMAL ARCHITECTURE OF THE AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX**

<sup>1</sup> NEXT engineering, Kazan, Russia, zr@nexteng.ru

**Abstract.** The article describes the task of synthesizing the optimal architecture of the software and hardware complex of an automated process control system for large industrial facilities. A formal description of the task is given, criteria are defined, and limitations caused by the technical features of mass-produced system components are highlighted. Methods for solving the problem are proposed, and directions for further research are determined.

**Keywords:** distributed control system, structural synthesis, structural optimization, hierarchical architecture, process control system.

### **Введение**

Современные системы управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий строятся, как правило, на базе программно-технических комплексов. Свойства и функциональные возможности таких распределенных систем управления определяются, как правило, структурой комплекса технических средств. Построение оптимальной структуры является важной задачей, которая в основном

решается эмпирически на основании опыта проектировщика. В настоящей статье рассмотрена формализация задачи оптимизации структуры для программно-технического комплекса автоматизированной системы управления технологическими процессами с большим количеством параметров.

## **1. Особенности распределенных систем управления непрерывными технологическими процессами**

Системы управления крупными промышленными объектами нефтегазовой и химической отраслей имеют свои характерные особенности. Такие объекты, как правило территориально распределены, являются опасными и технически сложными, имеют непрерывные процессы. На таких объектах часто происходят изменения: меняются параметры технологического режима, часть оборудования выводится в ремонт. Ввод в эксплуатацию таких объектов происходит частями (очередями) или этапами.

Серийно выпускаемые промышленностью программно-технические комплексы для построения на их базе АСУТП крупных промышленных предприятий с непрерывными технологическими процессами получили в литературе [1] название DCS – Distributed Control System. В русскоязычной литературе чаще всего применяется термин «PCY» – распределенная система управления.

Особенностью PCY является наличие специальных средств и функций, направленных на решение двух задач: обеспечение безопасности процесса и снижение времени внедрения. Такими специальными мерами могут быть наличие возможности загрузки прикладного ПО без останова процесса, наличие частичной загрузки прикладного ПО, штатные функции резервирования, наличие единой базы тегов, бессерверная архитектура и др.

Программно-технический комплекс PCY, как правило, представляет собой иерархическую структуру (рис. 1).

Здесь CPU – процессорные модули станций автоматизации (контроллеров), I/O – станции ввода-вывода, OS – автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов технологического процесса, LCU – локальные системы управления.

## **2. Основные положения**

Для постановки задачи поиска оптимальной структуры PCY представим ее структуру в виде дерева (ациклического графа), пример которого показан на рис. 2. Здесь на уровне 1 расположены «полевые» устройства (датчики и исполнительные механизмы), находящиеся на «нижнем уровне» АСУТП (рис. 1). На уровне 2 расположены устройства связи с объектом (устройства ввода-вывода). На уровне 3 расположены

контроллеры (станции автоматизации), отвечающие за реализацию алгоритмов управления объектом. «Верхний уровень» АСУТП в рамках данного дерева не рассматривается. Количество уровней в структуре задается проектировщиком и может варьироваться.

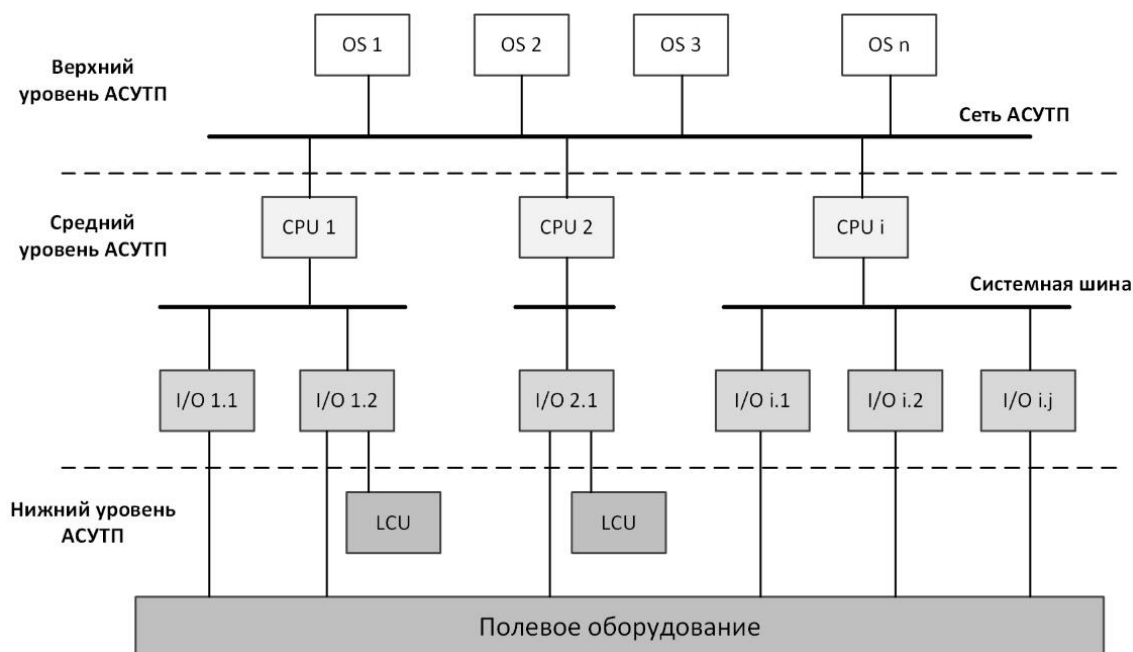


Рис. 1. Типовая структура РСУ

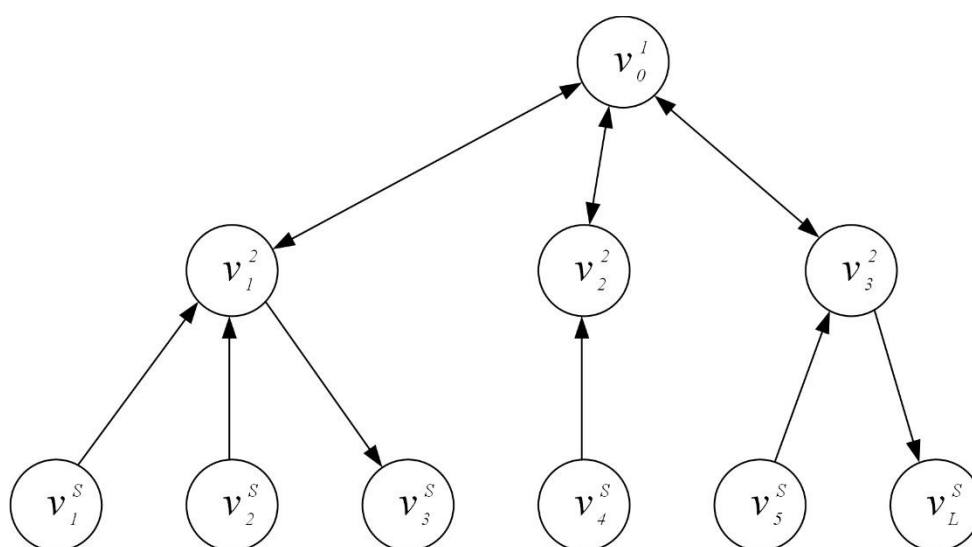


Рис. 2. Иерархическая структура РСУ

Методы оптимизации иерархических структур подробно рассмотрены в [2, 3, 4].

Пусть задана иерархическая структура распределенной системы управления в виде дерева  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , где  $v \in \mathcal{V}$  – устройства (вершины графа),  $\mathcal{E}$  – ребра графа (каналы связи между устройствами).

Пусть также задано множество типов устройств  $\mathcal{U} = \{u_1, \dots, u_U\}$ , состоящее из  $U$  типов устройств.

Примем, что каждый узел структуры (устройство) любого типа выполняет однотипные действия, состоящие из трех фаз цикла работы внутренней программы устройства:

- сбор (чтение) информации от объекта управления, либо от узлов предыдущего уровня иерархии;
- обработка информации (реализация алгоритмов управления);
- выдача информации (запись) на нижестоящий уровень, либо воздействие на объект управления.

Каждый тип  $u_i \in \mathcal{U}$  узла структуры характеризуется следующими параметрами (1):

- количество подключаемых физических каналов  $N_i \in \mathbb{N}$ ;
- максимальная память  $R_i \in \mathbb{R}^+$ ;
- вероятность отказа устройства  $P_i \in [0,1]$ ;
- производительность (время выполнения одной программной инструкции)  $T_i \in \mathbb{R}^+$ ;
- стоимость  $C_i \in \mathbb{R}^+$ .

$$u_i = (N_i, R_i, P_i, T_i, C_i), i = \overline{1, U} \quad (1)$$

Пусть также задано множество контуров управления  $\mathcal{J} = \{a_1, \dots, a_J\}$ , состоящее из  $J$  контуров:

$$a_j = (n_j, r_j, w_j), j = \overline{1, J} \quad (2)$$

где  $n_j \in \mathbb{N}$  – количество физических сигналов в контуре,  $r_j \in \mathbb{R}^+$  – количество памяти, требуемое для хранения всех инструкций и переменных контура,  $w_j \in \mathbb{N}$  – количество инструкций в программе обработки сигналов данного контура (характеризует сложность программы обработки контура).

Введем обозначения для иерархии.  $S \in \mathbb{N}$  – число уровней в иерархии, причем корень дерева соответствует уровню 1, листья дерева соответствуют уровню  $S$ .  $L \in \mathbb{N}$  – количество листьев дерева (устройства, подключенные к полевому оборудованию), причем множество листьев дерева обозначим через  $\mathcal{L} \subseteq \mathcal{V}$ ;  $V \in \mathbb{N}$  – общее количество устройств.

Для решения задачи принимаем, что только устройства уровня  $S$  (листья) непосредственно соединены с полевым оборудованием технологической установки, то есть могут принимать информацию от объекта управления и выдавать управляющие воздействия для реализации надлежащего управления объектом. Также принимаем, что все устройства

однотипны, различаются только величинами указанных выше параметров. Принимаем, что горизонтальные связи между устройствами отсутствуют.

Введем также дополнительные переменные.

Для каждого устройства  $v \in \mathcal{V}$ :  $u_v \in \mathcal{U}$  – тип устройства;  $\pi(v) \in \mathcal{V}$  – родительский узел (для корня дерева  $\pi(v_0) = \emptyset$ );  $\mathcal{D}(v) \subseteq \mathcal{V}$  – множество дочерних узлов устройства  $v$ . Для листа  $|\mathcal{D}(v)| = 0$ .

Каждое устройство может работать в двух режимах: режиме обработчика, когда в данном устройстве происходит обработка контуров, подключенным к нему и всем нижестоящим узлам, и режиме ретранслятора, когда подключенные к устройству и его дочерним узлам контуры передаются для обработки на вышестоящий уровень иерархии.

Зададим переменные, характеризующие режим работы узла:  $y_v \in \{0,1\}$ , где  $y_v = 1$ , если устройство является обработчиком и  $y_v = 0$ , если устройство является ретранслятором;  $x_{vj} \in \{0,1\}$ , где  $x_{vj} = 1$ , если контур  $j$  назначен на устройство  $v$ , в противном случае  $x_{vj} = 0$ .

Каждый контур может быть подключен только на один лист:

$$\sum_{v \in \mathcal{L}} x_{vj} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}. \quad (3)$$

Если  $y_v = 1$  ( $v$  является обработчиком), то

$$\sum_j x_{vj} \cdot r_j \leq R_{u_v}. \quad (4)$$

Если  $y_v = 0$  ( $v$  является ретранслятором), то

$$x_{vj} = 0, \quad \forall j \in \mathcal{J}. \quad (5)$$

Если  $y_v = 1$ , то  $y_{\pi(v)} = 0$  (родитель обработчика должен быть ретранслятором).

### 3. Критерии и ограничения

Ранее [5, 6] были определены ключевые критерии оптимизации иерархической структуры распределенной системы управления.

Определяющим фактором при создании системы является ее стоимость. Стоимость системы складывается из капитальных и операционных затрат. Если принять, что затраты на создание одного узла системы являются постоянными, суммарные финансовые затраты на реализацию системы определяются как сумма затрат на каждый узел:

$$C_{sum} = \sum_v C_{u_v} \quad (6)$$

где  $C_{u_v}$  – затраты на приобретение и ввод в эксплуатацию  $v$ -го устройства и организацию канала связи с ним.

В качестве критерия надежности системы используем вероятность отказа. Методика расчета надежности иерархических автоматизированных систем управления технологическими процессами приведена в [7]. Результирующая надежность системы описывается выражением (7).

$$P_{sys} = \prod_v P_{u_v} \quad (7)$$

где  $P_{u_v}$  – вероятность отказа  $v$ -го устройства. Считаем, что  $P_{u_v} = \text{const}$ . В реальных системах вероятность отказа является функцией времени:  $P_{u_v} = f(t)$ .

Поскольку проектируемая структура является структурой системы управления динамическим объектом, важно при синтезе учесть динамические свойства системы. На практике это является довольно сложной задачей [8]. В качестве критерия, характеризующего качество системы управления, примем время цикла работы программы (период квантования) для одного контура управления. При нехватке памяти или слишком большом времени цикла программы функции обработки информации могут передаваться на вышестоящий уровень иерархии. При этом контуры управления могут быть подключены только к устройствам уровня  $S$ .

Время обработки для  $j$ -го контура, подключенного к  $v$ -му устройству, будет определяться выражением (8):

$$T_{sum\ j} = y_v \cdot x_{vj} \cdot w_j \cdot T_{u_v}, \quad (8)$$

где  $y_v$  показывает, является ли устройство  $v$  обработчиком контура  $j$ ,  $x_{vj}$  показывает, подключен ли контур  $j$  к устройству  $v$  (напрямую или через ретрансляторы),  $w_j$  – количество инструкций в контуре  $j$ ,  $T_{u_v}$  – среднее время выполнения одной инструкции в устройстве  $v$ .

Суммарная требуемая память для контуров, подключенных к  $v$ -му устройству:

$$R_{sum\ v} = \sum_j x_{vj} \cdot r_j. \quad (9)$$

Суммарное количество сигналов для  $v$ -го устройства:

$$N_{sum\ v} = \sum_j x_{vj} \cdot n_j. \quad (10)$$

Оптимальная иерархическая структура должна минимизировать стоимость системы при ограничениях на время цикла в контуре, количество контуров, подключенных к одному устройству, размер памяти устройства и вероятность отказа системы. Таким образом, оптимальная структура может быть определена в результате решения задачи дискретной оптимизации:

$$C_0 = \min_v C_{sum} \quad (11)$$

при

$$T_{sum\ j} \leq T_{max}, j = \overline{1, L}, \quad (12)$$

$$N_{sum\ v} \leq N_v, \forall v, \quad (13)$$

$$R_{sum\ v} \leq R_v, \quad (14)$$

$$P_{sys} \leq P_{max}, \quad (15)$$

где  $C_0$  – оптимальная суммарная величина затрат на создание и эксплуатацию системы,  $T_{max}$  – верхнее ограничение на быстродействие

системы (максимальное время цикла контура),  $P_{max}$  – максимальная допустимая вероятность отказа системы.

#### **4. Дальнейшие исследования**

Совокупность выражений (11)...(15) составляют постановку задачи структурной оптимизации. Для решения задачи может быть применен метод динамического программирования или эвристические алгоритмы, такие как генетический алгоритм. На базе построенного опорного решения необходимо провести поиск субоптимального решения одним из известных методов [4].

Проверка качества полученной системы управления может быть выполнена путем имитационного моделирования системы с конкретным объектом управления, например, технологической установкой химического предприятия. Примечательно, что полученная система будет являться системой управления с телекоммуникационными каналами связи [9], анализ и синтез которой являются предметами отдельного исследования.

#### **Заключение**

Задача поиска оптимальной структуры системы, построенной на базе серийно выпускаемых промышленностью компонентов, является чрезвычайно актуальной. В настоящее время синтез структуры таких систем выполняется в основном эмпирическим путем на основании опыта проектировщика и рекомендаций производителей оборудования и не всегда является оптимальным. Предложенная формализация задачи и методы решения позволяют сформировать алгоритм синтеза оптимальной структуры по стоимости при ограничениях на информационную мощность (количество каналов), память, быстродействие и надежность. Алгоритм может быть реализован в виде программного продукта и использован при работе инженерами-проектировщиками АСУТП при проектировании крупномасштабных систем управления непрерывными технологическими процессами.

#### **Список литературы**

1. Ицкович, Э. Л. Термины автоматизации и цифровизации предприятий технологических отраслей: Их пояснение, содержание и практическое значение / Э. Л. Ицкович // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 4. – С. 3-11.
2. Воронин, А. А. Оптимальные иерархические структуры / А. А. Воронин, С. П. Мишин. – Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2003. – 214 с.
3. Губко, М. В. Модель выбора оптимальной древовидной иерархии / М. В. Губко, А. И. Даниленко, М. И. Сапико // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. – 2006. – № 1-1. – С. 46-50.

4. Новиков, Д. А. Методы оптимизации структуры иерархических систем / Д. А. Новиков, М. В. Губко // Управление развитием крупномасштабных систем: Современные проблемы / Под редакцией А.Д. Цвиркуна. Том Выпуск 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2015. – С. 359-377.

5. Закирзянов, Р. М. Критерии выбора оптимальной структуры распределенной системы управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий / Р. М. Закирзянов // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 10. – С. 17-23.

6. Риттер, А. В. К вопросу выбора критериев оценки средств промышленной автоматизации для тепловой и атомной промышленности / А. В. Риттер, С. Б. Чебышов // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – Т. 4, № 7. – С. 648.

7. Акимова, Г. П. Методология оценки надежности иерархических информационных систем / Г. П. Акимова, А. В. Соловьев // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2006. – Т. 23. – С. 18-47.

8. Цвиркун, А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун // М.: Наука, 1982. - 200 с.

9. Zhang, W., Branicky, M. S., & Phillips, S. M. (2001). Stability of networked control systems. IEEE Control Systems Magazine, 21(1), 84-97.