Научная статья
УДК 65.012.1
DOI: 10.14529/ctcr230308

ВЫБОР БАЗОВЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.А. Баркалов[1], *bsa610@yandex.ru*
В.Н. Бурков[2], *vlab17@bk.ru*
П.Н. Курочка[1], *kpn55@rambler.ru*
Е.А. Серебрякова[1], *sea-parish@mail.ru*
[1] *Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*
[2] *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия*

Аннотация. **Цель исследования.** Процесс развития предприятия предполагает реализацию последовательности проектов, каждый из которых имеет свой жизненный цикл. Одной из главных задач менеджмента предприятия является обеспечение условий для того, чтобы каждый из проектов начал окупаться. Учитывая тот факт, что современные проекты, как правило, имеют достаточно длительный срок реализации, следует признать, что решение о реализации проекта в полном объеме будет, наверное, не самым оптимальны. Как правило, в этом случае предпочитают разбивать проект на стадии или, как это принято в промышленном строительстве, на очереди. **Материалы и методы.** Приведена формальная постановка задач, определяющих: минимальное число базовых представителей, минимизацию сроков подготовки производства новых видов техники и минимизацию времени производства базовых представителей новой техники. Для случаев небольшой размерности задачи предлагается точный алгоритм, основанный на полном переборе вариантов. Для случая задач большой размерности предлагается композиционный алгоритм, заключающийся в разбиении всего множества изделий на несколько подмножеств, к каждому из которых применяется точный алгоритм. **Результаты.** В основу рассмотренных алгоритмов положена пороговая схема решения оптимизационной задачи, когда вводится пороговое значение времени создания одного из изделий, которое будет совпадать с одной из компонент вектора, задающего нормативное время создания каждого из изделий. В этом случае также могут быть использоваться переборный и декомпозиционный алгоритмы. Отдельно рассмотрен случай решения данной задачи как задачи о частичном покрытии двудольного графа. Приведен алгоритм получения нижней оценки задачи на основе метода сетевого программирования. **Заключение.** Проведен анализ и разработана процедура выбора базовых изделий нового поколения техники, позволяющая в зависимости от условий, устанавливаемых лицом, принимающим решение (ЛПР), определить базовое изделие направления техники, наиболее полно соответствующее функциональным, конструктивным и технологическим признакам поколения техники.

Ключевые слова: жизненный цикл проекта, базовые представители направлений техники, переборный алгоритм, декомпозиционный алгоритм, задача о частичном покрытии двудольного графа, пороговая схема, правила остановки вычислений

Для цитирования: Выбор базовых представителей направления техники нового поколения / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 93–104. DOI: 10.14529/ctcr230308

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230308

SELECTION OF BASIC REPRESENTATIVES OF NEW GENERATION TECHNOLOGY

S.A. Barkalov[1], *bsa610@yandex.ru*
V.N. Burkov[2], *vlab17@bk.ru*
P.N. Kurochka[1], *kpn55@rambler.ru*
E.A. Serebryakova[1], *sea-parish@mail.ru*
[1] *Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*
[2] *V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. **The purpose of the study.** The process of enterprise development involves the implementation of a sequence of projects, each of which has its own life cycle. One of the main tasks of the company's management is to provide conditions for each of the projects to start paying off. Given the fact that modern projects, as a rule, have a fairly long implementation period, it should be recognized that the decision to implement the project in full will probably not be the most optimal. As a rule, in this case, they prefer to divide the project into stages or, as is customary in industrial construction, into queues. **Materials and methods.** The formal statement of the tasks defining: the minimum number of basic representatives, minimization of terms of preparation of production of new types of equipment and minimization of time of production of basic representatives of new equipment is given. For cases of small dimension of the problem, an exact algorithm based on a complete search of options is proposed. For the case of large-dimensional problems, a compositional algorithm is proposed, which consists in dividing the entire set of products into several subsets, to each of which an exact algorithm is applied. **Results.** The algorithms considered are based on a threshold scheme for solving an optimization problem, when a threshold value of the creation time of one of the products is introduced, which will coincide with one of the components of the vector that sets the standard creation time of each of the products. In this case, iterative and decomposition algorithms can also be used. The case of solving this problem as a problem of partial covering of a bipartite graph is considered separately. An algorithm for obtaining a lower estimate of the problem based on the network programming method is given. **Conclusion.** The analysis was carried out and the procedure for selecting the basic products of a new generation of equipment was developed, which allows, depending on the conditions set by the decision-maker (LPR), to determine the basic product of the technology direction that most fully corresponds to the functional, constructive and technological features of the generation of equipment.

Keywords: project life cycle, basic representatives of technical areas, enumeration algorithm, decomposition algorithm, bipartite graph partial covering problem, threshold scheme, calculation stop rules

For citation: Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Selection of basic representatives of new generation technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3): 93–104. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230308

Введение

Рассматривая деятельность предприятия в динамике, следует отметить, что это приводит к выводу о последовательности реализуемых проектов, что и составляет основную цель существования любого предприятия. Но каждый проект имеет свой жизненный цикл, а это означает, что потребляемые в ходе реализации проекта ресурсы используются неравномерно. То есть может возникнуть ситуация, когда пики потребления ресурсов по отдельным проектам могут совпасть и превысить возможности предприятия в данный момент. Таких ситуаций можно избежать за счет обоснованного расположения различных стадий проекта по времени, что позволяет «разнести» возникающие максимумы по временной оси и тем самым избежать возникающего дефицита ресурсов. То есть возникает проблема управления продолжительностью жизненных циклов выполняемых проектов.

С другой стороны, жизненный цикл проекта, как правило, достаточно продолжителен и выручка от проекта будет поступать нескоро, что, естественно, сказывается на его эффективности.

Именно поэтому для руководителя проекта является ключевой проблемой ускорение процесса получения дохода. То есть сделать так, чтобы проект как можно быстрее начал окупаться. А для этого прежде всего необходимо еще на стадии планирования выделить возможные этапы реализации проекта, каждый из которых может иметь свой самостоятельный коммерческий интерес. Как, например, это делается при строительстве промышленных предприятий [1–3]. Для этого используется понятие пускового комплекса, представляющего часть объекта, который может эксплуатироваться и давать продукцию нужной номенклатуры с требуемым качеством с соблюдением всех технических и экологических требований. А в это время происходит дальнейшая работа по строительству всего объекта.

Распространяя понятие пускового комплекса на все многообразие проектов, приходим к понятию базовых представителей направлений техники.

1. Математическая модель

Процесс реализации конкретного проекта будет заключаться в последовательности действий по реализации базовых представителей направлений техники. Каждое представление будет характеризоваться набором новых свойств, что делает возможным отнесение этого образца к новой технике. Последующее поколение будет дополнено какими-то новыми свойствами с сохранением уже приобретенных, но эти свойства будут не столько кардинальными, чтобы выделить конкретное поколение в новый проект. То есть происходит ступенчатая модернизация первоначального, базового, образца.

Таким образом, возникает задача разбиения проекта на стадии, которые можно выделить в качестве базовых представителей направления техники. Такое разделение проекта на стадии должно удовлетворять определенным требованиям.

1. Необходимо выбрать минимальное число базовых представителей: с одной стороны, это позволит обеспечить необходимую концентрацию ресурсов, а с другой – ускорит процесс окупаемости всего проекта за счет ускоренного выпуска новой продукции на рынок. Большое же количество базовых представителей может сильно затруднить подготовку производства к началу выпуска новой продукции.

2. На базовых представителях необходимо будет отработать процессы подготовки производства к выпуску последующих поколений инноваций.

3. Процесс подготовки производства базовых представителей должен быть минимальным и учитывать возможность последующей модернизации изделия, то есть выпуск нового базового представительства.

Приведем математическую формулировку поставленной задачи. Допустим, реализуемый проект состоит из N изделий, которые будем идентифицировать индексом j.

Для формального описания задачи введем двоичную переменную x_j. В том случае если j-е изделие включается в множество базовых представителей, то $x_j = 1$, а если нет – то $x_j = 0$.

Кроме того, каждое изделие характеризуется определенными свойствами, задающимися в виде M показателей, которые будем обозначать индексом i ($i = 1, 2, \ldots, M$). В том случае, когда изделие обладает данным свойством, значение показателя равно 1, а если нет – то 0.

Описание задачи должно учитывать требования 1–3, выдвигаемые к базовым представителям. Наиболее просто учитываются требования 1 и 3. Первое требование предполагает нахождение экстремума функции $F_1(x)$:

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^{N} x_j, \tag{1}$$

а третье требование предполагает решение следующей оптимизационной задачи

$$F_2(x) = \max_{j=1,\,N} \left\{ t_j x_j \right\}, \tag{2}$$

где A – булева матрица размером $M \times N$, составленная из элементов a_{ij}; $a_{ij} = 1$, если j-е изделие обладает i-м свойством, и $a_{ij} = 0$ – в противном случае; t_j – j-я компонента вектора T, определяющая время создания j-го изделия.

То есть получили многокритериальную задачу оптимизации, решение которой сводится к нахождению компромиссного решения в двух задачах минимизации [4, 5]. Но в такой постановке задача будет иметь тривиальное решение, а мы еще не учли второе ограничение. Учет этого ограничения приводит к задаче условной оптимизации, которая уже будет иметь решение.

Для этой цели зададим минимальное число $m \le M$ свойств, которыми должны обладать базовые представители направления техники. Формализовать ограничение данного вида можно путем введения булевой переменной y_i, которая будет равно 1 в том случае, когда требуется, чтобы базовый представитель обладал этим свойством, и 0 – в противном случае.

Это дает возможность дополнить задачу (1)–(2) ограничениями вида

$$\sum_{j=1}^{N} x_j a_{ij} \ge y_i, \; i = \overline{1, M}; \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{M} y_i = m. \tag{4}$$

Следовательно, поставленная задача сводится к решению двухкритериальной задачи условной оптимизации, целевые функции которой задаются соотношениями (1), (2), ограничения – выражениями (3) и (4).

Решение поставленной задачи может быть построено в виде последовательного решения двух задач оптимизации:

Задача 1. Минимизировать функцию $F_1(x)$ при ограничениях (3) и (4).

Задача 2. Минимизировать функцию $F_2(x)$ при ограничениях (3) и (4) и дополнительном ограничении

$$\sum_{j=1}^{n} x_j = f\left(x^0\right), \tag{5}$$

где x^0 – оптимальное решение первой задачи.

2. Алгоритмы решения первой задачи

Сложность решения сформулированных выше задач заключается в том, что они относятся к классу *NP*-полной [6, 7], а это означает, что построение точного алгоритма, имеющего полиномиальную трудоемкость, не представляется возможным. Доказательством этого факта может служить то, что в том случае если в первой задаче принять условие $m = M$, то мы переходим к известной задаче о покрытии множества [8, 9], для которой доказано утверждение о ее *NP*-полноте.

Для решения оптимизационной задачи (1), (3), (4) предлагается два алгоритма: первый алгоритм основан на процедуре прямого перебора, что, как известно, позволяет получить точное решение. Трудоемкость алгоритма, как и всех алгоритмов переборного типа [10–13], – степенная.

Второй алгоритм является декомпозиционным, использующим возможности первого алгоритма.

Рассмотрим особенности этих алгоритмов, при этом получаемое в результате применения алгоритма решение задачи обозначим, как выше уже указывалось, через x^0.

Основная идея переборного алгоритма заключается в том, чтобы из имеющейся последовательности изделий, составляющих направление техники нового поколения, перебрать все возможные варианты, образующие подмножества из исходного множества изделий. Это может быть выполнено при помощи процедуры $P(l, L)$, осуществляющей формирование подмножеств мощностью l из множества мощностью L.

Результатом работы данной процедуры будет являться подмножество, элементы которого расположены по возрастанию и представлены в нормальной форме. Возникает закономерный вопрос о том, как определить, что i-е подмножество мощностью l будет меньше подмножества $(i+1)$. В этом случае используется следующая процедура: два подмножества $(i_1^1, i_2^1, \ldots, i_l^1)$ и $(i_1^{11}, i_2^{11}, \ldots, i_l^{11})$ находятся в отношении $\ge$ в том случае, когда можно найти такое значение q_0 $(0 \le q_0 \le l)$, для которого будет выполняться соотношение $i_{q_0+1}^1 > i_{q_0+1}^{11}$.

Модуль $P(l, L)$ на каждой итерации осуществляет генерацию подмножеств, строя таким образом общее количество вариантов решения. Следовательно, данная процедура осуществляет построение очередного варианта сочетаний.

Таким образом, выстраивается следующий алгоритм формирования возможного варианта решения поставленной задачи.

Шаг 0. Находим количество индексов i, для которых выполняется условие

$$\sum_{j=1}^{N} a(i, j) \geq 1. \tag{6}$$

Если обозначить это число через m', то возможны следующие варианты:

$m' < m$ – тогда процесс вычислений прекращается, так как в этом случае рассматриваемая задача не будет иметь решения;

$m' \geq m$ – в этом случае процесс решения продолжается.

Шаг 1. Принимаем новое значение для переменой n: $n = N + 1$.

Шаг 2. Устанавливаются новые параметры для модуля $P(m, M)$.

Шаг 3. Выполняется следующая итерация по созданию очередного варианта решения рассматриваемой задачи. В данном случае возможны два варианта:

– создается очередное подмножество возможного решения; в этом случае осуществляется переход к следующему шагу алгоритма;

– очередное подмножество не может быть создано, так как все комбинации уже рассмотрены; в этом случае осуществляется переход к шагу 8.

Шаг 4. Проверяем выполнение условия $n \geq 1$:

– если оно выполняется, то устанавливаем новое значение $n = n - 1$ и выполняем переход к следующему шагу;

– если условие $n \geq 1$ не выполняется, то происходит переход к шагу 8.

Шаг 5. Рассматривается следующий вариант генерации подмножеств, когда модуль выполняется со следующими параметрами $P(n, N)$.

Шаг 6. Выполнение модуля $P(n, N)$ при заданных параметрах. При этом возможны два варианта:

– создается очередное подмножество возможного решения; в этом случае осуществляется переход к следующему шагу алгоритма;

– очередное подмножество не может быть создано, так как все комбинации уже рассмотрены; в этом случае изменяем значение n на единицу, то есть $n = n + 1$ и переходим к шагу 3.

Шаг 7. Осуществляем проверку выполнения условий (следует напомнить, что таких условий будет l):

$$\sum_{l=1}^{n} a(i_k, j_l) \geq l, \ n = 1, l. \tag{7}$$

В том случае, когда все l условий будут выполняться, происходит переход к шагу 4; если же хотя бы одно условие не выполняется, то переходим к шагу 6.

Шаг 8. Окончание работы алгоритма и формирование решения, определяющего количество базовых представителей поколения техники.

Трудоемкость рассматриваемого алгоритма при решении задачи 1 составит

$$V = 2^N \binom{M}{m} \tag{8}$$

операций. Именно поэтому рассматриваемый алгоритм применим в случае относительно невысокой размерности задачи, когда будет выполняться следующее условие N, m или разность $(M - m) \sim$ $\sim 10\ldots30$.

В том случае, когда переборный алгоритм не позволяет получить решение за приемлемое время, предлагается использовать приближенный алгоритм, получивший название декомпозиционного.

3. Приближенный алгоритм

Основная идея декомпозиционного алгоритма заключается в том, чтобы свести решение исходной задачи большой размерности к решению последовательности задач более малой размерности, позволяющих применить переборный алгоритм.

Такие задачи малой размерности формируются из исходной по следующим правилам: задача малой размерности получается за счет формирования на базе исходных множеств $I_M = \{1, 2, \ldots, M\}$ и $J_N = \{1, 2, \ldots, N\}$, подмножеств I', Y' и $m' \le m$. В этом случае требуется решить задачу меньшей размерности $D(I', J', m')$ с ограничениями:

$$\sum_{j \in Y'} x_j a_{ij} \ge y_i, \sum_{i \in I'} y_i = m; (J_1, J_2, \ldots, J_k). \quad (9)$$

Данные ограничения используются вместо соотношений (3), (4) исходной задачи.

Так как декомпозиционный алгоритм предполагает итерационное решение задач меньшей размерности, то при его описании будем использовать понятие этапа решения, а каждый этап может быть разбит на шаги. Описываемый алгоритм насчитывает 6 этапов.

Этап 1. Выбор значений k и n_0 из множества целых чисел.

Этап 2. Формирование на базе множества M_N непустых подмножеств $(J_1, J_2, \ldots, J_k)$. Таких подмножеств должно быть сформировано k, причем их мощность не должна превышать величины n_k.

Этап 3. Аналогично разбиваем и множество I_M, но в данном случае возможно появление и пустых подмножеств.

Этап 4. Находим целые числа m_e, которые удовлетворяют следующим условиям:

$$0 \le m_e \le |I_e|, \ e = \overline{1, k}; \quad (10)$$

$$\sum_{l=1}^{k} m_e = m. \quad (11)$$

Этап 5. Полученное множество задач меньшей размерности $D(I_e, J_e, m_e)$ решается при помощи точного алгоритма, основанного на процедуре полного перебора.

Этап 6. Формирование окончательного решения поставленной задачи на базе объединения полученных решений задач меньшей размерности. При этом полученное решение может быть скорректировано путем исключения из него некоторых элементов.

Приведем описание этих этапов.

Этап 1. Сгенерированные задачи меньшей размерности $D(I_k, J_k, m_k)$ для случаев, когда множество I_k не является пустым, решаются на этапе 5 при помощи алгоритма полного перебора. Поэтому будет целесообразно ввести ограничение на мощность множества J_k. Мощность данного множества подбирается, исходя из условий решаемой задачи. Обозначив эту величину через n_0, следует признать, что целесообразной величиной n_0 будет являться величина $n_0 = 20\ldots50$. Зная n_0, можно найти и величину k из следующего соотношения

$$k = [N/n_0] + 1, \quad (12)$$

где $[x]$ – целая часть произвольного действительного числа x.

Этап 2. Заключается в формировании массива данных, характеризующих попарно элементы, определяющие, какие показатели должны быть реализованы при совместном производстве двух изделий. Эту величину обозначим через $b_{j_1} j_2$ и назовем величиной связи каждой пары элементов. Данный критерий будет определяться следующим выражением

$$b_{j_1} j_2 = \sum_{i=1}^{M} a_{ij_1} \times a_{ij_2}. \quad (13)$$

Критерий $b_{j_1} j_2$ в (13) будет равен числу показателей, которые должны быть обеспечены в ходе организации совместного производства при выпуске изделий j_1, j_2.

Понятно, что в целях обеспечения минимума целевой функции при решении задачи вида $D(I_k, J_k, m_k)$ целесообразно включать в решение элементы с наибольшими значениями попарных связей $b_{j_1} j_2$. Это уточняющее положение было реализовано в следующем блоке. Приведем описание начального и общего шага в этом случае.

Шаг 0. В множестве изделий J_N, подлежащих отбору в качестве базовых представителей, выбирается k элементов с максимальной величиной попарных связей и образуются k подмножеств, мощность которых будет равна единице.

Общий шаг. Изучается возможность включения элементов, сформированных на нулевом шаге подмножеств, в формируемое решение. При этом включаются в решение только в том случае, если будет удовлетворяться условие $\left|J_l\right| \neq n_0$, то есть мощность подмножества будет не равна n_0. Для каждого варианта вычисляется оценка по следующему соотношению

$$c_1\left(j, J_l\right) = \min\left[b\left(j, j_1\right)\right],\ j_1 \in J_l. \tag{14}$$

На данном шаге осуществляется выбор таких элементов, для которых параметр (14) будет максимален из всех сравниваемых на данном шаге величин. Выбранный элемент включается в анализируемое подмножество.

Это является завершающей операцией данного шага. Этап завершается тогда, когда все элементы, выделенные для распределения, уже распределены.

Этап 3. В качестве входных данных для этого этапа используются величины $c_2(i, k_1)$, которые определяются из выражения

$$c_2\left(i, k_1\right) = \sum_{j \in J_k} a_{ij},\ i = 1, M. \tag{15}$$

После этого осуществляются операции, состоящие в следующей последовательности действий.

Шаг 0. Все подмножества I_1 ($l = 1, k$) будем предполагать пустыми, то есть выполняется соотношение вида $\left|I_1\right| = \varnothing$.

Шаг 1. Рассматриваемый элемент включается в подмножество I_l только в том случае, когда величина $c_2(i, l_1)$ принимает максимальное значение. Это выполняется для всех $i = 1, 2, \ldots, M$.

В итоге выполнения этого шага получаем подмножество I_l, которое будет удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} &I_{l_1} \cap I_{l_1} = \varnothing,\ l_1, l_2 = 1, M; \\ &0 \le \left|J_l\right| \le M,\ l = 1, M; \\ &\sum_{l=1}^{M} \left|I_l\right| = M. \end{aligned} \tag{16}$$

Адекватность соотношений (16) может быть проверена непосредственно.

Этап 4. В том случае, когда величины m'_e будут удовлетворять условиям (10), (11), но не будут являться целыми числами, они находятся из следующего выражения

$$m'_e = \left|I_e\right| \times m \Bigg/ \left(\sum_{l=1}^{M} \left|I_e\right|\right). \tag{17}$$

В целях устранения этого недостатка можно воспользоваться процедурой округления.

Этап 5. Выполняется алгоритм полного перебора, описанный выше.

Как правило, выполнение этапа 6 затруднений не встречает, а потому и не рассматривается.

Таким образом, было дано описание двух алгоритмов решения задачи 1: точного и приближенного. Следует отметить, что на этапе подготовки к решению поставленной задачи ее размерность возможно понизить за счет учета некоторых условий.

4. Алгоритмы решения задачи второго типа

Решение задач второго типа предполагает использование алгоритмов, построенных на основе пороговой схемы [14, 15].

В данном случае вводится пороговое значение t_0, которое будет совпадать с одной из известных величин t_j ($j = 1, N$). Таким образом, получаем задачу $D(t_0)$, которая будет совпадать с задачей $D[I_M, J(t_0), m]$. В этом случае подмножество $M(t_0)$ будет определяться из соотношения вида

$$J\left(t_0\right) = \left\{j \middle| t_j \le t_0\right\}. \tag{18}$$

Предлагаемый алгоритм будет состоять из двух этапов.

Этап 1. Располагаем величины t_j в порядке, обеспечивающем выполнение условия

$$t_{j1} \le t_{j2} \le \ldots \le t_{jN}. \tag{19}$$

Этап 2. Осуществляется выполнение последовательности действий, которая может быть представлена в виде следующих шагов.

Шаг 0. Фиксируем начальное значение t_0 и находим решение задачи $D(t_0)$, то есть для задачи первого типа находим решение x^0.

Общий шаг. Осуществляем сравнение полученных значений целевой функции, то есть $f_1(x^0)$ и $f_1[x(t_0)]$. В данном случае $x_0(t_0)$ является решением для задачи $D(t_0)$, позволяющим найти корректирующую поправку для величины t_0. При этом при $t_0 = t_{jk}$ возможны два случая:

– если $f_1(x^0) > f_1[x(t_0)]$ устанавливаем значение $t_0 = t_{jk-l}$;

– если $f_1(x^0) \le f_1[x(t_0)]$ или решаемая задача $D(t_0)$ является недопустимой, считаем $t_0 = t_{jk+l}$.

Осуществив корректировку значения t_0, приступаем к решению задачи $D(t_0)$.

Процесс осуществления вычислений может быть завершен при помощи двух правил.

Правило 1. В том случае, когда при нулевом шаге значение переменной t_0 принимает значение $t_0 = t_1$, а на общем шаге $l = 1$. В этом случае общий шаг выполняется до тех пор, пока не будет выполнено условие $f_1(x^0) \le f_1[x(t_0)]$.

Правило 2. Если на нулевом шаге переменная t_0 будет принимать значение $t_0 = t_{[N/2]}$, а на общем шаге r, $l = [N/2r]$. Прекращение вычислений происходит на шаге, для которого $l = 0$.

Следовательно, и при решении задачи второго типа могут быть использованы переборный и декомпозиционный алгоритмы, описанные ранее.

5. Задача о частичном покрытии двудольного графа

Рассмотрим поставленную задачу (1)–(4) как задачу о покрытии двудольного графа. В том случае, когда будет выполняться соотношение $m = M$, получаем известную задачу о покрытии, то есть частный случай решаемой задачи. Но наиболее интересным будет являться вариант, когда будет иметь место неравенство вида $m \le M$. В этом случае получаем задачу о частичном покрытии [15–17]. Рассмотрим возможный подход к ее решению.

Рассмотрим двудольный граф $G(X, Y, U)$, где X – множество вершин первого уровня (доли), Y – множество вершин второго уровня, U – множество дуг, соединяющих вершины X с вершинами Y.

Вершины множества X соответствуют N изделиям, вершины множества Y соответствуют M показателям (характеристикам).

Обозначим $x_i = 1$, если изделие i выбрано в качестве базового, $x_i = 0$ в противном случае, $y_j = 1$, если j-й показатель должен быть реализован при реализации базовых изделий, $y_j = 0$ – в противном случае.

Постановка задачи. Определить (x_i, $i = 1, 2, \ldots, N$), (y_j, $j = 1, 2, \ldots, M$) минимизирующие

$$F_i\left(x\right) = \sum_{i=1}^{N} x_i C_i \tag{20}$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{N} a_{ij} x_i \ge y_j, \quad j = \overline{1, M}; \tag{21}$$

$$\sum_{j=1}^{M} y_i = m, \tag{22}$$

где C_i – затраты на создание изделия; в том случае если положить $C_i = 1$, получаем случай, рассмотренный выше.

Задача является NP-трудной.

Рассмотрим способ получения нижней оценки на основе метода сетевого программирования. Для этого разделим каждое C_i произвольным образом на несколько частей S_{ij} по числу дуг, исходящих из вершин $i \in X$.

$$\sum_{j \in Q_i}^{N} S_{ij} = C_i, \; i = \overline{1, N}, \tag{23}$$

где Q_i – множество вершин $j \in M$, таких что $\left(i, j\right) \in U$.

Обозначим

$$y_j = \min_{i \in P_i} S_{ij}, \tag{24}$$

где P_i – множество вершин $i \in M$, таких что $\left(i, j\right) \in U$.

Перенумеруем вершины множества Y в порядке возрастания y_j, т. е.

$$y_1 \le y_2 \le \ldots \le y_n. \tag{25}$$

Определим $\Phi(y) = \sum_{i}^{m} y_j$.

Из теории сетевого программирования следует, что (25) является нижней оценкой исходной задачи при любых (S_{ij}).

Обобщенная двойственная задача

Определить (S_{ij}), $i = 1, 2, \ldots, N$, $j = 1, 2, \ldots, M$, максимизирующее (25) при условиях (23).

Процедуру деления C_i на S_{ij} содержательно можно интерпретировать следующим образом. Представим себе, что изделие i состоит из нескольких подсистем (по числу исходящих из вершины $i \in X$) дуг, причем каждая подсистема отвечает за наличие (или создание) соответствующей характеристики. Значение S_{ij} соответствует затратам на создание подсистем. Очевидно, что для создания определенной характеристики нет необходимости создавать все изделия, достаточно создать соответствующую подсистему.

Пример. Рассмотрим двудольный граф (рис. 1).

Пусть $\overline{m} = 3$. Делим все C_i пополам. Оценка снизу 8 + 8 + 10 = 26. Применим метод ветвей и границ. Возьмем для ветвления вершину 4.

Выбираем вариант с вершиной 4 (оценка 26). Далее берем вершину 2, минимальная оценка 36 достижима (рис. 2).

Оптимальное решение: вершины 4 и 2 из множества X. $E_1 = 36$.

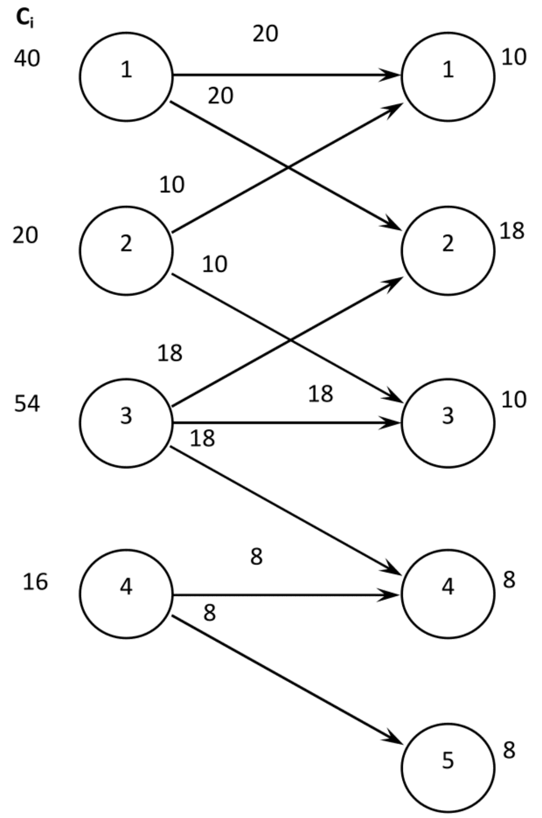

Рис. 1. Граф примера
Fig. 1. Graph of example

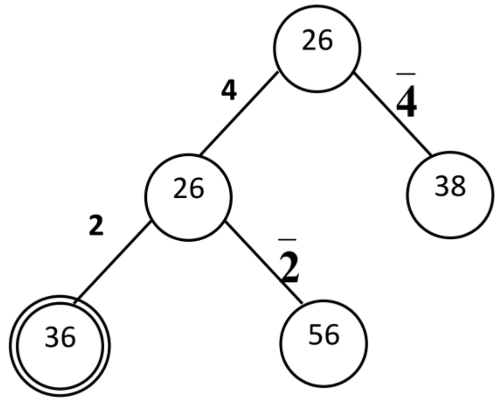

Рис. 2. Схема ветвления
Fig. 2. Branching scheme

Выводы

Дана формальная постановка задачи выбора базового представителя направления техники. Проведен анализ и разработана процедура выбора базовых изделий нового поколения техники, позволяющая в зависимости от условий, устанавливаемых лицом, принимающим решение (ЛПР), определить базовое изделие направления техники, наиболее полно соответствующее функциональным, конструктивным и технологическим признакам поколения техники, с помощью предложенного точного переборного или предложенного декомпозиционного алгоритма.

Список литературы

1. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Построение рейтинговой оценки на основе потоковой модели // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 31–41. DOI: 10.14529/ctcr230103

2. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. М.: Радио и связь, 2003. 156 с.

3. Курочка П.Н., Чередниченко Н.Д. Задачи ресурсного планирования в строительном проекте // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 4745–4753.

4. Баркалов С.А., Курочка П.Н. Построение интегральной оценки организационно-технологических решений на основе сингулярных разложений // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 2 (64). С. 39–46.

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

6. Курочка П.Н., Тельных В.Г. Оценка надежности организационных структур произвольного вида, задающихся планарным графом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 3 (23). С. 134–141.

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

8. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. М.: КомКнига, 2006. 332 с.

9. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. 584 с.

10. Типовые решения в управлении проектами / Д.К. Васильев, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков, А.В. Цветков. М.: ИПУ РАН, 2003. 74 с.

11. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.

12. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability // Conference: Internationalization of Education in Applied Mathematics and Informatics for HighTech Applications (EMIT 2018). Leipzig, Germany, 2018. P. 1–12.

13. Селезнева И.Е., Клочков В.В., Егошин С.Ф. Математическая модель межотраслевой координации стратегий развития (на примере здравоохранения и авиастроения) // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2022. Вып. 99. С. 57–80.

14. Медведев С.Н. Жадные и адаптивный алгоритмы решения задачи маршрутизации транспортных средств с несколькими центрами с чередованием объектов // Автоматика и телемеханика. 2023. Вып. 3. С. 139–168. DOI: 10.31857/S0005231023030078

15. Асатурова Ю.М., Хватова Т.Ю. Повышение инновационной активности предприятий в условиях дефицита финансов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2019. Т. 12, № 1. С. 132–145. DOI: 10.18721/JE.12111

16. Жилякова Л.Ю. Графовые динамические модели и их свойства // Автоматика и телемеханика. 2015. Вып. 8. С. 115–139.

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

References

1. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Determining a rating score based on a streaming model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):31–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230103

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

3. Kurochka P.N., Cherednichenko N.D. [Tasks of resource planning in a construction project]. In: *XII vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian Conference on Management Problems VSPU-2014]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2014. P. 4745–4753. (In Russ.)

4. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Building integrated assessment organizational and technological solutions on the basis singular value decomposition. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii.* 2016;2(64):39–46. (In Russ.)

5. Belov M.V. Optimal control of the life cycle of complex systems. *Control Sciences*. 2022;1:19–32. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2022.1.2

6. Kurochka P.N., Telnykh V.G. Evaluation of reliability of the organizational structures defined by planar graph. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arxitektura.* 2011;3(23):134–141. (In Russ.)

7. Dranko O.I. [Model of financial forecasting and scenarios of internal investments]. *Control* Sciences. 2007(1):37–40. (In Russ.)

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

9. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: Psychological and Social Institute; 2005. 584 p. (In Russ.)

10. Vasil'ev D.K., Zalozhnev A.Yu., Novikov D.A., Tsvetkov A.V. *Tipovye resheniya v upravlenii proektami* [Typical solutions in project management]. Moscow: ICS RAS; 2003. 74 p. (In Russ.)

11. Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)

12. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability. In: *Conference: Internationalization of Education in Applied Mathematics and Informatics for HighTech Applications (EMIT 2018)*. Leipzig, Germany; 2018. P. 1–12.

13. Selezneva I.E., Klochkov V.V., Egoshin S.F. Mathematical model of intersectoral coordination of development strategies (on the example of healthcare and aircraft industry). In: *Large-Scale Systems Control*. Moscow: ICS RAS; 2022. Iss. 99. P. 57–80. (In Russ.)

14. Medvedev S.N. Greedy and adaptive algorithms for multi-depot vehicle routing with object alternation. *Avtomatika i telemekhanika*. 2023;3:139–168. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0005231023030078

15. Asaturova Yu.M., Khvatova T.Yu. Improving innovative activity of enterprises in conditions of financial deficit. *St. Petersburg state polytechnical university journal. Economics.* 2019;12(1):132–145. (In Russ.) DOI: 10.18721/JE.12111

16. Zhilyakova L.Yu. Dynamic graph models and their properties. *Automation and Remote Control.* 2015;76(8):1417–1435. DOI: 10.1134/S000511791508007X

17. Dranko O.I. [Model of financial forecasting and scenarios of internal investments]. *Control Sciences*. 2007;1:37–40. (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.

Бурков Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; vlab17@bk.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 цифровой и отраслевой экономики, 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.

Vladimir N. Burkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; vlab17@bk.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 Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023
The article was submitted 03.04.2023