

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКОЛЕНИЙ НОВОЙ ТЕХНИКИ

С.А. Баркалов, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

П.Н. Курочка, kpn55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5129-246X>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Цель исследования. Отмечается, что приоритетным направлением развития экономики является инновационное направление, а это предполагает организацию работ по формированию поколений новой техники. Данное обстоятельство вызвано рядом факторов. Показано, что в ходе решения этих задач наиболее перспективными являются способы многокритериального описания проблемы. Отсюда возникает необходимость осуществления редукции методов многокритериальной оптимизации применительно к задачам формирования новых поколений техники. Отмечается сложность процесса разработки инновационных решений, обеспечивающих учет технологических, экономических и экологических факторов. Приведена формальная постановка задачи выбора технологий, обеспечивающей максимизацию выручки в рамках выделенного бюджета при минимальном количестве отбираемых решений. **Материалы и методы.** Рассмотрены методы решения многокритериальных задач, включая классические метод ветвей и границ, динамическое программирование, жадные и эвристические алгоритмы, анализ иерархий, метод уступок, эволюционные алгоритмы и метод Парето. Особое внимание уделено формированию Парето-оптимального множества, позволяющего сократить число альтернатив за счет исключения неэффективных решений. Демонстрируется, как дискретизация интервала затрат и решение серии задач целочисленного программирования генерируют точки на кривой Парето. **Результаты.** Практическая значимость исследования объясняется потребностями в ходе управления строительными проектами, где оптимизация сокращает издержки, и антимонопольного регулирования через анализ графов рыночных взаимодействий. В последнее время отмечается широкое распространение PLM-систем, искусственного интеллекта в повышении эффективности подобных разработок. Не должна при этом оставаться в стороне и проблема создания экологически чистых технологий. **Заключение.** Подчеркивается необходимость интеграции математических моделей с современными инструментами управления для минимизации субъективности в принятии решений. Перспективным направлением названо применение многокритериальных моделей, методов машинного обучения и адаптация подходов к немарковским процессам. Показано, каким образом возможен переход от многокритериальной задачи к последовательности задач традиционной оптимизации. Подчеркивается, что в этом случае строится Парето-оптимальное множество решений рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, Парето-оптимальность, управление жизненным циклом, целочисленное программирование, инновационные технологии

Для цитирования: Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Многокритериальная задача формирования поколений новой техники // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 107–119. DOI: 10.14529/ctcr250210

MULTICRITERIA TASK OF FORMING GENERATIONS OF NEW TECHNOLOGY

S.A. Barkalov, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

P.N. Kurochka, kpn55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>

E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5129-246X>

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The purpose of the study. It is noted that the priority direction of economic development is innovation, and this implies the organization of work on the formation of generations of new technology. This circumstance is caused by a number of factors. It is shown that in the course of solving these problems, the most promising methods are the multi-criteria description of the problem. Hence, there is a need to reduce the methods of multi-criteria optimization in relation to the tasks formation of new generations of technology. The complexity of the process of developing innovative solutions that ensure accounting is noted technological, economic and environmental factors. A formal statement of the problem of choosing technologies that maximize revenue within the allocated budget with a minimum number of selected solutions is given. **Materials and methods.** Methods for solving multi-criteria problems are considered, including the classical method of branches and boundaries, dynamic programming, greedy and heuristic algorithms, hierarchy analysis, the assignment method, evolutionary algorithms and the Pareto method. Special attention is paid to the formation of a Pareto-optimal set, which makes it possible to reduce the number of alternatives by eliminating inefficient solutions. It demonstrates how discretization of the cost interval and solving a series of integer programming problems generate points on the Pareto curve. **Results.** The practical significance of the research is explained by the needs in the course of construction project management, where optimization reduces costs, and antimonopoly regulation through the analysis of graphs of market interactions. Recently, there has been widespread use of PLM systems and artificial intelligence in improving the efficiency of such developments. At the same time, the problem of creating environmentally friendly technologies should not be left out. **Conclusion.** The need to integrate mathematical models with modern management tools is emphasized in order to minimize subjectivity in decision-making. The use of multi-criteria models, machine learning methods, and adaptation of approaches to non-Markov processes is considered a promising area. It is shown how the transition from a multi-criteria task to a sequence of traditional optimization tasks is possible. It is emphasized that in this case, a Pareto-optimal set of solutions to the problem under consideration is constructed.

Keywords: multicriteria optimization, Pareto optimality, life cycle management, integer programming, innovative technologies

For citation: Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Multicriteria task of forming generations of new technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):107–119. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250210

Введение

Процесс развития новой техники является одним из приоритетных направлений развития компании. Именно поэтому создание поколений новой техники предопределяет достижение определенного прогресса в области конструктивных и технологических решений, на базе которых и осуществляется разработка. Применение новых решений в конструктивной и технологической сфере предполагает получение образцов новой техники, обладающих новыми функциональными свойствами. Таким образом, создание новых функциональных свойств у разрабатываемого объекта предполагает применение новых конструктивно-технологических решений [1, 2].

Формирование поколений новой техники – это процесс разработки и внедрения инновационных технологий, продуктов и систем, которые представляют собой значительный шаг вперед по сравнению с существующими решениями. Этот процесс включает в себя исследования, проектирование, разработку, тестирование и внедрение новых технологий в различных отраслях, таких как производство, энергетика, транспорт, связь и т. д.

Необходимость формирования поколений новой техники обусловлена рядом факторов [3, 4]:

Технологическое развитие. С развитием науки и техники появляются новые возможности для создания более эффективных и инновационных решений, на основе которых возможна разработка образцов новой техники, позволяющих повысить производительность труда и уровень жизни людей.

Конкурентоспособность. В современных экономических условиях функционирование любого предприятия предполагает сохранение и дальнейшее расширение собственного сектора рынка продукции и услуг, а также выход на новые направления производственной деятельности. Именно этот фактор позволяет предприятию уцелеть в жестокой конкурентной борьбе. Результатом такой борьбы является появление новых инновационных решений, что позволяет в более полной мере удовлетворять потребности контрагентов и, как результат, способствует увеличению объемов выручки. Успешное внедрение инновационных разработок предполагает использование концепции формирования поколений новой техники.

Экономический рост. Процесс генерирования поколений новой техники в конечном итоге приводит к ускоренному экономическому развитию, сопровождающемуся появлением новых рабочих мест. Это является триггером для дальнейшего инвестирования с целью мотивации процессов инновационного развития, что в принципе может способствовать росту экономического потенциала страны в целом.

Экономия ресурсов. Процедура построения модельного ряда поколений новой техники может выявить в ходе анализа тупиковые или неперспективные направления развития технической политики предприятия. Естественно, это способствует сокращению затрат на развитие неэффективных или невостребованных на рынке инновационных решений, что позволяет сконцентрировать ресурсы предприятия на наиболее значимых направлениях технического развития. Таким образом, процесс формирования поколений новой техники может рассматриваться как один из способов оптимизации использования ресурсов.

Повышение качества продукции. Технология формирования массива перспективной техники позволяет осуществить более тщательное исследование надежности отбираемых вариантов за счет сокращения их численности, что благоприятствует производству более качественной и конкурентоспособной продукции.

Сокращение времени разработки. Методика построения кластера нового образца техники позволяет на основе метода аналогий существенно сэкономить время на разработку и подготовку к производству нового вида продукции за счет того, что отдельные этапы реализации будут повторяться.

Удовлетворение потребностей рынка. Используя опыт эксплуатации более ранних образцов изделия, получили возможность в более полной мере учесть пожелания покупателей, что позволит предприятию увеличить объем своей выручки.

Снижение рисков. Технология создания модельного ряда образцов новой техники позволяет уменьшить угрозу возникновения деструктивных последствий от принимаемого решения за счет возможности более тщательного анализа вариантов принимаемого управленческого решения.

Рассматриваемая технология построения ряда вариантов инновационного развития позволяет не только воплотить в повседневную технологическую практику предприятия перечисленные выше локальные компоненты, определяющие позитивный вектор развития компании, но и осуществить некоторое количество стратегически важных факторов, таких как [5, 6]:

– **улучшение качества жизни.** Инновационные решения, применяемые при создании новых видов продукции, способствуют повышению качества жизни населения за счет предоставления им более эффективных технологических решений в социально-экономических областях, например, образование, транспорт, здравоохранение, торговля;

– **вклад в решение глобальных проблем.** Деятельность любого, даже самого малого предприятия не осуществляется изолированно, а происходит в рамках глобальной системы, для которой свойственны масштабные проблемы, которые можно решить только при совместном подходе. В качестве примера таких проблем можно рассмотреть охрану окружающей среды, энергетический кризис, дефицит пресной воды и т. п. Безусловно, подход к решению этих проблем лежит только в сфере инновационного развития предприятий, опирающихся на концепцию формирования поколения новой техники [7, 8].

Следовательно, технология генерации множества перспективных поколений новой техники представляет собой ключевой элемент развития общества, экономического роста и научно-технического прогресса [6, 8]. Данный механизм стимулирует создание прорывных решений, способствующих улучшению условий жизни населения, укреплению позиций компаний на рынке и преодолению масштабных мировых вызовов.

Разработка инновационных образцов техники нуждается в достаточно серьезном ресурсном обеспечении, требующем значительных инвестиций: материальных, человеческих, интеллектуальных и финансовых. Данное обстоятельство объясняет эволюционный характер распространения новых технологий – перспективные концепции со временем воплощаются в новых модификациях, расширяя линейку продуктов [8, 9].

В этом контексте ключевым элементом становится прототип – функциональная модель будущего изделия, позволяющая имитировать его работу ещё до запуска в серийное производство [5, 10, 11].

Использование прототипов на этапе НИОКР критически важно: они помогают выявить и скорректировать конструктивные недочёты на стадии проектирования. Среди современных методов их создания выделяют быструю разработку, аддитивное производство (3D-печать) и цифровое моделирование [6, 12]. Эти технологии минимизируют сроки разработки, снижают расходы и повышают качество итогового продукта за счёт оптимизации проектных решений.

Ключевым условием при создании современных технических решений выступает объединение знаний из различных инженерных областей: механики, электротехники, программной инженерии и системного проектирования. Для эффективной совместной работы специалистов из этих сфер необходимы интегрированные системы управления жизненным циклом продукции (PLM) и слаженное взаимодействие между командами и подразделениями.

В процессе разработки особый акцент делается на достижение высоких показателей качества и долговечности изделий. Этого добиваются за счёт многоуровневой системы проверок, охватывающей лабораторные тесты, имитацию рабочих условий и испытания в реальной среде. В рамках этих процессов применяются стандартизированные методы, такие как FMEA (прогнозирование и предотвращение потенциальных дефектов), а также тестирование HIL (аппаратно-программное моделирование) и SIL (проверка алгоритмов в виртуальной среде) [10, 13, 14].

Ориентиром в этом процессе служит соответствие общепринятым международным и национальным стандартам типа ISO, IEC и ГОСТ, что дает возможность гарантировать безаварийное функционирование создаваемых изделий и предусмотреть их сопряженность с уже существующими техническими образцами.

При этом в ходе работы появляются решения, требующие защиты авторских прав, которая достигается за счет механизмов патентования, позволяющих законодательно закрепить свое авторство, что позволяет рассчитывать на повышение конкурентоспособности компании. Это обстоятельство вынуждает предприятия на стадии предварительной разработки инновационной идеи проводить тщательный патентный поиск, что дает возможность снизить риск штрафных санкций за нарушение авторских прав третьих лиц.

Следовательно, организация работ по созданию новых образцов техники представляет собой достаточно сложную и многоплановую проблему, требующую привлечения значительного количества ресурсов как материальных, так и интеллектуальных. Это позволяет выводить на рынок инновационную продукцию, отвечающую самым продвинутым требованиям потребителей.

В процессе разработки образцов новой техники основной проблемой является выбор материально-технологической составляющей проекта, то есть какие материалы и технологии будут использованы. От этого зависят свойства нового изделия и технологичность его производства, то есть насколько быстро можно построить новый технологический процесс, причем желательно, чтобы он не сильно отличался от уже используемых в компании.

Единых рекомендаций и алгоритмов для решения подобной задачи не существует: многое опирается на здравый смысл и предыдущий производственный опыт лица, принимающего решения.

Но в ходе реализации инновационного проекта приходится принимать не только технические, но также и управленческие решения, направленные на грамотную организацию работ по реализации задуманного. И эта деятельность должна документально оформить все этапы существования разрабатываемого образца. Это приводит к пониманию жизненного цикла продукции,

охватывающего все этапы работ начиная от проектирования до вывода из эксплуатации и последующей утилизации.

Современные требования к процессам проектирования и производства настоятельно рекомендуют применение автоматизированных систем на базе достижений искусственного интеллекта, использующего процессы обработки больших объемов данных. Такие подходы позволяют осуществлять непрерывное сканирование происходящих процессов в реальном режиме времени, что обеспечивает устойчивость управляемыми процессами.

Сложная ситуация с урбанизацией окружающей среды требует соответствующего внимания еще на стадии проектирования инноваций. Компании стремятся минимизировать воздействие своей продукции на окружающую среду через применение экологически чистых материалов, технологий энергосбережения и утилизации отходов. В этом контексте важны исследования и разработки в области возобновляемых источников энергии, электромобилей и других экологически чистых технологий.

Таким образом, разработка новой техники требует комплексного подхода, включающего переносимые методы проектирования, современные материалы и технологии производства, эффективное управление жизненным циклом продукции и учет экологических аспектов. Интеграция этих элементов позволяет создавать высокотехнологичные и конкурентоспособные изделия, отвечающие современным требованиям рынка и нормативным стандартам.

1. Математическая постановка задачи

Вполне понятно, что всякий проект реализуется в рамках определенного бюджета, и, как правило, финансовых ресурсов не хватает, поэтому возникает задача достижения максимальной отдачи от проводимых мероприятий. То есть возникает задача получения максимальной выручки от вложенных средств.

Для формализованной постановки задачи введем двоичную переменную x_i , принимающую значение, равное 1, в том случае, когда i -я технология отобрана для воспроизводства, и 0 – в противном случае; доход, получаемый от реализации i -й технологии, обозначим через b_i , а затраты на ее внедрение – C_i . Для того чтобы не получить при решении тривиальный результат – ничего не выбирать, то есть нулевое решение, – задачу необходимо дополнить ограничением на число отбираемых технологий. Обозначим наименьшее число отбираемых технологий через y_j . Тогда в этом случае формальная постановка задачи о максимизации выручки от внедрения новых технологий может быть записана в следующей форме [1, 15]:

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \leq R. \quad (3)$$

Итак, у нас есть задача максимизации выручки от внедрения новых технологий, сформулированная с использованием двоичных переменных. Нам нужно выбрать, какие технологии внедрять, чтобы максимизировать суммарный доход, учитывая ограничения на минимальное количество технологий и бюджет.

Сначала посмотрим на целевую функцию (1). Это сумма произведений b_i на x_i , то есть суммарный доход от выбранных технологий. Нам нужно максимизировать эту сумму. Ограничение (2) говорит, что сумма x_i должна быть не меньше y_j для каждого j от 1 до M . Но тут, возможно, опечатка, потому что y_j обычно обозначают как минимальное количество технологий, а M – количество ограничений. Может быть, имелось в виду, что сумма $x_i \geq y_{\min}$, где $y_{\min}$ – минимальное количество технологий, которые нужно выбрать. Тогда, возможно, здесь ошибка в индексах.

Ограничение (3) – суммарные затраты на выбранные технологии не должны превышать бюджет R . То есть сумма $C_i x_i \leq R$.

2. Методы решения

Полученная задача относится к классу задач целочисленного программирования с двоичными переменными. Поскольку переменные x_i могут быть только 0 или 1, это задача бинарной оптимизации.

Методы решения таких задач включают [2, 15]:

1) **метод ветвей и границ** – классический подход для задач целочисленного программирования. Он систематически перебирает возможные значения переменных, отсекая неперспективные ветви на основе оценок;

2) **жадные алгоритмы** – можно попробовать сортировать технологии по соотношению доход/затраты и выбирать лучшие, пока не достигнем ограничений. Но это может не дать оптимального решения;

3) **динамическое программирование** – если бюджет R не слишком большой, можно использовать метод динамического программирования для задач рюкзака. Здесь задача похожа на задачу о рюкзаке, где нужно выбрать предметы (технологии) с максимальной суммарной ценностью (доходом), не превышая вместимость рюкзака (бюджет R), и с учетом минимального количества предметов;

4) **эвристические методы** – генетические алгоритмы, имитация отжига и т. д., особенно если задача большого масштаба.

Проверим, какие ограничения у нас есть. Ограничение на минимальное количество технологий (сумма $x_i \geq y_{\min}$) и ограничение на бюджет. Значит, задача имеет два ограничения: суммарные затраты меньше или равны размеру выделенных средств и количество выбранных технологий должно равняться или превышать некоторое наперед заданное число $y_{\min}$.

Для формального решения лучше всего подойдет метод ветвей и границ, так как он дает точное решение. Однако при больших N это может быть вычислительно сложно.

Также можно рассмотреть задачу как модификацию задачи о рюкзаке с дополнительным ограничением на минимальное количество предметов. В классической задаче о рюкзаке мы максимизируем ценность при ограничении на вес. Здесь добавляется еще одно ограничение на минимальное количество. Такие задачи могут решаться модификациями динамического программирования или ветвей и границ.

Итак, формулировка задачи:

максимизировать

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max$$

при условиях:

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \leq R,$$

$$x_i \in \{0, 1\}.$$

Для решения такой задачи можно использовать следующие шаги:

1) проверка выполнимости: убедиться, что существует хотя бы $y_{\min}$ технологий, сумма затрат на которые не превышает R . Если нет, задача не имеет решения;

2) сокращение пространства поиска: отфильтровать технологии, которые слишком дорогие ($C_i > R$), так как их нельзя выбрать;

3) применение алгоритма ветвей и границ: построить дерево решений, на каждом шаге фиксируя значение x_i (0 или 1) и вычисляя верхние оценки для оставшихся переменных, чтобы отсеять неперспективные ветви;

4) использование релаксации: решить задачу без ограничения целочисленности (допуская $0 \leq x_i \leq 1$), а затем округлить решение, но это не гарантирует оптимальность.

5) применение динамического программирования: построить таблицу, содержащую величину максимального дохода при выборе k технологий, затратах s и m выбранных технологий. Однако это может быть сложно из-за трехмерной таблицы.

Учитывая, что ограничение на минимальное количество технологий может быть учтено добавлением его в условия, вероятно, наиболее подходящим методом будет метод ветвей и границ с учетом обоих ограничений.

Также можно попробовать преобразовать задачу, введя штраф за невыполнение минимального количества, но это уже эвристический подход.

В итоге, рекомендуем использовать метод ветвей и границ или специализированные оптимизационные пакеты. Если же речь идет о ручном решении для небольшого числа переменных, можно перебрать все возможные комбинации, удовлетворяющие ограничениям, и выбрать наилучшую.

Для решения задачи максимизации выручки от внедрения технологий с учетом ограничений на бюджет и минимальное количество технологий используется **метод ветвей и границ**. Эта задача относится к классу задач бинарного целочисленного программирования. Формальная постановка:

целевая функция

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \leq R,$$

$$x_i \in \{0, 1\}.$$

Алгоритм решения:

1. Проверка выполнимости:

- убедиться, что существует комбинация из хотя бы $y_{\min}$ технологий, суммарные затраты на которые не превышают R . Если нет – задача не имеет решения.

2. Фильтрация технологий:

- исключить технологии с $C_i > R$, так как их внедрение невозможно.

3. Метод ветвей и границ:

- построение дерева решений, где каждый узел соответствует выбору $x_i = 0$ или $x_i = 1$;
- на каждом шаге вычисляется верхняя оценка возможной выручки (например, через релаксацию задачи без целочисленности);

- ветви, где оценка ниже текущего лучшего решения, отсекаются.

4. Динамическое программирование (альтернатива):

- для небольших R и $y_{\min}$ можно использовать модификацию задачи о рюкзаке, учитывающую ограничение на минимальное количество:

$dp_{m,c}$ = максимальный доход при выборе m технологий и затратах.

Обновление таблицы происходит по правилу

$$dp_{m+1,c+C_i} = \max(dp_{m+1,c+C_i}, dp_{m,c} + b_i).$$

1. Интерпретация

Формула обновляет состояние $dp_{m+1,c+C_i}$ (для $m+1$ элементов и ограничения $c+C_i$) следующим образом:

- берётся максимум между текущим значением $dp_{m+1,c+C_i}$ и новым вариантом: $dp_{m,c} + b_i$;
- (предыдущее состояние $dp_{m,c}$ плюс ценность b_i текущего элемента).

2. Контекст задачи

Это типичный шаг для задач, где требуется выбрать подмножество элементов с ограничением на суммарный «вес» (C_i) и максимизацией суммарной «ценности» (b_i). Примеры:

- классическая задача о рюкзаке;
- оптимизация бюджета (например, выбор проектов с ограничением на затраты).

3. Нотация

- Индексы m и c обозначают размер подзадачи;
- C_i и b_i – параметры i -го элемента;
- $\max$ – выбор оптимального значения.

Пример для задачи о рюкзаке:

- **Дано:** рюкзак вместимостью W , элементы с весами C_i и ценностями b_i .

- **Цель:** найти подмножество элементов с суммарным весом $\leq W$, максимизирующее суммарную ценность.

• Рекуррентное соотношение:

$$dp_{i,w} = \max(dp_{i-1,w}, dp_{i-1,w-C_i} + b_i).$$

Здесь i – номер элемента; w – текущая вместимость.

- Если в формуле используется $m+1$, это может означать, что элементы нумеруются с 0, а m – текущий элемент.

• В программировании такие формулы реализуются через двумерные массивы или оптимизированные структуры данных.

Оптимальное решение достигается методом ветвей и границ. Для небольших задач подходит полный перебор или динамическое программирование [3, 16].

Итог:

Оптимальное решение достигается методом ветвей и границ или с использованием специализированного программного обеспечения. Для небольших задач подходит полный перебор или динамическое программирование.

Возможно применение и эвристических алгоритмов, позволяющих получать решение если и не точно оптимальные, то, по крайней мере, близкие к оптимальным.

Для этого необходимо по исходным данным вычислить эффективность реализации каждого из возможных вариантов [16]:

$$\Xi_i = \frac{b_i}{c_i}.$$

Варианты отбираются по мере возрастания параметра эффективности Ξ_i , при этом необходимо вести подсчет отобранных инноваций, так как конкретное изделие может реализовывать и несколько технологий. Набрав требуемое количество технологий m , необходимо проверить, укладывается ли это решение в ограничения по бюджету, если да, то решение получено, если же нет, то необходимо продолжить.

Для решения задач подобного типа возможно применение метода сетевого программирования. Основой для этого является следующее утверждение:

Утверждение 1. Исходный граф задачи формирования поколений новой техники может быть представлен в дихотомическом виде.

Использование постановок задач с учетом многокритериальности позволяет существенно улучшить адекватность используемых моделей, приблизив их к реальной производственной действительности, так как принимаемые организационно-технологические решения описываются целым пулом критериев, из которых достаточно трудно выделить самый существенный. Как правило, хотелось бы количественно оценить влияние каждого из них. Это и служит практической основой для применения задач многокритериальной оптимизации.

Но здесь надо иметь в виду, что в результате решения таких задач получается решение, которое будет иметь практическую ценность только на данном конкретном этапе производственной деятельности, то есть для сложившейся ситуации в конкретный промежуток времени и для конкретного лица, принимающего решения.

Применение задач многокритериальной оптимизации позволяет повысить **точность и обоснованность принимаемых управленческих решений**. Поскольку подобный подход рассматривает изучаемое явление с нескольких сторон, это позволяет увидеть связи и закономерности, скрытые при традиционном подходе средствами математического программирования. Это дает возможность построить на предприятии логичный и эффективный процесс принятия управленческих решений, исключающий волюнтаризм и субъективизм: принимаемые решения имеют твердое обоснование, дающие основу для прозрачности, что повышает их деловую ценность.

Все это является основой для установления конструктивных и долгосрочных связей с контрагентами предприятия и служит базой для формирования компромиссов при решении спорных вопросов.

3. Многокритериальная задача оптимизации

Рассмотренный выше алгоритм решения задачи о максимизации выручки в рамках заданного бюджета может быть положен в основу решения многокритериальной задачи оптимизации. По своему содержанию рассматриваемая задача может быть распространена на класс многокритериальных задач оптимизации, когда необходимо максимизировать выручку, получаемую от внедрения новых технологий и при этом минимизировать бюджет. Используя особенности постановки задачи, ее решение можно свести к последовательному решению серии задач, аналогичных рассмотренной выше.

В этом случае приходим к следующей формальной постановке многокритериальной задачи оптимизации:

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \rightarrow \min, \quad (5)$$

где бюджет проекта R изменяется в пределах $R^{\min} \leq R \leq R^{\max}$, при этом $R^{\min}$ и $R^{\max}$ – нижнее и верхнее ограничения на размер бюджетных средств.

Кроме того, должны выполняться ограничения на количество отбираемых технологий

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Решение многокритериальной задачи оптимизации – это процесс поиска решения, удовлетворяющего параллельно нескольким критериям сразу. В отличие от однокритериальных задач, где цель состоит в максимизации или минимизации одного параметра, многокритериальные задачи требуют учёта нескольких параметров одновременно.

Кратко остановимся на обзоре фундаментальных методов решения многокритериальных задач [1, 2, 4]:

Метод анализа иерархий. По исходным данным строится иерархическая структура задачи, основанная на критериях оценки для каждой альтернативы. При этом формируется вес каждого критерия, характеризующий его важность в рамках решаемой задачи. Это дает возможность выбрать наилучшее решение из всех возможных.

Метод главного критерия. Один из критериев, наиболее значимый с точки зрения исследователя, выбирается в качестве главного (основного), а все остальные критерии принимаются в виде ограничений. Таким образом, задача сводится к традиционной задаче условной оптимизации. В качестве решения принимается значение определяющего критерия, доставляющего экстремум единственной целевой функции при выполнении остальных требований, задаваемых в форме ограничений.

Метод уступок. Выстраивают ранжированный по важности ряд исходных критериев задачи. Решение разбивается на последовательность шагов, на каждом из которых допускается ухудшение значений текущего с целью улучшения значений других критериев. Критерием остановки итераций является получение приемлемых вариантов решения.

Метод Парето. Метод заключается в том, что требуется найти Парето-оптимальное множество возможных решений. Основной характеристикой элементов такого множества является невозможность улучшения решения по одному из критериев, не ухудшив его по другим критериям. Нахождение такого множества сильно сокращает число потенциально пригодных решений, что дает возможность лицу, принимающему решение, выбрать наиболее эффективный вариант для сложившихся условий.

Методы эволюционного поиска. Основаны на использовании генетических алгоритмов.

Методы программирования. Традиционные методы, в основе которых лежат достижения математического программирования.

Интерактивные методы. В этом случае предполагается участие человека в процедуре формирования решения рассматриваемой задачи. Участие человека заключается в задании приоритетов, определении последовательности критериев, характеризующих изучаемую предметную область и выборе окончательного решения задачи.

Вопрос о выборе конкретного метода будет зависеть от специфики решаемой задачи, набора используемых данных и точности решения, которую необходимо обеспечить.

Естественно, наиболее часто при решении многокритериальных задач оптимизации исследователь сталкивается с необходимостью получения Парето-оптимального множества решений. Для этой цели возможно использование следующего алгоритма.

1. Задаться набором критериев, которые будут определять эффективность функционирования изучаемой социально-экономической системы.

2. Изучить поведение исследуемой системы с целью получения сведений о значениях отобранных критериев эффективности, то есть собрать статистику.

3. На основе собранных данных построить график или диаграмму. Возможно, если критериев много, то придется построить несколько графиков.

4. На этом графике или графиках необходимо найти точки, входящие в Парето-оптимальное множество решений. Для этой цели используют свойства Парето-оптимального множества: ни один параметр не может быть улучшен без ухудшения значений других.

5. Из полученного множества Парето-оптимальных решений лицо, принимающее решение, выбирает то, которое, на его взгляд, будет наиболее целесообразным в сложившихся условиях.

Следует отметить, что, несмотря на простоту изложения алгоритма, задача нахождения Парето-оптимального множества решений является достаточно сложной и трудоемкой, но позволяет найти приемлемое, в конкретных условиях производственной действительности, решение [5, 7, 17].

В целях решения данной задачи может быть использовано следующее утверждение 2:

Утверждение 2. Итоговая таблица метода дихотомического программирования содержит множество Парето-оптимальных решений исходной задачи.

Полученная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации, основным методом решения которых являются методы, связанные с получением интегральной оценки, а затем приведение исходной задачи к одной из стандартных задач математического программирования.

Но получение комплексной оценки всегда сопряжено с большой степенью субъективности в построении редукции исходной задачи к задаче традиционного математического программирования.

Поэтому для лица, принимающего решения, предпочтительнее было бы получение некоторого достаточно ограниченного набора возможных конкурентоспособных решений, из которых затем и можно будет выбирать единственное решение, руководствуясь конкретной ситуацией. В данном случае речь идет о получении множества решений, оптимальных по Парето.

Рассматриваемая задача позволяет получить множество Парето с помощью достаточно простого алгоритма.

Очевидно, что минимальные затраты будут соответствовать случаю, когда на всех объектах работы выполняются по самому дешевому варианту. Понятно, что этому варианту будет соответствовать и максимальное значение продолжительности, то есть мы получили точку с координатами $(S_{\min}; T_{\max})$.

В том случае, если допустить, что все рассматриваемые объекты будут содержаться по самому дорогому варианту, это будет соответствовать и минимальному значению продолжительности, то есть в данном случае будет найдена точка с координатами $(S_{\max}; T_{\min})$.

Это дает возможность найти координаты идеальной точки $(S_{\min}; T_{\min})$ и «антиидеальной» $(S_{\max}; T_{\max})$. В этом случае для нахождения множества Парето-оптимальных решений необходимо решить серию задач целочисленного программирования вида:

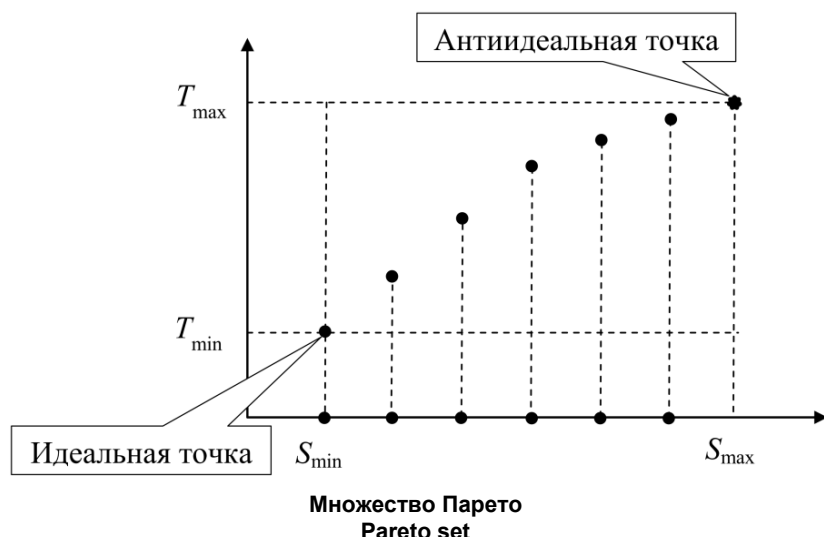
$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tau_{ij} x_{ij} &\rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} x_{ij} &\leq R_k, k \in [S_{\min}; S_{\max}], \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, i = \overline{1, n}.\end{aligned}$$

Осуществляя дискретизацию интервала $[S_{\min}; S_{\max}]$ с приемлемой для исходной задачи точностью, получаем серию задач. Решение каждой такой задачи дает одну точку множества Парето (см. рисунок).

Имея ограниченное множество решений, лицо, принимающее решение, ориентируясь на конкретную ситуацию, может принять обоснованное решение, выбрав из паретовского множества то, которое будет отвечать сложившимся внешним условиям.

Естественно, возникает вопрос о получении единственного решения. Это возможно на основе одного из принципов оптимальности, при этом необходимо задаться значимостью каждого критерия. Как известно, значимость критерия определяется весовым коэффициентом, определяемым экспертным путем.

Поэтому на этом этапе в решение задачи вносится существенный элемент субъективизма. Рассмотрим применение различных принципов оптимальности при условии равнозначности используемых критериев, то есть будем считать, что в рассматриваемых условиях параметры затрат и долговечности по значимости равны.



Наиболее наглядными являются принципы идеальной и «антиидеальной» точек. Идея этих принципов достаточно очевидна: находится наилучшая (наихудшая) точка, которая соответствует экстремальным значениям исследуемых критериев, в нашем случае это затраты и продолжительность, а затем вычисляются расстояния от каждой точки паретовского множества до идеальной или «антиидеальной» точек.

Оптимальным считается то решение, которое имеет минимальное (а в случае «антиидеальной» точки максимальное) расстояние.

Заключение

Рассмотрена задача максимизации выручки от внедрения новых технологий и многокритериальная задача оптимизации при формировании поколений новой техники. Показана редукция многокритериальной задачи к последовательности классических задач однокритериальной оптимизации.

Список литературы

1. Баркалов С.А. Оптимизационные модели – инструмент системного моделирования: моногр. / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка, Л.Д. Маилян, Е.А. Серебрякова. М.: Кредо, 2023. 522 с.
2. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2001. 124 с.
3. Баркалов С.А. Ресурсное планирование проектного управления: моногр. / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка, Л.Д. Маилян, Е.А. Серебрякова. М.: Кредо, 2024. 530 с.
4. Медведев С.Н. Жадные и адаптивный алгоритмы решения задачи маршрутизации транспортных средств с несколькими центрами с чередованием объектов // Автоматика и телемеханика. 2023. № 3. С. 139–168. DOI: 10.31857/S0005231023030078
5. Баркалов С.А. Моделирование инновационного развития фирмы / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 49–64. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64
6. Фатхутдинов Р.А. Инновационный менеджмент. СПб.: Питер Пресс, 2008. 448 с.
7. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. М.: КомКнига, 2006. 332 с.
8. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 450 с.
9. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. М.: Радио и связь, 2003. 156 с.
10. Barkalov S., Burkov V., Kurochka P. Designing Systems of Group Stimulation in the Management of Energy Complex Objects // International Scientific Conference Energy Management of Municipal

Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 983. Springer, Cham, 2019. P. 55–68. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_6

11. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Курносое В.Б. Статистика. Воронеж: Воронежский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2010. 775 с.

12. Курочка П.Н., Сеферов Г.Г. Модель управления объемами незавершенного производства при произвольной связи между работами проекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 4. С. 178–182.

13. Белов М.В. Оптимальное управление жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 19–32. DOI: 10.25728/ru.2022.1.2

14. Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 37–40.

15. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for determining the term of execution of sub-conflicting works // 2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow, Russia, 2017. P. 8109598. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109598

16. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций: пер. с фр. М.: Мир, 1977. 432 с.

17. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход: пер. с англ. М.: Мир, 1978. 435 с.

References

1. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Optimizatsionnye modeli – instrument sistemnogo modelirovaniya: monografiya* [Optimization models – a tool for system modeling: monograph]. Moscow: Kredo; 2023. 522 p. (In Russ.)

2. Burkov V.N., Zalozhnev A.Yu., Novikov D.A. *Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnykh sistemami* [Graph theory in the management of organizational systems]. Moscow: Sinteg; 2001. 124 p. (In Russ.)

3. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Resursnoe planirovanie proektnogo upravleniya: monografiya* [Resource planning of project management: monograph]. Moscow: Kredo; 2024. 530 p. (In Russ.)

4. Medvedev S.N. Greedy and Adaptive Algorithms for Multi-Depot Vehicle Routing with Object Alternation. *Automation and Remote Control*. 2023;84(3):305–325. DOI: 10.1134/S0005117923030086

5. Barkalov S.A., Burkova I.V., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Modeling the innovative development of the firm. *Vestnik of Tver state technical university. Series “Technical science”*. 2023;2(18):49–64. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64

6. Fatkhutdinov R.A. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovative management]. St. Petersburg: Piter Press; 2008. 448 p. (In Russ.)

7. Novikov D.A., Ivashchenko A.A. *Modeli i metody organizatsionnogo upravleniya innovatsionnykh razvitiem firmy* [Models and methods of organizational management of the innovative development of the firm]. Moscow: KomKniga; 2006. 332 p. (In Russ.)

8. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures: monograph*. Moscow: Infa-M; 2020. 450 p. (In Russ.)

9. Burkov V.N., Burkova I.V. *Zadachi dikhotomicheskoy optimizatsii* [Problems of dichotomous optimization]. Moscow: Radio i svyaz'; 2003. 156 p. (In Russ.)

10. Barkalov S., Burkov V., Kurochka P. Designing Systems of Group Stimulation in the Management of Energy Complex Objects. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 983*. Springer, Cham; 2019. P. 55–68. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_6

11. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Kurnosov V.B. *Statistika* [Statistics]. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; 2010. 775 p. (In Russ.)

12. Kurochka P.N., Seferov G.G. Model of management in volumes of the work in progress at any communication between works of the project. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2011;7(4):178–182. (In Russ.)

13. Belov M.V. Optimal control of the life cycle of complex systems. *Control Sciences*. 2022;(1):15–26. DOI: 10.25728/cs.2022.1.2

14. Dranko O.I. A financial prediction model and home investment scenarios. *Control Sciences*. 2007;(1):37–40. (In Russ.)
15. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for determining the term of execution of sub-conflicting works. In: *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. Moscow, Russia; 2017. P. 8109598. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109598
16. Kaufmann A., Henry-Labordere A. *Methods and models of operations research*. Transl. from French. Moscow: Mir; 1977. 432 p. (In Russ.)
17. Christofides N. *Graph theory. Algorithmic approach*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1978. 435 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

Курочка Павел Николаевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; kpn55@rambler.ru.

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Information Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

Pavel N. Kurochka, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; kpn55@rambler.ru.

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024

The article was submitted 24.12.2024