НИР. Экономика фирмы (№ 5 (71), 2024). 65: 41–49 УДК 658.7

Распределение затрат на закупки в условиях использования стратегии отсрочки в цепях поставок

Allocation of Procurement Costs under the Conditions of Using the Deferral Strategy in Supply Chains

DOI: 10.12737/2306-627X-2024-13-5-41–49 Получено: 15 августа 2024 г. / Одобрено: 12 сентября 2024 г. / Опубликовано: 25 октября 2024 г.

Миронов В.Л.

Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры количественных методов в менеджменте Института бизнеса и делового администрирования, ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ»,
Россия, 119571, г. Москва, проспект Вернадского, д. 82,
e-mail: mironovmironov@yandex.ru

Mironov V.L.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of quantitative methods applied to management, the Institute of business studies,
Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA),
82, Prospekt Vernadskogo, Moscow, 119571, Russia,
e-mail: mironovmironov@yandex.ru

Абрамова Е.Р.

Доцент кафедры предпринимательства и логистики,
ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова»,
Россия, 117997, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36,
e-mail: eassman@list.ru

Abramova E.R.

Associate Professor, Enterprise and Logistics Department,
Plekhanov Russian University of Economics,
36, Stremyanny Per., Moscow, 117997, Russia,
e-mail: eassman@list.ru

Аннотация
В статье рассматривается метод распределения затрат на закупки в условиях использования стратегии отсрочки в ЦП, позволяющий участникам получать дополнительные конкурентные преимущества за счет сокращения периода времени от разработки продукции и закупки сырья до реальных продаж.
Предлагаемый подход основан на приложении теории графов к управлению затратами на закупки, а именно, использование алгоритмов раскраски графов к распределению или объединению таких затрат по различным временным периодам.
Примеры, рассмотренные в статье, особенно актуальны в условиях турбулентности современных рынков, оказывающих непосредственное влияние на многообразие и специфику хозяйственных связей участников ЦП.

Ключевые слова: затраты на закупки, стратегия отсрочки в ЦП, логистические издержки, задача распределения затрат, отложенная дифференциация продукции, раскраска графов, хроматическое число графа, хроматический многочлен графа, гиперграфы.

Abstract
The article discusses the method of distributing procurement costs in the context of using the deferral strategy in the CP, which allows participants to obtain additional competitive advantages by reducing the time period from product development and raw material procurement to actual sales.
The proposed approach is based on the application of graph theory to procurement cost management, namely, the use of graph coloring algorithms for distributing or combining such costs over different time periods.
The examples discussed in the article are especially relevant in the context of turbulent modern markets, which have a direct impact on the diversity and specificity of economic relations between CP participants.

Keywords: purchasing costs, deferral strategy in the CP, logistics costs, cost allocation problem, delayed product differentiation, graph coloring, graph chromatic number, graph chromatic polynomial, hypergraphs.

Как показывают события последних лет, неопределенность, царящая на современных рынках в условиях международных и внутренних ограничений, является источником нестабильности цепочек поставок, приводя к разрушению устойчивых хозяйственных связей и, как следствие, нарушению главного правила современной логистики — ориентации на потребителя. В связи с этим все более актуальным становится поиск решений, позволяющих компаниям оставаться конкурентоспособными даже в условиях высокой степени неопределенности.

Одной из известных бизнес-стратегий, нацеленных на выполнение этой задачи, является отложенная дифференциация продукции/услуг («отсрочка»), дающая компаниям возможность находиться в зоне прибыли, максимально учитывая запросы потребителей. Наиболее точное определение этой стратегии дано М. Кристофером: «Отсрочка относится к процессу, посредством которого доведение продукта до его окончательной формы или местоположения откладывается на максимально возможный срок» [8].

Первые упоминания об «отсрочке» относятся еще к середине прошлого века и связаны с работами У. Олдерсона [9], Л. Баклина [1], У. Зинна [5], Р. Ван Хука [3], Б. Янга [13], М. Кристофера [8], С. Такера [11] и др. известных исследователей. В частности, в конце 1980-х гг. Д. Бауэрсокс и У. Зинн в одной из своих статей выделили несколько типов отсрочки, относящихся как к производству, так и к логистике: маркировка, упаковка, сборка, производство и временные отсрочки [5]. В начале XX*I* века Б. Янг [13] и др. специалисты в области логистики и управления цепями поставок показали взаимосвязь типа отсрочки с уровнем неопределенности рынка.

По мнению большинства из них, в условиях незначительной неопределенности достаточно использовать *отсрочку логистических операций и обслуживания*, другими словами, *отсрочку реализации*. Типичным вариантом такого подхода является производство полностью дифференцированного товара, доведение его до центрального оптового звена, и дальнейшее распределение под заказ клиента.

К очевидным преимуществам такой схемы распределения относятся:

- оперативное удовлетворение заказов клиентов практически в любых модификациях продукции и, как следствие, удержание потребителей при постоянном расширении клиентской базы;
- сокращение запасов готовой продукции на складах производителя;
- снижение затрат на содержание запасов, транспортировку, реализацию в розничной сети за счет централизации запасов сети в оптовом звене.

Вместе с тем очевидны и проблемы:

- дополнительные затраты на закупки, производство и хранение всех видов сырья для производства и реализации полностью дифференцированного товара;
- риски непроданных остатков по товарам неустойчивого спроса (в результате отсутствия ожидавшихся заказов клиентов) и, как следствие, дополнительные затраты на хранение, возвраты, утилизацию, дискаунты и т.п.

В связи с этим, если степень неопределенности высока, то наилучшие результаты приносит *отсрочка закупок и производства*. Сказанное означает выход стратегии отложенной дифференциации за пределы одной функциональной области логистики и ее использование в рамках процессного управления цепями поставок. Именно об этом больше 20 лет тому назад писал Р. Ван Хук: «Важно анализировать отсрочку не только на уровне маркетинга и каналов распределения, но и на уровне цепочки поставок» [3]. Его идеи остаются актуальными и сегодня. Учитывая современные реалии, авторы сочли необходимым сосредоточиться на поиске оптимизационных решений, связанных с отложенной дифференциацией именно на уровне цепочек поставок — от закупок до конечного распределения готовой продукции. При этом особенное внимание уделено *отсрочке закупок*, поскольку затраты на закупки могут составлять от 30 до 65% в структуре себестоимости готовой продукции предприятий (в зависимости от отрасли) и, таким образом, оказывают существенное влияние на прибыли компаний.

Отсрочка закупок предполагает, что приобретение сырья и материалов для производства, готовой продукции для дальнейшей реализации, а также выполнение соответствующих им логистических операций временно откладываются до момента максимально точного выявления текущего спроса потребителей, например, до наступления реальных продаж (что особенно актуально по товарам/услугам неустойчивого спроса). При этом в зависимости от сложившейся ситуации на рынке, объемов реализации, размеров заказов, качества сервиса, надежности поставщиков, поведения конкурентов и целого ряда других обстоятельств компании используют различные схемы отсрочки. К наиболее популярным относятся:

- закупки и производство под заказ клиента.

В этих условиях не только распределение готового товара, но также процессы производства и закупок сырья у поставщиков осуществляются под заказ клиента. При этом реальна ситуация, когда в момент оформления заказа товар не только не произведен, но для его создания еще не приобретены необходимые материальные ресурсы. Тем не менее заказ должен быть выполнен «точно в срок».

Такой подход имеет несомненные преимущества:

- «ноль запасов» сырья и готовой продукции и в результате — отсутствие затрат на их содержание в различных звеньях логистической цепи;
- минимальные расходы на содержание и реализацию непроданной продукции, возвратов, брака и т.п.

Вместе с тем очевидно, что подобная стратегия требует *идеальной координации* участников ЦП на основе совместного прогноза спроса, совместного планирования процессов закупок, производства и продаж, а также информационной интеграции. Это особенно важно при угрозе нарушений обязательств по поставкам, задержках в производственном цикле, сбоях в системе распределения (что в хозяйственной практике предприятий происходит нередко). В противном случае основными проблемами при использовании подобной схемы отсрочки становятся повышение рисков несвоевременного выполнения заказов, увеличения процента брака, некомплектности, вероятности дефицита (что, в свою очередь, нередко определяет дополнительные затраты клиентов, связанные с вынужденными простоями). Следствием для поставщика становится потеря клиентов, снижение имиджа компании в глазах потребителей и, соответственно, ущерб конкурентоспособности;

- *закупки и производство базового компонента при использовании «пробной партии» для оценки текущего спроса*.

В этом случае закупаются материальные ресурсы для производства базового компонента товара. Такой «полуфабрикат» временно размещается в оптовом распределительном центре, в продажу же направляется «пробная партия» — минимальный объем готовой, полностью дифференцированной продукции. Как только по результатам продаж «пробной партии» становится ясен (или примерно ясен) текущий спрос, базовый компонент оперативно дорабатывается в оптовом звене с учетом актуальных предпочтений потребителей и отправляется на реализацию. При этом, по решению менеджмента компании, небольшая часть базового компонента и материалов для его окончательной доработки может оставаться в оптовом звене для последующей доработки и выполнения поставок под конкретный заказ клиента.

Подобный подход приносит наилучшие результаты в условиях партнерских отношений, когда поставщики предоставляют своим заказчикам привлекательные условия поставок и оплаты: поставки мелкими партиями «точно в срок» и «точно в последовательности», хранение запаса клиента на собственных складах, совместное использование складской и транспортной инфраструктуры, рассрочки платежей, предоставление отложенной оплаты по счету и др.

Характерной чертой такого варианта отсрочки является использование «динамичного ценообразования», когда цены поставщиков гибко адаптируются к информации об актуальном спросе, а также о том, какая цена в текущей рыночной ситуации приемлема для клиентов.

Достоинства рассмотренной стратегии заключаются:

- в более точном (в сравнении с другими схемами) «попадании» в спрос;
- сокращении периода времени от разработки товара и закупки сырья до реальных продаж (в результате — опережение конкурентов со своей продукцией/услугами);
- достижении максимальной гибкости в отношениях с заказчиками;
- экономии на содержании запасов. Минимальны сроки хранения базового компонента, а также «доработанной» продукции (лишь перед самыми продажами);
- централизации хранения, позволяющей при меньшем объеме запасов гарантировать высокий уровень их доступности. Соответственно снижаются инвестиции в запасы.

Вместе с тем даже ориентация на выявленный текущий спрос полностью не страхует поставщиков как от рисков непроданных остатков, так и от рисков дефицита, поскольку по товарам волнового спроса рыночная ситуация может меняться непредсказуемо. Однако в большинстве случаев рассмотренная схема отсрочки все же позволяет компаниям достаточно уверенно чувствовать себя на рынке, продолжительный период оставаясь в зоне прибыли.

Таким образом, в рамках рассмотренных комбинаций отсрочки особенный интерес, по мнению авторов, представляет последний из рассмотренных вариантов, обладающий наибольшими преимуществами. Вместе с тем результативность его применения (как, впрочем, и других рассмотренных схем) самым тесным образом связана с оценкой и ***распределением затрат на закупки по различным временным периодам***. Учет особенностей формирования затрат на разных этапах «отсрочки» позволяет компаниям оптимизировать их структуру в условиях неустойчивого спроса, распределяя или объединяя финансовые вложения (инвестиции) в закупки по разным целям и периодам времени. В результате создаются условия, позволяющие поставщикам привести свои возможности в соответствие с реальными потребностями заказчиков.

Одним из возможных подходов к решению этой проблемы *в условиях отложенной дифференциации продукции* представляется приложение ***теории графов к управлению затратами на закупки, а именно, использование алгоритмов раскраски графов к распределению или объединению таких затрат по различным временным периодам.***

Пример затрат и ограничений на закупки в цепях поставок

Рассматривается цепь поставок, включающая поставщиков основных и вспомогательных материалов, фокусную компанию-производителя готовой продукции, а также оптовые и розничные торговые предприятия (реализация готовой продукции).

Фокусная компания (производитель изделий легкой промышленности) планирует выпуск летней одежды в различной цветовой гамме, оснащенной разнообразной фурнитурой. По части номенклатуры спрос относительно устойчив. Как показывает практика, каждый год продается примерно одинаковый объем продукции конкретных наименований. Однако по некоторым позициям номенклатуры спрос имеет существенные колебания, в результате компании сложно сделать прогноз на текущий сезон. В связи с этим по подобным позициям принимается решение об «отсрочке», а именно:

- закупается оптовая партия сырья для производства «полуфабриката» — *базового компонента изделия*. Например, производится модель летней одежды, соответствующая базовому варианту. Однако не окрашивается и не оснащается фурнитурой. В таком виде товар направляется в оптовое звено, где ожидает момента сезонных продаж;
- приобретается *минимальное* количество красок и фурнитуры различных цветов и модификаций для

производства «*пробной*» партии полностью готового товара (в различных вариантах цвета и финальной отделки);

- в момент старта сезонных продаж «пробная» партия отправляется на реализацию. Как показывает практика, первая неделя (максимум 10 дней) является наиболее показательной для оценки прогноза продаж на весь сезон;
- остальная партия продукции в виде «базового компонента» находится в запасах в оптовом распределительном центре;
- как только становится известен (или примерно известен) спрос на текущий сезон, производится закупка оптовых партий красителей и фурнитуры, но *только конкретных* (*пользующихся реальным спросом*) цветов и модификаций. Вся партия «базового компонента» окрашивается в актуальные цвета, дорабатывается необходимой фурнитурой и в короткий срок выпускается на рынок;
- небольшая часть «базового компонента» и дополнительного сырья для его доработки остаются в оптовом распределительном центре для выполнения поставок только «под заказы клиентов».

Цель:

- сократить затраты на закупки сырья и реализацию готовой продукции и, что особенно важно, на закупки, производство, упаковку, маркировку, содержание в запасах *невостребованной* продукции (возвраты, дискаунты, утилизацию и т.п.);
- получить конкурентные преимущества на рынке за счет сокращения периода времени от разработки продукции и закупки сырья до реальных продаж.

Известно:

1. ***Виды затрат:*** $v_1, v_2, ..., v_n$,

где n — общее число затрат, а v_i — обозначение i-го типа затрат;

v_1 — затраты *на приобретение сырья* для производства «базового компонента» изделия и минимальных объемов красителей и фурнитуры для производства «пробной» партии дифференцированного товара (цены поставщиков);

v_2 — затраты *на выполнение заказов* по закупке сырья для производства «базового компонента» и материалов для «пробной партии» (ведению переговоров, оформлению и регистрации заказов, составлению документации, транспортировке, упаковке и др.);

v_3 — затраты *на хранение* «базового компонента» в оптовом звене;

v_4 — затраты *на приобретение* у поставщиков дополнительных красителей и фурнитуры *под выявленный спрос* для доработки «базового компонента;

v_5 — затраты *на выполнение заказов* по закупке материалов для доработки базовой продукции под выявленный спрос;

v_6 – затраты *на хранение* оставшейся части «базового компонента» и дополнительных материалов в оптовом звене для поставок «под конкретные заказы клиентов».

2. ***Список всех пар затрат, которые не могут быть реализованы в один период времени:***

$$\{v_1, v_2\},\ \{v_1, v_4\},\ \{v_1, v_6\},\ \{v_2, v_3\},\ \{v_2, v_4\},\ \{v_2, v_5\},$$
$$\{v_2, v_6\},\ \{v_3, v_4\},\ \{v_3, v_6\},\ \{v_4, v_5\},\ \{v_5, v_6\}.$$

В дальнейшем такие пары будем называть «*запрещёнными парами*».

3. ***Условия закупок:*** хранение сырья на складах поставщиков и поставки заказчику «точно в срок» и «точно в последовательности» ***на условиях отсрочки платежа***.

Для эффективного функционирования всей системы в рамках приведённого выше примера необходимо распределить все виды затрат по отдельным группам так, чтобы в одну группу входили только те затраты, которые могут быть реализованы в один период времени, и, следовательно, ни одна из запрещённых пар не должна попасть в одну группу. При этом желательно минимизировать число таких групп. В дальнейшем всякое распределение затрат на такие группы будем называть *правильным распределением* (*затрат*), а саму задачу построения правильного распределения назовём «задачей о распределении затрат».

Решение задачи о распределении затрат

Сформулируем задачу о распределении затрат на языке теории графов, точнее, в терминах раскраски графов.

Теория графов — один из наиболее прикладных разделов математики. Методы этой теории позволяют решать многие практические задачи и, в частности, задачи логистики. Здесь мы ограничимся понятиями и результатами теории графов, необходимыми для решения задачи о распределении затрат. Подробнее с теорией графов можно ознакомиться, например, по монографии [12] или учебному пособию [4].

Определим понятие графа и раскраски графов.

Формально граф G задаётся двумя множествами: множеством вершин и множеством рёбер, которые обозначаются через $V(G)$ и $E(G)$ соответственно, причем множество рёбер состоит из некоторых пар элементов множества вершин. В действительности понятие графа допускает простую геометрическую интерпретацию, что и делает графы доступными и удобными объектами для многих прикладных задач. Множество вершин $V(G)$ интерпретируется как множество точек плоскости, а множество рёбер $E(G)$ — это отрезки, соединяющие некоторые из этих вершин. Таким образом, не любая пара вершин из множества $V(G)$ должна быть соединена ребром (отрезком). Вершины, соединенные ребром, называются смежными.

Для решения задачи о распределении затрат рассмотрим граф G с множеством вершин $V(G)=\{v_1,v_2,...,v_n\}$, совпадающий с множеством всех типов затрат и множеством рёбер , в котором две вершины v_i и v_j смежны (соединены ребром) только в случае, если для соответствующих типов затрат v_i и v_j невозможно одновременное выполнение, т.е. пара $\{v_i, v_j\}$ является запрещённой. Такой граф G назовём *графом распределения затрат*. Очевидно, что всякому разбиению множества вершин $V(G)=\{v_1,v_2,...,v_n\}$ на непересекающиеся подмножества, не содержащие смежных вершин, соответствует правильное распределение затрат из списка: v_1, v_2, ..., v_n. В теории графов такие разбиения множества вершин называют раскрасками графа. Более точно, раскраска графа — это приписывание цветов его вершинам при условии, что смежным вершинам должны быть приписаны различные цвета. Если при такой раскраске используется k цветов, то её называют k-раскраской, а граф — k-раскрашиваемым.

Минимальное число красок (цветов), которыми можно раскрасить граф G, называется хроматическим числом графа и обозначается — $\chi(G)$.

На следующем примере покажем, как с помощью раскраски графа можно решить задачу о распределении затрат.

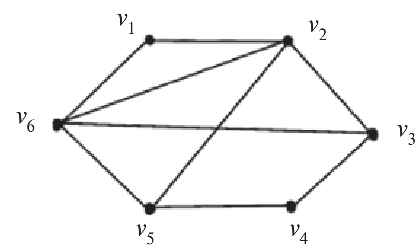
Пример 1. Пусть необходимо распределить 6 типов затрат: v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, и при этом следующие пары затрат не могут выполняться одновременно (запрещённые пары):

$$\{v_1,v_2\},\ \{v_1,v_4\},\ \{v_1,v_6\},\ \{v_2,v_3\},\ \{v_2,v_4\},\ \{v_2,v_5\},$$
$$\{v_2,v_6\},\ \{v_3,v_4\},\ \{v_3,v_6\},\ \{v_4,v_5\},\ \{v_5,v_6\}. \qquad (1)$$

Содержательный смысл этих затрат и список запрещённых пар соответствуют примеру, приведённому выше (см. «Пример затрат и ограничений на закупки в цепях поставок»).

Требуется найти правильное распределение затрат, т.е. разбить все 6 типов затрат на группы так, чтобы в одну группу не входила ни одна пара из списка запрещённых затрат (1) и количество таких групп было минимальным.

Для построения правильного распределения затрат рассмотрим граф G с множеством вершин $V(G)=\{v_1,v_2,v_3,v_4,v_5,v_6\}$ и рёбрами, соответствующими парам из списка (1), т.е. две вершины v_i и v_j смежны (соединены ребром) тогда и только тогда, когда множество $\{v_i, v_j\}$ совпадает с одним из одиннадцати двухэлементных множеств, перечисленных в списке (1). Граф G изображён на рис. 1.



G

Рис. 1. Граф распределения затрат G, соответствующий условию примера 1

Очевидно, любой раскраске графа G соответствует правильное распределение затрат, при котором в одну группу входят затраты, соответствующие вершинам одного цвета. Наибольший интерес представляет распределение затрат с минимальным числом групп, которое равно $\chi(G)$ — хроматическому числу графа G.

Легко видеть, что для графа G, изображённого на рис. 1, $\chi(G) = 3$, т.е. минимальное число красок, которыми можно раскрасить граф G, равно трем. Действительно, двумя красками раскрасить граф G не получится, так как три попарно смежные вершины — v_1, v_2, v_6 уже потребуют трёх красок, поэтому $\chi(G) \geq 3$. С другой стороны, для раскраски графа G достаточно трёх красок, подтверждение тому — рис. 2.

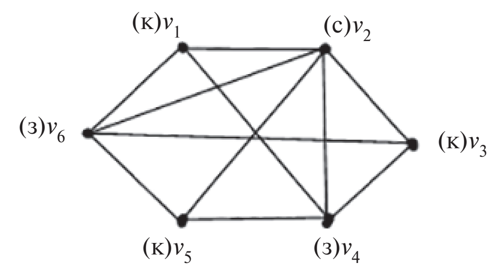


Рис. 2. 3-раскраска графа распределения затрат G, изображённого на рис. 1. В скобках указан цвет вершины: (к) — красный, (с) — синий, (з) — зелёный.

Следовательно, $\chi(G) = 3$ и раскраске на рис. 2 соответствует следующее разбиение всех затрат на три группы одноцветных вершин — красных, зелёных и синих:

$$\{v_1,v_3,v_5\},\ \{v_4,v_6\},\ \{v_2\}. \qquad (2)$$

Список (2) указывает на то, что тройка затрат v_1, v_3, v_5 может выполняться одновременно, тоже справедливо и для пары v_4, v_6, а затраты v_2 потребуют отдельного временного промежутка. Следовательно, задача, поставленная в примере 1, решена и найдено правильное распределение затрат с минимальным числом групп (3 группы из списка (2)).

Следующий шаг — постараться определить, сколько всего существует правильных распределений затрат с минимальным числом групп или, что то же самое, сколько существует различных раскрасок графа *G*, использующих 3 цвета.

Для решения подобных задач в теории графов вводится специальная функция $P(G, x)$, равная числу различных раскрасок графа *G*, использующих x цветов. Можно показать (см. монографию [12]), что функция $P(G, x)$ представима многочленом, отсюда и общепринятое название функции $P(G, x)$ — хроматический многочлен. В той же монографии [12] приведён алгоритм, позволяющий находить хроматический многочлен любого графа. Прилагая этот алгоритм к графу *G*, изображённому на рис. 1, получаем его хроматический многочлен (мы опускаем описание алгоритма и приводим лишь конечный результат в форме, удобной для дальнейших вычислений):

$$P(G,x)=x(x-1)(x-1)\big((x-3)(x-4)(x-5)+ \\ +4(x-3)(x-4)+4(x-3)+1\big). \tag{3}$$

Заметим, что для нахождения хроматического многочлена можно воспользоваться уже готовым программными продуктами, например, *Wolfram Mathematica* [14] или *Maple* [6], в которых есть пакеты, приспособленные к работе с графами.

Чтобы определить число 3-раскрасок графа *G*, достаточно в многочлен из (3) подставить $x = 3$. После подстановки получаем, что $P(G, 4) = 6$. Это означает, что существует 6 способов раскраски вершин графа *G* в 3 цвета. Напомним, что рассматриваются только те раскраски, при которых смежные вершины окрашены в разные цвета. При этом 6 способов раскраски получены в предположении, что вершины графа *G* помечены и при перестановке красок формально получается новая 3-раскраска графа, но при этом разбиение на одноцветные группы не меняется. Например, на рис. 3 представлена раскраска графа *G*, отличная от раскраски на рис. 2, но список одноцветных групп, соответствующий рис. 3, совпадает со списком (2), если учитывать только состав этих групп, а не их цвета.

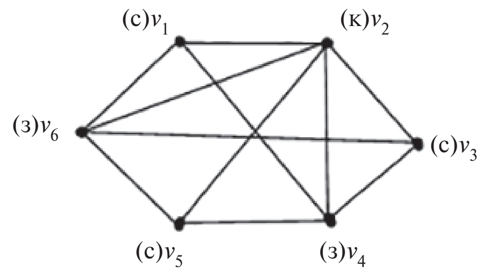


Рис. 3. 3-раскраска графа *G*, изображённого на рис. 1, отличная от 3-раскраски, изображённой на рис. 2, но дающая тот же состав одноцветных групп (2): $\{v_1, v_3, v_5\}$, $\{v_4, v_6\}$, $\{v_2\}$

Таким образом, двум различным 3-раскраскам графа *G* (рис. 2 и 3) соответствует одно и то же правильное распределение затрат на 3 группы, приведённое в списке (2). Чтобы избежать этой многозначности и получить истинное число правильных распределений затрат, достаточно разделить число всех раскрасок (в случае примера 1 таких раскрасок — 6) на число всех перестановок 3 красок. В элементарной комбинаторике это соответствует числу перестановок n объектов, и почти очевидно, что таких перестановок равно $n!=n\cdot(n-1)\cdot(n-2)\cdot\ldots\cdot 1$, а в нашем случае $3!=3\cdot 2\cdot 1=6$. Осталось разделить число всех 3-раскрасок графа *G* на число всех перестановок 3 красок и получим $\frac{6}{3!}=1$ — число правильных распределений затрат с минимальным числом групп, т.е. такое распределение единственное — распределение (2).

Замечание. Часто на практике минимальное число групп при распределении затрат ещё не гарантирует минимальности расходов на реализацию этих типов затрат. Поэтому самостоятельный интерес может представлять правильное распределение затрат не обязательно с минимальным числом групп.

Так, **в условиях примера 1 можно поставить задачу нахождения всех правильных распределений затрат** не на 3 группы (минимально возможное число групп), а на 4 группы, что соответствует раскраске графа *G*, изображённого на рис. 1 четырьмя красками.

Прежде чем предъявить хотя бы одну такую раскраску, найдём число всех 4-раскрасок графа *G*. Для этого достаточно в хроматический многочлен (3) подставить $x = 4$. Получаем:

$$P(G,4)=4(4-1)(4-2)\big((4-3)(4-4)(4-5)+ \\ +4(4-3)(4-4)+4(4-3)+1\big)=120.$$

Такое большое число раскрасок графа *G* — 120 способов, как уже объяснялось выше, получается за счёт перестановки четырех красок. Если разделить число всех 4-раскрасок — $P(G, 4) = 120$ на $4! = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 24$ — число перестановок четырех красок, то получим $\frac{120}{24} = 5$ — число всех правильных распределений затрат на 4 группы.

На рис. 4 и 5 представлены две из пяти возможных 4-раскрасок графа G.

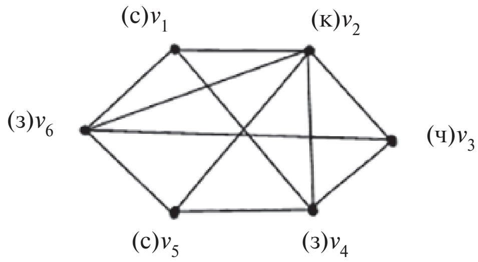


Рис. 4. 4-раскраска графа G, изображённого на рис. 1, дающая следующий состав одноцветных групп: $\{v_1, v_5\}$, $\{v_4, v_6\}$, $\{v_2\}$, $\{v_3\}$, вершины которых окрашены в синий, зелёный, красный и чёрный цвета соответственно.

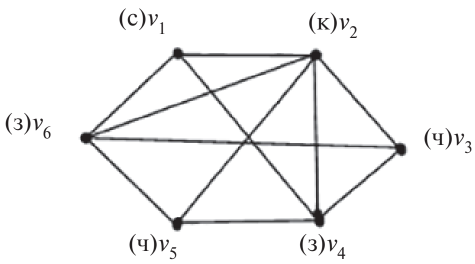


Рис. 5. 4-раскраска графа G, для которой состав одноцветных групп$\{v_4, v_6\}$, $\{v_3, v_5\}$, $\{v_1\}$, $\{v_2\}$ (зелёные, чёрные, синие и красные соответственно) отличен от состава одноцветных групп, порождённых 4-раскраской на рис. 4 $\{v_1, v_5\}$, $\{v_4, v_6\}$, $\{v_2\}$, $\{v_3\}$

Раскраскам графа G, изображённым на рис. 4 и 5, соответствуют два правильных распределения шесть типов затрат из примера 1 на 4 группы:

$$\{v_1, v_5\}, \{v_4, v_6\}, \{v_2\}, \{v_3\} \text{ и } \{v_1, v_5\}, \{v_4, v_6\}, \{v_2\}, \{v_3\}.$$

Правильные распределения для небольшого числа затрат, как, например, в примере 1, можно получить и без привлечения методов раскраски графов. Достаточно устроить полный перебор всех возможных вариантов с учетом списка запрещённых пар. Но, в отличие от простого перебора, теоретико-графовый подход хорош тем, что его можно использовать для любого числа затрат и любого списка запрещённых пар.

Основные этапы решения задачи о распределении затрат

На 1-м этапе по множеству всех затрат и списку запрещенных пар следует построить граф распределения затрат, обозначим его через G.

На 2-м этапе по графу G необходимо выписать его хроматический многочлен — $P(G, x)$. Для этого можно использовать алгоритм из монографии [12] или программу *Wolfram Mathematica* [14], как и любой иной программный продукт, приспособленный к работе с графами.

На 3-м этапе определяем хроматическое число графа $\chi(G)$, равное минимальному значению аргумента x, при котором $\chi(G) \neq 0$. Напомним, что по определению $\chi(G)$ — это минимальное число красок, которыми можно раскрасить граф G и которое совпадает с минимальным числом групп в распределениях затрат.

На 4-м этапе (заключительном) необходимо получить минимальную раскраску вершин графа G, т.е. раскраску, использующую ровно $\chi(G)$ красок. Эта раскраска, по сути, и даёт правильное распределение затрат, при котором в одну группу входят затраты, соответствующие вершинам одного цвета. Для получения минимальной раскраски можно использовать уже упоминавшуюся выше программу *Wolfram Mathematica* или непосредственно один из алгоритмов раскраски графа, например алгоритм Магу — Вейсмана, основанный на свойствах булевой алгебры. Описание этого алгоритма можно найти в пособии [7].

Обобщение задачи о распределении затрат

В задаче о распределении затрат предполагалось, что затраты, которые не могут быть реализованы одновременно, разбиты на пары (см. (1) из примера 1). В действительности возможна ситуация, когда под запрет попадают одновременно более двух типов затрат.

Рассмотрим, как и в примере 1, шесть типов затрат: u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, но, в отличие от предыдущего рассмотрения, мы не придаём этим затратам никакого содержательного смысла — это просто набор из шести символов. И пусть список запрещённых затрат выглядит, например, так:

$$\{u_1, u_2, u_4, u_5\},\ \{u_3, u_4, u_6\},\ \{u_1, u_6\}. \tag{5}$$

Первое из множеств — $\{u_1, u_2, u_4, u_5\}$ — указывает на то, что одновременно нельзя выполнять 4 типа затрат: u_1, u_2, u_4, u_5, что не исключает совместную реализацию затрат u_1 и u_2 или u_2, u_4, u_5. Аналогично интерпретируется второе множество — $\{u_3, u_4, u_6\}$, третье множество — запрещённая пара $\{u_1, u_6\}$. Очевидно, в случае списка запрещённых затрат (5) метод решения задачи о распределении затрат, описанный выше, неприменим, так как уже на 1-м этапе при построении графа распределения затрат предполагается, что список запрещённых затрат состоит только из двухэлементных множеств (запрещённые пары). Чтобы преодолеть это препятствие, следует расширить понятие графа и перейти к так называемым гиперграфам.

В гиперграфе, в отличие от простого графа, ребра — это любые подмножества множества вершин графа. Чтобы представить гиперграф графически, рассмотрим пример 2.

Пример 2. Пусть $V(H)=\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\}$ — множество вершин гиперграфа H, а множество его рёбер $E(H)=\{e_1,e_2,e_3\}$ совпадает со списком (5), т.е. $e_1=\{u_1,u_2,u_4,u_5\}$, $e_2=\{u_3,u_4,u_6\}$, $e_3=\{u_1,u_6\}$. Тогда гиперграф H можно изобразить следующим образом:

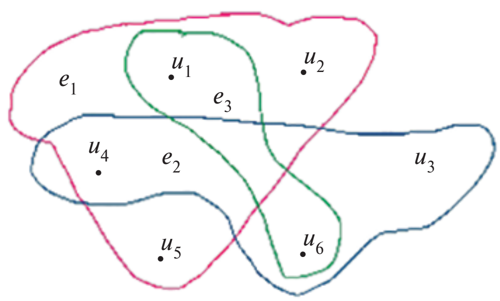


Рис. 6. Гиперграф H, соответствующий условию примера 2. Ребра гиперграфа e_1, e_2, e_3 изображаются областями с границами разного цвета (не путать с раскраской графа). В область с красной границей — ребро e_1 — входят вершины u_1, u_2, u_4, u_5. Область, ограниченная синим — ребро e_2, — содержит вершины u_3, u_4, u_6, зелёная граница для ребра e_3 включает вершины u_1, u_6.

Под раскраской гиперграфа понимают всякую раскраску его вершин, при которой нет одноцветных рёбер, т.е. каждое ребро должно содержать хотя бы две вершины, окрашенные в разные цвета.

Очевидно, всякая раскраска гиперграфа порождает решение обобщённой задачи о распределении затрат, если в одну группу включать затраты, соответствующие вершинам одного цвета.

Легко видеть, что для раскраски гиперграфа H, изображённого на рис. 5, достаточно двух красок, например, если вершины u_1, u_2, u_3 закрасить первой краской, а вершины u_4, u_5, u_6 — второй. Следовательно, с учётом списка запрещённых затрат (5) правильное распределение затрат состоит из двух групп: $\{u_1, u_2, u_3\}$ и $\{u_4, u_5, u_6\}$.

Понятия и результаты, связанные с гиперграфами и их раскраской, можно найти в монографии [4].

Подробное обсуждение алгоритмов раскраски гиперграфов и, как следствие, решения обобщённой задачи о распределении затрат выходит за рамки данной статьи и может быть предметом самостоятельного исследования.

Заключение

В статье предложен метод, который позволяет при заданных ограничениях на распределение затрат разбивать все виды затрат на группы, не содержащие запрещённых пар затрат. При этом минимизируется число таких групп. В результате подобный подход предоставляет компаниям дополнительные возможности для снижения издержек на закупки. В частности, в рамках примера, рассмотренного в данной статье, несомненными преимуществами становятся следующие источники оптимизации:

- при закупке оптовых партий (для производства базового компонента) поставщики, как правило, предоставляют скидки за объем закупок;
- нет дополнительных *затрат на приобретение* оптовых партий *всех возможных* красителей и фурнитуры (для производства *всего объема* полностью дифференцированной *продукции*);
- отсутствуют расходы *на хранение* всех возможных модификаций дифференцированной продукции и, таким образом, более эффективно используются склады готовой продукции;
- сокращаются затраты на *хранение сырья* (поскольку производство базового компонента выполняется быстрее, чем производство всей партии дифференцированной готовой продукции);
- товар *скорее попадает в сеть реализации* (так как производство «пробной» партии выполняется значительно быстрее, чем всего объема дифференцированной продукции) (в результате потребитель имеет возможность узнать о товаре компании прежде, чем об аналогичной продукции конкурентов);
- минимальны расходы *на хранение* готовой продукции в оптовом звене. Товар практически *сразу* отправляется на реализацию (поскольку известен спрос и продажи уже начались);
- развитие сервиса, связанного с доработкой базового компонента в оптовом звене;
- производители получают возможность поддерживать достаточные объемы производства;
- торговые предприятия готовы брать на реализацию практически *весь товар*, так как он пользуется устойчивым спросом;
- снижение рисков «непроданных остатков» и издержек, связанных с хранением и сбытом невостребованной продукции.

Вывод: ***использование алгоритмов раскраски графов применительно к задаче о распределении затрат на закупки при использовании стратегии отсрочки в ЦП позволяет наглядно показать, как сформировать оптимальную структуру затрат на закупки в условиях неустойчивого спроса, распределяя или объединяя затраты по разным целям и периодам времени.***

Литература

1. *Баклин Л.П.* Отсрочка, спекуляция и структура каналов распределения [Текст] / Л.П. Баклин // Журнал маркетинговых исследований. — 1965. — Т. 2. — С. 26–31.
2. *Бун К.А.* Отсрочка: эволюционирующая концепция цепочки поставок [Текст] / К.А. Бун, К.У. Крейгхед, Дж.Б. Ханна // Международный журнал физического распределения и управления логистикой. — 2007. — Т. 37. — Вып. 8, — С. 594–611.
3. *Ван Хук Р.И.* Повторное открытие отсрочки: обзор литературы и направления исследований [Текст] / Р.И. Ван Хук // Журнал операционного менеджмента. — 2001. — Т. 19. — № 2. — С. 161–84.
4. *Емеличев В.А.* Лекции по теории графов [Текст]: учеб. пособие / В.А. Емеличев, О.И. Мельников, В.И. Сарванов, Р.И. Тышкевич. — М.: Наука, 1990.
5. *Уолтер З.* Планирование физического распределения с использованием принципа отсрочки [Текст] / З. Уолтер, Д.Дж. Бауэрсокс // Journal of Business Logistics. — 1988. — № 9 (2). — С. 117–136.
6. *Кирсанов М.Н.* Графы в Maple [Текст]: учеб. пособие / М.Н. Кирсанов. — М.: Физматлит, 2007.
7. *Койнов Р.В.* Практикум по дискретной математике [Текст]: учебно-метод. пособие / Р.В. Койнов, Л.С. Лисицына. — СПб., 2004.
8. *Кристофер М.* Логистика и управление цепочками поставок: создание сетей, повышающих ценность [Текст] / М. Кристофер. — Лондон: Прентис Холл, 2005.
9. *Олдерсон У.* Эффективность маркетинга и принцип отсрочки [Текст] / У. Олдерсон // Прогноз затрат и прибыли. — 1950. — Т. 3. — С. 15–18.
10. *Сваминатан Дж.М.* Управление более широкими линейками продуктов посредством отсроченной дифференциации с использованием ванильных коробок [Текст] / Дж.М. Сваминатан, С.Р. Тайур // Наука управления. — 1998. — № 44 (12–Часть–2). — С. 161. — DOI: 10.1.1.53.4420. — DOI: 10.1287/mnsc.44.12.S161
11. *Такер С.М.* Отсрочка и массовая настройка, опубликовано в ноябре 2000 года, архивировано 28 апреля 2013 года, доступ осуществлен 22 ноября 2022 года [Текст] / С.М. Такер.
12. *Харари Ф.* Теория графов [Текст] / Ф. Харари. — М.: Мир, 1973.
13. *Янг Б.* Управление неопределенностью посредством отсрочки [Текст] / Б. Янг, Н. Бернс, С. Бэкхаус // Международный журнал производственных исследований. — 2004. — Т. 42. — № 6. — С. 1049–1064.
14. Wolfram Mathematica. 2008. URL: http://www.wolfram.com/mathematica

References

1. Bucklin L.P. Deferral, Speculation, and the Structure of Distribution Channels // Journal of Marketing Research, 1965, vol. 2, pp. 26–31.
2. Boone K.A., Craighead K.W., Hannah J.B. Deferral: An Evolving Concept of the Supply Chain // International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, 2007, vol. 37, i. 8, pp. 594–611.
3. Van Hook R.I. Rediscovering Deferral: A Literature Review and Research Directions // Journal of Operations Management, 2001, vol. 19, no. 2, pp. 161–84.
4. Emelichev V.A., Melnikov O.I., Sarvanov V.I., Tyshkevich R.I. Lectures on Graph Theory: A Tutorial. M.: Nauka, 1990.
5. Zinn, Walter and Donald J. Bowersox. Physical Distribution Planning Using the Deferral Principle // Journal of Business Logistics, 1988, no. 9(2), pp. 117–136
6. Kirsanov M.N. Graphs in Maple: A Tutorial. M.: Fizmatlit, 2007.
7. Koynov R.V., Lisitsyna L.S. Workshop on Discrete Mathematics. A Tutorial. St. Petersburg, 2004.
8. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management: Creating Value-Adding Networks, London, Prentice Hall, 2005.
9. Alderson W. Marketing Effectiveness and the Deferral Principle // Cost and Profit Forecast. 1950, vol. 3, pp. 15–18.
10. Swaminathan J.M., Tayur S.R. (1998) Managing Wider Product Lines Through Delayed Differentiation Using Vanilla Boxes // Management Science, no. 44 (12–Part–2), p. 161. DOI: 10.1.1.53.4420. DOI: 10.1287/mnsc.44.12.S161
11. Tucker S.M. Deferral and Mass Customization, published November 2000, archived April 28, 2013, accessed November 22, 2022.
12. Harari F. Graph Theory. Moscow: Mir, 1973.
13. Young B., Burns N., Backhouse S. Managing Uncertainty Through Deferral // International Journal of Production Research, 2004, vol. 42, no. 6, pp. 1049–1064.
14. Wolfram Mathematica. 2008. URL: http://www.wolfram.com/mathematica