

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Рассматривается актуальная задача оптимизации структуры распределенной автоматизированной системы управления непрерывным технологическим процессом. Ставится задача комбинаторной оптимизации с множественными ограничениями, для решения которой могут быть применены метаэвристические алгоритмы. Формулируются сопутствующие проблемы, такие как проблемы выбора алгоритма оптимизации, выбор параметров алгоритма, верификация полученной системы управления. Рассматривается пример системы управления непрерывным химическим производством. Оцениваются перспективы комбинации метаэвристических алгоритмов и машинного обучения.

*РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, НЕПРЕРЫВНЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ,
СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ, АЛГОРИТМ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ.*

Современная автоматизированная система управления технологическими процессами представляет собой иерархическую древовидную структуру [1], состоящую из нескольких уровней. Для построения таких систем применяют специализированные программно-технические комплексы (ПТК). Если объекты управления территориально распределены и характеризуются большим количеством параметров, говорят, что автоматизированная система управления является распределенной [2].

Поскольку система управления на базе ПТК строится из серийно выпускаемых промышленностью компонентов с заранее заданными характеристиками, актуальной является задача оптимизации структуры такой системы. Структуру системы удобно представить в виде ациклического графа, вершинами которого будут устройства (компоненты системы управления: контроллеры, устройства ввода-вывода, устройства коммутации), а ребрами – каналы связи между устройствами. Пример структуры приведен на рисунке 1.

В [3] сформулированы основные критерии оптимизации такой структуры. Формальная постановка задачи оптимизации с указанием всех ограничений приведена в [4]. Целевая функция стоимости системы будет иметь вид:

$$C_0 = \min_g \sum_{v \in V} C_v, \quad (1)$$

где C_0 – оптимальная стоимость системы, C_v – стоимость устройства v , граф $G = (V, E)$ представляет собой оптимальную структуру системы.

Таким образом, необходимо подобрать такую структуру из доступных типов устройств, чтобы доставлялся минимум целевой функции (1) при соблюдении всех ограничений, приведенных в [4].

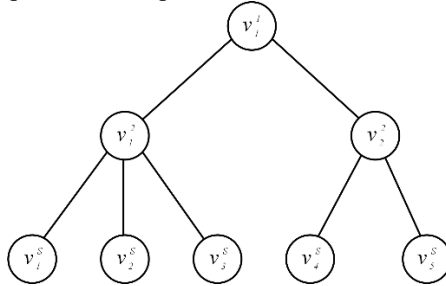


Рисунок 1 – Представление структуры системы в виде графа

Для решения такого класса задач оптимизации широко применяются метаэвристические алгоритмы [5], позволяющие получить приближенное решение с минимальным расходом вычислительных ресурсов.

Для решения данной задачи был выбран известный алгоритм муравьиных колоний (ACO – Ant Colony Optimization (англ.)), изначально разработанный для решения задачи поиска оптимального маршрута на графе. В данном случае каждый шаг при построении оптимального дерева разбивался на операции, каждая из которых выполнялась в соответствии с выражением:

$$P_i = \frac{\tau_i^\alpha \eta_i^\beta}{\sum_{k=0}^N \tau_k^\alpha \eta_k^\beta}, \quad (2)$$

где P_i – вероятность выбора i -го варианта, τ – количество феромона, η – стоимость варианта, α – параметр, характеризующий вес феромона («стадность»), β – параметр, характеризующий вес эвристики («жадность»), N – общее количество допустимых вариантов.

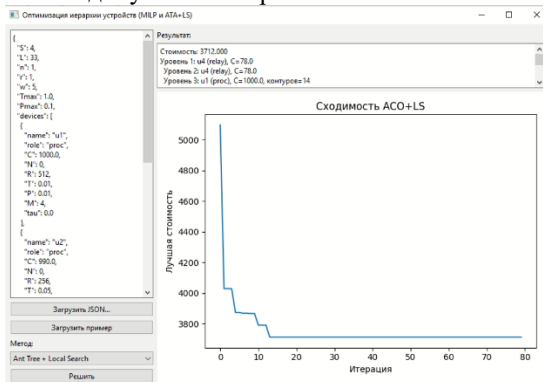


Рисунок 2 – Интерфейс программы

В целях реализации алгоритма было разработано программное обеспечение на языке Python. Интерфейс главного окна программы показан на рисунке 2.

В ходе экспериментальных исследований производилось решение ряда сопутствующих проблем. Производилось сравнение эффективности выбранного для решения данной задачи алгоритма АСО с другими известными метаэвристическими алгоритмами (поиск с запретами, генетический алгоритм, алгоритм серых волков). Сравнение производилось с использованием описанных в [6] методик. Алгоритм АСО показал наилучшую эффективность.

Также решалась задача выбора параметров алгоритма, а также проводилось исследование влияния параметров на сходимость алгоритма. Примеры графиков сходимости алгоритма при различных параметрах, заданных как в виде констант, так и в виде функций от номера текущей итерации, приведено на рисунке 3. По оси X на рисунке отложены номера итераций, по оси Y – стоимость системы.

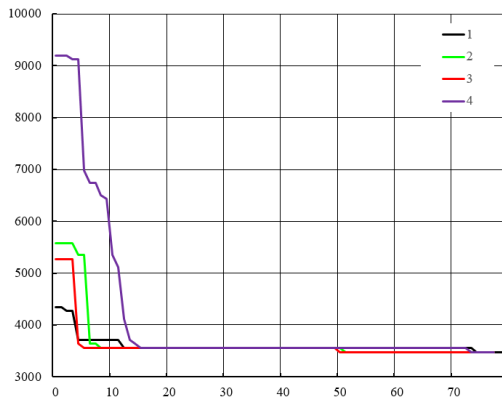


Рисунок 3 – Графики сходимости алгоритма АСО

В результате работы алгоритма была получена структура, которая была принята как оптимальная в рамках данной задачи. Система управления, построенная с использованием указанной структуры, представляет собой систему управления с телекоммуникационными каналами связи между регулятором и объектом управления. В качестве примера рассматривалась распределенная система управления непрерывным технологическим процессом крупнотоннажного производства серной кислоты [1].

Построение математической модели объекта управления выполнялось по методике, описанной в [7]. Поскольку система управления при определенных допущениях может быть разделена на несколько независимых контуров управления, для верификации рассматривались несколько выбранных наиболее ответственных с технологической точки зрения контуров.

Полученные в результате моделирования показатели качества системы удовлетворяют техническому заданию на систему управления.

Кроме этого рассматривался вопрос возможности использования машинного обучения для поиска оптимальной структуры промышленной системы управления, построенной на базе программно-технического комплекса. В настоящее время широко исследуются [8] методы оптимизации, построенные на комбинации одной или нескольких метаэвристик и машинного обучения (например, обучения с подкреплением). Также обучение с подкреплением может быть применено для построения опорной структуры, которая затем может быть уточнена с помощью какого-либо алгоритма оптимизации.

Библиографический список:

1. Закирзянов, Р. М. Опыт импортозамещения АСУТП непрерывного производства в химической промышленности / Р. М. Закирзянов, А. Р. Латыпов, А. И. Шпилев // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 12. – С. 43-48.

2. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. Монография / В. В. Денисенко. – Москва: Горячая линия - Телеком, 2013. – 606 с.

3. 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.

4. Zakirzyanov R. M. A Method For Optimizing The Structure Of The Software And Hardware Complex Of A Distributed Process Control System For Large Industrial Enterprises // In 18th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2025. PP. 1-5. doi: 10.1109/MLSD65526.2025.11220659.

5. Gladkov, L. A. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации / Л. А. Gladkov, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. – Чебоксары: ООО «Издательский дом «Среда», 2024. – 228 с.

6. Ahmed Shaban A., Almufti S. M., Asaad R. R. Metaheuristic Algorithms for Engineering and Combinatorial Optimization: A Comparative Study Across Problems Categories and Benchmarks // International Journal of Scientific World. 2025. Vol. 11, No. 2, PP. 38–49. doi:10.14419/Ohndc578.

7. Kiss A. A., Bildea C. S., Grievink J. Dynamic Modeling and Process Optimization of an Industrial Sulfuric Acid Plant // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 158, Issue 2, PP. 241–249. doi:10.1016/j.cej.2010.01.023.

8. Arik, O.A., Toğa, G., Atalay, B. Reinforcement Learning Based Acceptance Criteria for Metaheuristic Algorithms // Int J Comput Intell Syst. 2025. Vol. 18, No. 207. doi:10.1007/s44196-025-00924-2.