

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р.М. Закирзянов¹

¹ООО «НЕКСТ инжиниринг», Россия, Казань, zr@nexteng.ru

Аннотация. В статье дана постановка задачи оптимизации структуры распределенной системы управления крупным промышленным объектом, построенной на базе серийно выпускаемого программно-технического комплекса. Сформулированы критерии оптимизации. Приведено решение задачи оптимизации для иерархической системы управления на базе известного метода. Указаны недостатки существующих методов оптимизации иерархических структур в применении к системам управления. Предложены варианты дальнейшего развития и алгоритмизации задачи.

Ключевые слова: оптимизация иерархической структуры, автоматизированные системы управления технологическими процессами, распределенные системы управления, структура системы управления.

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE FOR DISTRIBUTED CONTINUOUS PROCESS CONTROL SYSTEM IN THE CHEMICAL INDUSTRY

R.M. Zakirzyanov¹

¹NEXT engineering, LLC, Russia, Kazan, zr@nexteng.ru

Abstract. The article presents the problem of optimizing the structure of a distributed control system for a large industrial facility based on a commercially available software and hardware. Optimization criteria are formulated. The solution of the optimization problem for a hierarchical control system based on a well-known method is given. The disadvantages of the existing methods of optimizing hierarchical structures in application to control systems are indicated. Options for further development and algorithmization of the problem are proposed.

Keywords: hierarchical structure optimization, industrial automated process control system, distributed control system, control system architecture.

При реализации крупных инфраструктурных проектов особое внимание уделяется срокам реализации, стоимости проекта и рискам. В проектах строительства и технического перевооружения крупных предприятий химической промышленности возникает ряд задач, требующих оптимального решения по заданным критериям.

Крупное предприятие химической промышленности, как правило, состоит из ряда цехов (установок) и вспомогательных объектов, объединенных в технологический цикл. Каждый цех или установка оснащается автоматизированной системой управления, необходимой для обеспечения надлежащего качества продукции, безопасности и минимизации затрат на производство. В общем случае такие системы условно называют автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП).

В ряде случаев отдельные АСУТП объединяются между собой, а также с другими информационно-управляющими системами в единый комплекс. Такой комплекс получил название ИСУБ – интегрированная система управления и безопасности.

Современные АСУТП цехов (установок) крупных промышленных предприятий строятся на базе выпускаемых промышленностью программно-технических комплексов (ПТК) и являются проектно-компонентными.

Выделяют два основных вида ПТК для построения АСУТП:

- ПТК на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) и SCADA-системы (ПЛК+SCADA);
- ПТК на базе DCS (Distributed Control System – англ.).

АСУТП непрерывными технологическими процессами в химической промышленности, как правило, строятся на базе DCS, что обусловлено особенностями процесса и специфическими требованиями как к процедуре ввода в действие, так и к эксплуатации таких систем.

В обоих случаях АСУТП представляет собой иерархическую структуру [1], которая может содержать несколько уровней.

Типовая структурная схема АСУТП [2] представлена на рисунке (рис. 1).

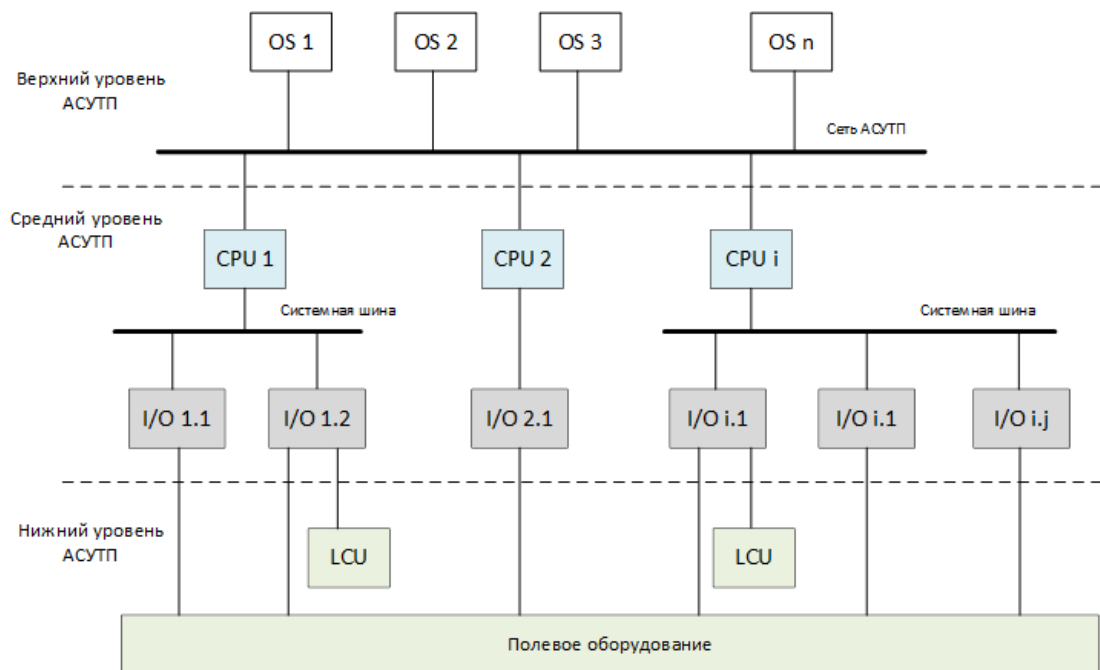


Рис. 1. Типовая структура АСУТП

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

Особенностью построения АСУТП крупного промышленного объекта является то, что система полностью строится из серийно выпускаемых компонентов, обладающих известными характеристиками. Таким образом, характеристики системы в целом во многом определяются только ее структурой.

Выделяют три основных типа структуры АСУТП [3]:

- централизованная;
- децентрализованная;
- распределенная.

Наибольший интерес представляет распределенная структура, позволяющая существенно снизить стоимость системы, сократить время внедрения и, в то же время, увеличить надежность и производительность. В дальнейшем под РСУ понимается распределенная АСУТП крупного промышленного объекта.

Задача поиска оптимальной иерархической структуры широко встречается в различных отраслях. Известно достаточно большое количество методов оптимизации иерархических структур [4], [5], [6]. Данные методы успешно могут быть применены

для поиска и выбора оптимальной структуры из нескольких вариантов по заданным критериям. В общем случае иерархическая структура представляется в виде ациклического графа, вершины которого являются узлами структуры, а дуги – связями между узлами.

Для постановки задачи поиска оптимальной структуры РСУ необходимо сформулировать критерии. В общем виде критерии для решения данной задачи даны в [2]. Система должна обеспечивать заданное быстродействие, удовлетворять требованиям надежности и иметь минимально возможную стоимость ниже предельно допустимой.

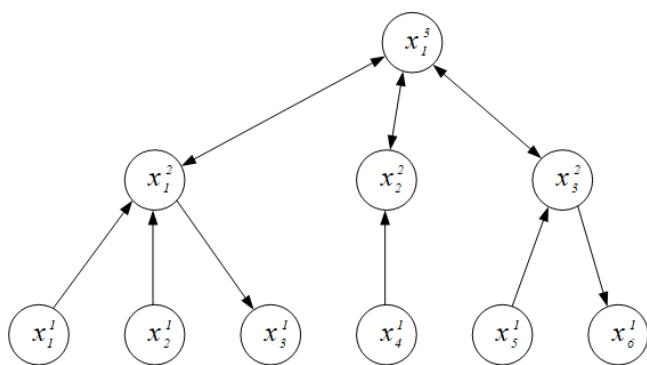


Рис. 2. Иерархическая структура РСУ

Для постановки задачи поиска оптимальной структуры РСУ представим ее структуру в виде дерева, 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.

Пусть задано множество N_S вариантов структур РСУ, имеющих S уровней:

$$N_S = (S, m_k : k = \overline{1, S}), \quad (1)$$

где m_k – количество устройств на k -м уровне иерархии.

Обозначим x_i^k – устройство, имеющее порядковый номер i на уровне k (рис. 2).

При этом $i = \overline{1, m_k}$.

Примем, что каждый узел структуры выполняет однотипные действия, состоящие из трех фаз цикла работы внутренней программы:

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

Показано [7], что оптимальной иерархической структурой будет являться однородное дерево, которое можно определить аналитически.

Для решения задачи принимаем, что только устройства первого (нижнего) уровня 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, к одному устройству первого уровня подключена только одна единица полевого оборудования, причем эта единица полевого оборудования может выполнять как функции сбора информации о состоянии объекта управления, так и функции управления.

В соответствии с указанными ранее критериями введем ряд обозначений.

Суммарные временные затраты t_i на обработку информации для i -й единицы полевого оборудования, подключенной к i -му устройству первого (нижнего) уровня иерархии, складываются из времени на получение информации от датчиков, времени ее обработки и времени, затрачиваемого на выдачу управляющих воздействий на соответствующие исполнительные механизмы, причем реализация этих функций может происходить на каждом из уровней иерархии.

Суммарное время обработки всей информации в системе [7]:

$$T_{sum} = \sum_{k=1}^S (t_k n_k + t_k^0), \quad (2)$$

где t_k – среднее время обработки одного сигнала, n_k – среднее количество обрабатываемых сигналов устройствами k -го уровня, t_k^0 – среднее время выполнения служебных задач устройствами k -го уровня.

Суммарное время, затрачиваемое на обработку информации, связано со средним количеством устройств m_k на данном уровне иерархии.

$$n_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k - \lambda_k}, \quad (3)$$

где λ_k – средняя скорость обработки полевых сигналов на данном уровне иерархии, $\mu_k = 1/t_k$ – средняя скорость работы одного устройства.

$$\lambda_k = \frac{\Lambda}{m_k} \prod_{i=1}^{k-1} g_i, \quad (4)$$

где g_i – весовой коэффициент, показывающий, какая часть обработки сигнала происходит на данном уровне, а какая передается на вышестоящий уровень, Λ – средняя скорость обработки всех сигналов в системе.

Получаем выражение для T_{sum} :

$$T_{sum} = \sum_{k=1}^S \left(\frac{\Lambda \prod_{i=1}^{k-1} g_i}{\mu_k (\mu_k m_k - \Lambda \prod_{i=1}^{k-1} g_i)} + t_k^0 \right), \quad (5)$$

Суммарные финансовые затраты на реализацию системы определяются как сумма затрат на одно устройство:

$$C_{sum} = \sum_{k=1}^S (C_k m_k), \quad (6)$$

где C_k – средние затраты на приобретение и ввод в эксплуатацию одного устройства k -го уровня и организацию канала связи с ним.

В качестве критерия надежности системы используем вероятность безотказной работы. Методика расчета надежности иерархических автоматизированных систем управления технологическими процессами приведена в [8]. Результирующая надежность системы описывается выражением (7).

$$P_{sum} = \prod_{k=1}^S ((P_k)^{m_k}), \quad (7)$$

где P_k – вероятность безотказной работы одного устройства k -го уровня. Считаем, что $P_k = const$. В реальных системах вероятность безотказной работы является функцией времени: $P_k = f(t)$.

Оптимальная иерархическая структура должна минимизировать время обработки информации в системе и стоимость системы при вероятности безотказной

работы не ниже заданного ограничения. Таким образом, оптимальная структура может быть определена в результате решения задачи векторной оптимизации. Для поиска оптимальной иерархической структуры решаются прямая и обратная задачи [7].

При решении прямой задачи необходимо определить иерархическую структуру, такую что суммарное время выполнения всех вычислительных операций в системе будет минимально при заданных ограничениях на стоимость и надежность:

$$T_O = \min_{S(m_k)} T_{sum}(S(m_k)) \quad (8)$$

при $C_{sum}(S(m_k)) \leq C_{max}$ и $P_{sum}(S(m_k)) \geq P_{min}$.

где T_O – оптимальное суммарное время обработки информации, C_{max} – верхнее ограничение по стоимости системы, P_{min} – нижнее ограничение по надежности.

При решении обратной задачи необходимо определить иерархическую структуру, такую что суммарная стоимость системы будет минимальна при заданных ограничениях на время обработки информации и надежность:

$$C_O = \min_{S(m_k)} C_{sum}(S(m_k)) \quad (9)$$

при $T_{sum}(S(m_k)) \leq T_{max}$ и $P_{sum}(S(m_k)) \geq P_{min}$.

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

Для решения задачи оптимизации применим метод неопределенных множителей Лагранжа.

Для прямой задачи функция Лагранжа будет иметь вид (10).

$$L(m_k, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=1}^S (t_k n_k + t_k^0) + \beta_1 \left(\sum_{k=1}^S C_k m_k - C_{max} \right) + \beta_2 \left(\prod_{k=1}^S ((P_k)^{m_k}) - P_{min} \right) \quad (10)$$

где β_1, β_2 – множители Лагранжа.

Для решения задачи, взяв частные производные по переменным m_k, β_1, β_2 , получим систему $(S + 2)$ уравнений, решив которую для различных значений $S = \overline{2, S_{max}}$ определим иерархические структуры, удовлетворяющие условиям (8):

$$N_S^* = (S^*, m_k^* : k = \overline{1, S}). \quad (11)$$

Обратная задача решается аналогичным образом. В результате решения обратной задачи получаем структуры, удовлетворяющие условиям (9):

$$N_S^{**} = (S^{**}, m_k^{**} : k = \overline{1, S}). \quad (12)$$

Оптимальные значения критериев определяются следующим образом:

$$T^0 = \min T_{sum}(N_S)$$

$$C^0 = \min C_{sum}(N_S)$$

$$P^0 = \min P_{sum}(N_S)$$

где $N_S \in \{N_S^*, N_S^{**} : S = \overline{2, S_{max}}\}$.

Для выбора оптимальной иерархической структуры из полученных вариантов (11) и (12) применяется нормировка и аддитивная свертка показателей T_{sum} и C_{sum} :

$$N_S^0 = arg \max_{\{N_S^*, N_S^{**}\}} \left\{ \alpha_1 \frac{T^0}{T_{sum}(N_S)} + \alpha_2 \frac{C^0}{C_{sum}(N_S)} \right\}, \quad (13)$$

где $S = \overline{2, S_{max}}$, α_1, α_2 – нормирующие коэффициенты.

Таким образом можно аналитическим путем получить оптимальную иерархическую структуру распределенной системы управления, удовлетворяющую заданным условиям.

На практике построить структуру в виде однородного дерева удастся не всегда. Вследствие этого целесообразно использовать полученную структуру (13) как эталонную с последующим уточнением. В таком случае ведут поиск решения, наиболее близкого к оптимальному с учетом имеющихся технических ограничений, а также уточняют решение с помощью дополнительных методов (эвристических методов [9] имитационного моделирования [7] и других).

В данной работе предложена оптимизация по двум критериям с ограничениями. В практических задачах количество критериев может быть увеличено. Например, важным критерием при построении структуры является пространственное расположение объектов и оборудования, поскольку при подключении оборудования посредством кабельно-проводниковой продукции важным критерием является ее минимизация.

Отдельной задачей оптимизации структуры является поиск оптимального баланса между граничными и облачными вычислениями в системе. Так, часть вычислительных операций можно производить непосредственно на устройствах, расположенных вблизи объекта управления, не передавая большие объемы информации на вышестоящий уровень и не загружая его, либо можно перенести часть вычислений на вышестоящий уровень, применяя сравнительно простое и более дешевое устройство вблизи объекта управления, необходимое только для связи объекта с вышестоящим уровнем без выполнения затратных вычислительных операций. Также могут быть добавлены ограничения по количеству сигналов на устройство, ограничения по пропускной способности каналов связи, по степени загрузки вычислительных мощностей оборудования и др. Кроме этого, очевидно, реальные структуры, как правило, не являются однородными.

В общем случае процесс поиска оптимальной иерархической структуры распределенной системы управления технологическими процессами промышленного предприятия может быть алгоритмизирован и представлен в виде ряда шагов:

Шаг 1. Ввод исходных данных и ограничений.

Шаг 2. Определение эталонной структуры аналитическим способом.

Шаг 3. Уточнение структуры и получение результата наиболее близкого к оптимальному с учетом ограничений и физической реализуемости.

Шаг 4. Верификация результата.

Алгоритм может быть реализован на ЭВМ для возможного практического применения инженерами-проектировщиками АСУТП.

Также стоит отметить, что описанный выше метод, а также другие методы, предложенные в [4], [5], [6], не учитывают динамику объекта.

В распределенной системе управления технологическим процессом множество компонентов связаны между собой посредством телекоммуникационных каналов связи, таких как Ethernet, LoRaWan и др. Передача сообщений по таким каналам происходит за конечное время, которое может быть заранее неизвестно. Таким образом, в системе возникают задержки, вызванные временем работы оборудования и протоколов связи (транспортное запаздывание). В [10] показано, что наличие в системе телекоммуникационных каналов связи (а, следовательно, и запаздываний) влияет на характеристики системы, в том числе на ее устойчивость.

Таким образом, при решении задачи поиска оптимальной иерархической структуры системы управления также необходимо учитывать динамические характеристики объекта и системы в целом, а также влияние структуры на динамику системы для получения качественного и востребованного результата.

Библиографический список

1. Тверской, Ю. С. О методологии структурного синтеза эффективных систем управления технологическим процессом / Ю. С. Тверской, И. К. Муравьев // Современные задачи автоматизации энергетики: сборник докладов, Москва, 14–15 сентября 2022 года / Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт». – Москва: ОАО «ВТИ», 2022. – С. 121-131.
2. Закирзянов Р.М. Критерии выбора оптимальной структуры распределенной системы управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 10. С. 17-23.
3. Kalyvas M. An Innovative Industrial Control System Architecture for Real-time Response, Fault-tolerant Operation and Seamless Plant Integration. J. Eng. 2021. С. 569–581. URL: <https://doi.org/10.1049/tje2.12064> (дата обращения 30.04.2025).
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. 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.
6. Воронин, А. А. Оптимальные иерархические структуры / А. А. Воронин, С. П. Мишин. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2003. – 214 с. – ISBN 5-85534-699-4.
7. Онуфрей, А. Ю. Метод оптимизации структуры в иерархических распределенных системах управления / А. Ю. Онуфрей, А. В. Разумов, В. В. Какаев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 44-53.
8. 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.
9. Губко, М. В. Математическая модель оптимизации структуры иерархического меню / М. В. Губко, А. И. Даниленко // Проблемы управления. – 2010. – № 4. – С. 49-58.
10. Zhang, W., Branicky, M.S., Phillips Zhang, S.M., & Branicky (2001). Stability of networked control systems. IEEE Control Systems Magazine, 21, 84-99. (дата обращения 30.04.2025).