

МЕТОДЫ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

METHODS OF COMBINATORIAL OPTIMIZATION AND SYSTEM ANALYSIS FOR IMPROVING QUALITY OF PRODUCTION PROCESS MANAGEMENT

S. Tyryshkin
E. Sharlaev

Summary. Combinatorial optimization is universal due to the indivisibility of resources and a limited number of possible solutions. However, its tasks are characterized by high computational complexity and often belong to the class of NP-hard problems. Optimal control of technological processes requires taking into account specifics of information flows and structural features of production systems. Exact methods are often impractical because of exponential growth in computational effort. The study proposes a hybrid approach combining systematic analysis of technological processes with heuristics for searching acceptable solutions within reduced solution spaces. This method enhances management efficiency while maintaining a balance between solution quality and resource consumption.

Keywords: technological process, information, management, combinatorial optimization, solution search, computational complexity.

Тырышкин Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
Алтайский государственный технический
университет имени И.И. Ползунова, г. Барнаул
Service.vip-spe@yandex.ru

Шарлаев Евгений Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
Алтайский государственный технический
университет имени И.И. Ползунова, г. Барнаул
sharlaev@mail.ru

Аннотация. Комбинаторная оптимизация универсальна благодаря неделимости ресурсов и ограниченному числу возможных решений, однако её задачи характеризуются высокой вычислительной сложностью и часто относятся к классу NP-сложности. Оптимальное управление технологическими процессами требует учета специфики информационных потоков и структурных особенностей производства. Точные методы зачастую неприменимы из-за экспоненциального роста сложности вычислений. Исследование предлагает гибридный подход — сочетание системного анализа технологических процессов и эвристик для поиска приемлемых решений в сокращенном пространстве состояний. Такой метод позволяет повысить эффективность управления производственными системами, сохраняя баланс между качеством решений и ресурсоемкостью вычислений.

Ключевые слова: технологический процесс, информация, управление, комбинаторная оптимизация, поиск решения, вычислительная сложность.

Введение

В последние годы, с быстрым развитием цифровых инноваций, таких как искусственный интеллект, большие данные и Интернет вещей, наступила эра интеллектуальных технологий. Эта эра характеризуется огромным ростом объема данных, значительным увеличением вычислительной мощности и широким применением аналитических платформ [1, 2]. На этом фоне комбинаторные оптимизационные задачи, являющиеся ключевыми вопросами во многих областях, приобретают все большее значение [3].

Существующие методы решения комбинаторных задач оптимизации, такие как симуляционно-оптимизационный подход или метаэвристические алгоритмы, включающие выборку по методу Монте-Карло, значительно увеличивают вычислительную сложность и без того дорогостоящих подходов [4]. Кроме того, они адаптированы к конкретным случаям использования и целям, что

ограничивает их потенциал для внедрения. В реальной производственной практике количество операций, подлежащих обработке, может достигать десятков тысяч, что превышает возможности точной оптимизации даже самых современных решателей. В связи с этим возникает необходимость проведения системного анализа входных информационных потоков для выявления ограничений, накладываемых на математический аппарат принятия решений. Ключевой проблемой в данном случае является несоответствие вычислительных возможностей классических детерминированных алгоритмов стохастической природе и объемам поступающей изменительной информации [5]. Результаты сравнительного анализа факторов, препятствующих прямому применению традиционных методов управления, и количественная оценка параметров информационного обмена представлены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, свидетельствует о наличии критического противоречия между

Таблица 1.

Системный анализ характеристик информационных потоков в процессах комбинаторной оптимизации (составлено автором)

Аспект системного анализа процесса	Характеристика входной информации	Влияние на подсистему обработки информации	Последствия для задачи комбинаторной оптимизации
Стохастичность и зашумленность данных	Отношение сигнал/шум $SNR < 10$ дБ. Доля аномальных выбросов: 5...15 % выборки.	Невозможность прямой подачи «сырых» данных. Требуется фильтрация, снижающая размерность выборки в 10...100 раз.	Точные методы оптимизации расходятся или дают ошибку решения $\delta > 20$ % из-за неустойчивости входных коэффициентов.
Размерность пространства состояний	Число контролируемых параметров $n \in [103; 105]$. Количество связей между параметрами: $m \approx n^2/2$.	Экспоненциальный рост объема памяти для хранения матрицы состояний (более 16 Гб/с накопленных данных).	Задача переходит в класс NP-трудных. Время поиска глобального экстремума перебором $T \rightarrow \infty$.
Динамика поступления данных	Период дискретизации $\Delta t \leq 10$ мс. Скорость потока событий: > 1000 событий/с.	Дефицит времени на обработку. Допустимая задержка в контуре управления $T_{delay} \leq 50$ мс.	Алгоритм оптимизации должен сходиться за фиксированное число итераций ($k \leq 1000$), иначе решение устаревает до его применения.
Многокритериальность управления	Вектор целевых функций $F = \{f_1, \dots, f_s\}$. Конфликтность критериев (например, энергоёмкость/качество).	Необходимость нормировки разнородных шкал измерения информации перед сверткой.	Поиск не одной точки, а множества Парето (мощность множества 10...50 альтернатив), чтократно увеличивает вычислительную нагрузку.

требованиями к качеству управления и характеристиками входной информации.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к системному анализу, которые позволили бы интегрировать процедуры фильтрации, сжатия и кластеризации информации непосредственно в контур комбинаторной оптимизации.

Анализ публикаций по теме исследования

Перспективы использования машинного обучения для достижения лучшего компромисса между качеством решения и временем выполнения в задачах комбинаторной оптимизации при управлении технологическими процессами рассматривают в своих трудах Xu Guo, Xiaoyu Song, Jian-tao Zhou [6], Кулиев Э.В., Котельва А.В., Семенова М.М., Игнатьева С.В., Кухаренко А.П. [7], Wei-qi Zou, Chao-yang Niu, Wei Liu, Yan-yun Wang, Jia-qi Zhan [8].

Над разработкой стратегии декомпозиции решений на основе скользящего горизонта или операций-узких мест с целью разбиения крупномасштабных задач на более управляемые подзадачи, где ни одна стратегия не доминирует в минимизации опозданий по отношению к срокам, трудятся Адонин Л.С., Владыко А.Г. [9], Elsayed Elsedimy, Fahad Algarni [10], Кобак В.Г., Рязанов А.А. [11], Закирзянов Р.М. [12].

Вопросы, связанные с обоснованием критериев выбора адекватной комбинации взаимодополняющих

алгоритмических концепций, которые могут стать ключом к достижению наилучших результатов при решении многих сложных задач комбинаторной оптимизации, входят в круг научных интересов Hyeongwook Kim [13], Jannis Rose, Patrick Forman, David Stieler, Achim Menges, Peter Mark [14], Полупановой Е.Е., Рыбалко А.А. [15].

Нерешенные части общей проблемы

Высоко оценивая имеющиеся труды и наработки, следует отметить, что некоторые вопросы в данной предметной области остаются дискуссионными и требуют более детальной проработки. Также остаётся нерешённой проблема интеграция системного анализа с гибридными эвристическими подходами, позволяющая одновременно учитывать сложные технологические и эксплуатационные ограничения при минимизации времени отклика и потерь ресурсов. Кроме того, недостаточно исследованы механизмы взаимодействия программных и аппаратных компонентов ускорителей, влияющие на стабильность и предсказуемость работы замкнутых контуров управления.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей и подходов к системному анализу и обработке информации в процессах комбинаторной оптимизации при управлении технологическими процессами.

Результаты

Прежде всего, следует отметить, что сложность решения комбинаторных оптимизационных задач возникнет

Таблица 2.

Сравнительная оценка методов комбинаторной оптимизации по критериям эффективности обработки информации в управлении технологическими процессами

Метод комбинаторной оптимизации	Способность к обработке неполной информации	Вычислительная сложность	Точность решения (относительная погрешность ϵ)	Применимость для системного анализа в реальном времени
Детерминированные методы (линейное программирование, ветви и границы)	Низкая. Требуют 100 % достоверности данных. Любой сбой датчика блокирует расчет.	Экспоненциальная: $O(2^n)$. При $n=100$ время расчета превышает 1015 лет.	Идеальная: $\epsilon=0$ % (глобальный оптимум).	Неприменимы для оперативного управления из-за «проклятия размерности». Только для статических задач ($n < 50$).
Локальные эвристики (градиентный спуск, жадные алгоритмы)	Средняя. Чувствительны к локальным искажениям информационного поля.	Полиномиальная: $O(n^2)$. Быстрая сходимость (доли секунды).	Низкая: $\epsilon \approx 10 \dots 20$ %. Высокий риск локального экстремума.	Ограниченно применимы. Подходят для экспресс-оценки, но не гарантируют качество управления.
Бионические метаэвристики (генетические, муравьиные алгоритмы)	Высокая. Реализуют параллельную обработку информации, устойчивы к шуму до 30 %.	Управляемая: $O(I \cdot P \cdot n)$. Зависит от выделенного ресурса времени.	Приемлемая: $\epsilon \approx 1 \dots 3$ %. Решение достаточно для технологии.	Применимы с ограничениями. Требуют настройки 5–10 гиперпараметров под конкретный процесс.
Гибридный подход (системный анализ + эвристика)	Максимальная. Включает блок предварительной кластеризации и адаптивной фильтрации.	Сниженная: $O(n \log n)$ за счет декомпозиции задачи.	Высокая: $\epsilon < 1$ %. Адаптация к дрейфу параметров.	Рекомендованы. Обеспечивают баланс между точностью обработки информации и скоростью принятия решений.

кает из-за того, что, в отличие от линейного программирования, область допустимых решений не является выпуклой множеством. Таким образом, для поиска оптимального решения необходимо искать решетку допустимых точек или, в случае смешанных целых чисел, множество непересекающихся полупрямых или отрезков прямых [16]. В линейном программировании, благодаря выпуклости задачи, можно использовать тот факт, что любое локальное решение является глобальным оптимумом. В целочисленном программировании задачи имеют много локальных оптимумов, и для нахождения глобального оптимума следует доказать, что конкретное решение доминирует над всеми допустимыми точками с помощью аргументов, отличных от тех, которые основаны на исчислении подходов к выпуклому программированию [17].

С учетом стремительно возросшего потока данных, которые генерируются промышленными системами, интеллектуальными устройствами, встроенными системами мониторинга и диагностики, и которые необходимо учитывать для принятия оптимального решения в контексте управления технологическими процессами, представляется, что выбор конкретного математического аппарата должен базироваться на компромиссе между вычислительной сложностью и точностью получаемого результата. В табл. 2 представлен сравнительный анализ основных методов комбинаторной оптимизации, оценивающий их применимость для обработки больших массивов данных в режиме реального времени.

Результаты сравнительной оценки, приведенные в табл. 2, позволяют сделать следующие выводы.

Применение точных методов (ветвей и границ, линейного программирования) в контурах оперативного управления технологически неоправданно ввиду их экспоненциальной вычислительной сложности. Несмотря на гарантию нахождения глобального оптимума, требования данных методов к абсолютной точности входной информации вступают в конфликт с реальными условиями эксплуатации, характеризующимися наличием помех и изменением параметров работы технологических линий. С другой стороны, простейшие эвристики, обладая высоким быстродействием, не обеспечивают требуемой точности решения, допуская отклонения более 10–20 %.

Наиболее перспективным направлением, согласно проведенному исследованию, является применение гибридных подходов, сочетающих элементы системного анализа (для предварительной обработки и снижения размерности информационного пространства) и метаэвристических алгоритмов.

В частности, для управления технологическими процессами при неполноте и динамической изменчивости информации предлагаем объединить системный анализ структуры технологического процесса с эвристическим поиском в редуцированном пространстве решений. По мнению автора, это позволит существенно снизить вычислительную сложность без потери требуемой точности управления. Ожидается, что использование струк-

турно-информационной декомпозиции задачи будет способно обеспечить асимптотическое снижение трудоёмкости до уровня, совместимого с требованиями реального времени.

Подводя итоги, можно сделать такие выводы. Сложные комбинаторные оптимизационные задачи встречаются сегодня во множестве реальных приложений. Учитывая значительные объёмы информации и сложность технологических процессов, которыми необходимо управлять, для решения задач комбинаторной оптимизации разрабатываются и совершенствуются

интеллектуальные методы анализа, кооперативные подходы, стратегии кластеризации и т.д. По мнению автора, значительный потенциал имеет гибридный подход, объединяющий возможности метаэвристических алгоритмов и точных методов, который способен выступать не как вспомогательный инструмент оптимизации, а как полноценный элемент замкнутого контура управления технологическим процессом, обеспечивающий устойчивость и эффективность функционирования АСУ ТП в условиях неопределённости и высокой информационной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гушанский С.М., Божич В.И., Потапов В.С. Исследование и разработка схем с оптимизацией по глубине в алгоритме квантовой приближенной оптимизации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 5 (235). С. 6–16. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-5-6-16.
2. Тырышкин С.Ю. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации в контексте классических и квантовых вычислительных моделей // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 9. С. 144–151. DOI: 10.17513/snt.40499.
3. Тырышкин С.Ю. Комбинаторная оптимизация процессов распределения ресурсов организационных систем на основе нейронных сетей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 4. С. 113–121. DOI: 10.24143/2072-9502-2025-4-113-121.
4. Зиновьев Л.Д., Каледа Р.А. Применение логического программирования с ограничениями для задач оптимизации и планирования // Вестник Пензенского государственного университета. 2024. № 4 (48). С. 43–45.
5. A review on learning to solve combinatorial optimisation problems in manufacturing / Cong Zhang, Yaoxin Wu, Yining Ma et al. // IET Collaborative Intelligent Manufacturing. 2023. Vol. 5, iss. 1. e12072. DOI: 10.1049/cim2.12072.
6. Xu Guo, Xiaoyu Song, Jian-tao Zhou. A synergic quantum particle swarm optimisation for constrained combinatorial test generation // IET Software. 2022. Vol. 16, iss. 3. P. 279–300. DOI: 10.1049/sfw2.12054.
7. Интеллектуальный анализ данных в управлении предприятием на основе алгоритма имитации отжига / Кулиев Э.В., Котельва А.В., Семенова М. М. и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4 (228). С. 29–39. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-4-29-39.
8. Combination search strategy-based improved particle swarm optimisation for resource allocation of multiple jammers for jamming netted radar system / Wei-qi Zou, Chao-yang Niu, Wei Liu et al. // IET Signal Processing. 2023. Vol. 17, iss. 4. e12198. DOI: 10.1049/sil2.12198.
9. Адонин Л.С., Владыко А.Г. Алгоритмы роевого интеллекта для решения задач оптимизации в системах телекоммуникаций // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 3. С. 7–24. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-3-7-24.
10. Elsedimy Elsayed, Algarni Fahad. MOTS-ACO: An improved ant colony optimiser for multi-objective task scheduling optimisation problem in cloud data centres // IET Networks. 2022. Vol. 11, iss. 2. P. 43–57. DOI: 10.1049/ntw2.12033.
11. Кобак В.Г., Рязанов А.А. Сравнение различных кроссоверов при решении задачи коммивояжера генетическим алгоритмом с путевым представлением // Молодой исследователь Дона. 2023. Т. 8, № 2 (41). С. 33–40. URL: https://mid-journal.ru/upload/mid/iblock/f18/7_1685-ryazanov_33_40.pdf (дата обращения: 02.02.2026г.).
12. Закирьянов Р.М. Применение метаэвристических алгоритмов для оптимизации структуры промышленной системы управления // VI Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2025): сб. докл. конф. (26–28 сент. 2025 г.). Санкт-Петербург. 2025. С. 35–37.
13. Organic Memristor-Based Flexible Neural Networks with Bio-Realistic Synaptic Plasticity for Complex Combinatorial Optimization / Hyeonwook Kim, Miseong Kim, Aejin Lee et al. // Advanced Science. 2023. Vol. 10, iss. 19. 2300659. DOI: 10.1002/adv.202300659.
14. Combinatorial optimization approach for the efficient reuse of RC components / Jannis Rose, Patrick Forman, David Stieler et al. // Structural Concrete. 2025. Vol. 26, iss. 6. P. 7180–7203. DOI: 10.1002/suco.70126.
15. Полупанова Е.Е., Рыбалко А.А. Алгоритм последовательной гибридизации для решения задачи коммивояжера // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 3 (233). С. 108–118. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-3-108-118.
16. Решение обратной задачи спектральной теории графов при отсутствии наблюдаемых переменных / Целых А.Н., Васильев В.С., Целых Л.А., Барковский С.А. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 4 (246). С. 163–173. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-4-163-173.
17. Ising Hamiltonians for Constrained Combinatorial Optimization Problems and the Metropolis-Hastings Warm-Starting Algorithm / Hui-Min Li, Jin-Min Liang, Zhi-Xi Wang, Shao-Ming Fei // Advanced Quantum Technologies. 2023. Vol. 6, iss. 9. 2300101. DOI: 10.48550/arXiv.2307.08980.

© Тырышкин Сергей Юрьевич (Service.vip-spe@yandex.ru); Шарлаев Евгений Владимирович (sharlaev@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»