

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 519.854.3-6

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18

## **О задаче и алгоритмах согласованного оптимального управления производством и материальными потоками предприятия\***

**Н.В. БАРАНОВА<sup>а</sup>, Ю.А. МЕЗЕНЦЕВ<sup>б</sup>, П.С. ПАВЛОВ<sup>с</sup>**

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент

<sup>а</sup> [baranova.nina.vl@gmail.com](mailto:baranova.nina.vl@gmail.com)    <sup>б</sup> [mezencev@corp.nstu.ru](mailto:mezencev@corp.nstu.ru)

<sup>с</sup> [pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com](mailto:pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com)

На сегодняшний день в теории и практике управления технологическими и организационными системами нет единого подхода, который бы позволял решать задачи согласованного оптимального управления входными и выходными материальными потоками и производством. Опубликованные работы в этой области часто направлены на решение отдельных задач. При попытках же комплексного решения декларируемая системность либо обозначается только на словах, либо реализуется эвристически склейкой составляющих компонент без обсуждения и анализа эффективности и тем более доказательства.

В настоящей статье на основе более ранних работ авторов развивается аппарат согласованного оптимального управления всеми логически связанными подсистемами. Созданная в этих целях формальная постановка является задачей дискретной оптимизации и учитывает все основные факторы производства и движения материальных потоков. Построен специальный алгоритм приближенного решения, переводящий созданную задачу из разряда NP-трудных в разряд полиномиально разрешимых. Формальная постановка содержит логические условия выбора из множества параметров, включая источники и направления потоков, условия поставок, объемы и динамику производства, определение оптимальных цен на выходе. Таким образом, в ограничениях системно учитываются как производственные составляющие, так и ограничения на ресурсы и логику движения входных и выходных материальных потоков.

В качестве критерия эффективности всех процессов использован максимум чистой прибыли на конец планового периода. Рассмотренная модель и задачи управления исследованы с помощью единого подхода, позволяющего работать с логическими условиями любой сложности и ставить соответствующие формальные оптимизационные задачи. Так-

---

\* Статья получена 13 февраля 2021 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90048, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Госзадания (проект № FSUN-2020-0009).

же приведены результаты испытания алгоритма на тестовых данных, приближенных к реальным размерностям.

**Ключевые слова:** задачи дискретной оптимизации, управление производством, поставками и продажами, смешанное целочисленное программирование, функции скидок, оптимизация цен сбыта, эффективный алгоритм, материальные потоки, оптимальное управление, полуопределенная релаксация

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках работы разработаны модель и алгоритм поиска оптимальных решений, которые базируются на методах математического программирования. Работы, связанные с этой темой, в большинстве своем описывают разные проблемы: задачи размещения, задачи выбора поставщиков [1], назначения работ, управления запасами, управления цепями поставок, логистикой [2, 3], производством [4].

Формируя структуру ассортимента, нужно задумываться о ее рациональности, учитывать планируемую доходность объемов продаж. Здесь стоит отметить, что как таковой общей методики нахождения оптимального ассортимента производственного предприятия не существует.

Задачи дискретной оптимизации в современном мире находят широкое применение для разнообразных целей производства [5]. Приведем далее некоторые примеры таких целей. В работе [6] авторами применяется управляющая система, которая использует алгоритм имитации отжига, генетический алгоритм и нечеткую логику, чтобы решить задачу оптимизации перемещения материала в логистической сети.

Поиску производственного плана посвящены работы [7, 8], в которых описано решение задачи с учетом удовлетворения спроса.

Большой спектр готовых управленческих решений для производственных процессов предприятия создали исследователи из КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева [9]. Но в этой системе управления в части формирования производственной программы используется сценарное моделирование фактически с неопределенной эффективностью применения.

Продолжительное время задачу поиска поставщиков и установки заказов для них с помощью инструмента многоцелевой оптимизации рассматривает группа ученых, работающих в университете Янгстаун в США [10, 11]. Для этого они используют один из возможных инструментов многокритериального анализа решений – визуальное интерактивное целевое программирование.

В работе [12] авторами также рассматривается задача выбора поставщиков. Среди методов, которые они используют, можно назвать непрерывный общий поиск с чередующимися окрестностями в совокупности с теорией опорных векторов (SVM), а именно математический аппарат наименьших квадратов опорных векторов (LS–SVM).

Еще одна работа, посвященная размещению заказов между поставщиками с учетом условий рентабельности маршрутов для компаний-поставщиков, раскрывает возможности аппарата дискретной оптимизации для описания задачи выбора поставщиков для региональной сети аптек [13]. Рассматривается поиск оптимального решения данной задачи в системе поддержки при-

нения решений с помощью языка C++, пакета CPLEX и генетического алгоритма.

Таким образом, известные на данный момент подходы к решению такого рода задач чаще всего оставляют желать лучшего. Зачастую существующие способы предлагают последовательное решение логистических задач (складской, транспортной или финансовой), а также выбор поставщиков, качества обслуживания, потребителей с помощью балльного оценивания [14]. Классические модели, такие как транспортная задача (вычисление планов перевозок), задача коммивояжера (поиск маршрутов), задача о назначениях (выбор поставщиков), управление запасами по Уилсону (оптимальное управление уровнем запасов) и т. д., в целом не позволяют эффективно решить исследуемые в этой статье задачи [14, 15]. В актуальных работах, стремящихся к системности, также виден описанный выше подход [15, 16]. Логистические задачи нельзя отнести к задачам с максимальными показателями сложности при сравнении с подобными задачами управления процессами на производственном предприятии дискретного типа [17]. В связи с этим можно сказать, что рассматриваемые модели имеют достаточно низкую сложность детализации, с одной стороны, и высокую экономическую эффективность применения экономико-математических моделей – с другой. Сложность модели выделяет количество целочисленных переменных в создаваемых задачах управления и принадлежность к классу NP. Однако эффективность эта условна и зависит от правильно определенных параметров на входе и выходе подсистемы, а следовательно, от системности подхода к управлению предприятием в целом.

Таким образом, как на практике (на промышленных предприятиях), так и в теории (в научных работах) применяются и рассматриваются в основном узконаправленные подходы к расчету отдельных показателей и планов, связанных с производством, и для каждой конкретной специализации производства. Зачастую это приводит к неэффективности подсистем управления корпоративных информационных систем.

Опираясь на анализ различных источников и собственные разработки, авторы нашли подход к определению и оптимизации состава и интенсивности материальных потоков, ассортиментного ряда, объемов выпуска и цен реализуемой продукции. Этот инструментарий имеет существенную предысторию и опирается на системный подход к оптимизации управления производственным ассортиментом, ценами и материальными потоками [17, 18]. Фактически нами развивается аппарат согласованного системного оптимального управления всеми логически связанными подсистемами предприятия.

## **1. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ И ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Задача состоит в том, чтобы, с одной стороны, определить объемы поставок в зависимости от скидок и набор поставщиков, а с другой стороны, объемы продаж для каждой потребительской группы. Также нужно найти номенклатуру, динамику и объемы производства, которые бы удовлетворяли системе ограничений на объем склада и на объем оборотного капитала в начале планового периода и одновременно максимизировали целевую функцию

(объем оборотных средств на конец периода или чистый доход). Словосочетание «стратегия продаж» определим как совокупность рассчитываемых мощностей выходных материальных потоков и цен для каждого товара из номенклатуры для каждого ранга потребителей, определяемую в зависимости от спроса для всех временных интервалов планового периода. Совокупность рассчитываемых мощностей входных материальных потоков, вычисляемую для всех временных отрезков заданного временного периода, аналогично будем называть стратегией закупок. И также определим ее для всех производимых продуктов, для каждого из поставщиков – по скидкам от них и ценам. Длительность производственного цикла для рассматриваемого случая полагается много меньшей любого интервала планового периода.

Более подробно отправную базовую содержательную постановку задачи и установки по объекту управления (сбыт и складское хранение, вычисление объемов закупок по всему ассортименту, выбор поставщиков сырья и комплектующих, транспортировка) можно найти в [17–19].

Задача оптимального управления поставками, производством и сбытом неоднородной продукции предприятия будет выглядеть следующим образом:

$$p_{i,l}(x_{v,l}(t)) = \begin{cases} p_{i,l,1}(t), & \text{если } x_{v,l}(t) \leq s_{v,l,1}(t), \\ a_{i,l}^0(t) + a_{i,l}^1(t)x_{v,l}(t), & \text{если } x_{v,l}(t) > s_{v,l,1}(t); \end{cases} \quad (1)$$

$$v = \overline{1, V}, \quad l = \overline{1, L}, \quad t = \overline{1, T}.$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I [1 - \tilde{g}_j(t)] C_{i,j}(t) y_{i,j}(t) + \Delta Q(t) - Q(t) = 0, \quad t = \overline{1, T}; \quad (2)$$

$$Q(t) \geq 0, \quad \Delta Q(t) \geq 0, \quad y_{i,j}(t) \geq 0, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (3)$$

$$0 \leq x_{v,l}(t) \leq s_{v,l,2}(t), \quad v = \overline{1, V}, \quad l = \overline{1, L}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^L x_{v,l}(t) = \sum_{i=1}^I A_{v,i}(t) \sum_{j=1}^J y_{i,j}(t), \quad v = \overline{1, V}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (5)$$

$$\Delta Q(t+1) - \Delta Q(t) - \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L x_{i,l}(t) p_{i,l}(x_{i,l}(t)) +$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [1 - \tilde{g}_j(t+1)] C_{i,j}(t+1) y_{i,j}(t+1) \leq -N(t), \quad t = \overline{1, T}; \quad (6)$$

$$z = \Delta Q(T+1) \rightarrow \max. \quad (7)$$

В формулах (1)–(7) использованы следующие обозначения:

$j$  – номер поставщика ( $j = \overline{1, J}$ ),  $i$  – номер сырья и комплектующих в ассортименте поставок ( $i = \overline{1, I}$ ),  $l$  – индекс типа потребителя ( $l = \overline{1, L}$ ),  $k$  – номер интервала шкал объемов скидок ( $k = \overline{1, K}$ ) и спроса ( $k = \overline{1, K'}$ ),  $v$  – номер продукта в ассортименте продаж ( $v = \overline{1, V}$ );

$t$  – номер временного интервала, с дискретностью до которого определено модельное время (далее месяца);

$C_{ij}(t)$  – базовая оптовая цена сырья и комплектующих  $i$  у поставщика  $j$  в месяце  $t$ ;

$y_{ij}(t)$  – объем закупок в натуральном выражении сырья и комплектующих  $i$  у поставщика  $j$  в месяце  $t$ ;

$g_{jk}(t)$  – скидка у поставщика  $j$  в месяце  $t$  на интервале  $k$  соответствующей шкалы (в процентах);

$h_{jk}(t)$  – значение правой границы интервала  $k$  шкалы объемов скидок у поставщика  $j$  в месяце  $t$ ;

$p_{ilk}(t)$  – цена продажи единицы продукта  $i$  для потребителя типа  $l$  в месяце  $t$  на интервале  $k$  функции спроса;

$x_{vl}(t)$  – объем продаж в натуральном выражении продукта  $v$  потребителю типа  $l$  в месяце  $t$ ;

$s_{v/k}(t)$  – значение правой границы интервала  $k$  шкалы функции спроса на товар  $i$  у потребителя типа  $l$  в месяце  $t$ .

$N(t)$  – заработная плата и накладные расходы в месяце  $t$ ;

$A_{v,i}(t)$  – тензор технологических коэффициентов, элементами которого являются технологические коэффициенты или нормы расхода закупаемого продукта  $i$  на производство единицы реализуемого продукта  $v$  в месяце  $t$ ;

$Q(t)$ ,  $\Delta Q(t)$  – размер и остаток оборотного капитала в месяце  $t$ .

Выражения (1) задают ограничения на выбор цен сбыта; (5) – условия на способы преобразования входного материального потока  $Y$  в производимые товары  $X$ , где  $A$  – это тензор, состоящий из технологических коэффициентов; (2) – условия на величину поставок в месяце  $t$  по всем поставщикам в денежном эквиваленте, в котором учитывается величина скидки; (3) – условия на неотрицательность размера и остатки оборотного капитала и объемов закупок в натуральном выражении; (4) – условия по спросу для всех типов потребителей и по каждой товарной позиции в месяце  $t$ ; (6) – задает процесс изменения значения чистой прибыли; (7) – целевая функция, которая в данной постановке задает критерий максимизации значения чистой прибыли в последний временной интервал планового периода.

## 2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения данной задачи был разработан специальный приближенный эффективный алгоритм, на каждой итерациях которого используется алгоритм поиска порождаемой подзадачи полуопределенного программирова-

ния (п. 3), подробное описание которого можно найти в [17]. Приводим его запись.

1. Задаем начальное значение номера шага алгоритма  $q := 0$ . Используем исходные данные  $O_i(1)$ ,  $Q(1)$ ,  $N(t)$ ,  $C_{i,j}(t)$ ,  $g_{j,k}(t)$ ,  $h_{j,k}(t)$ ,  $p_{i,l,k'}(t)$ ,  $s_{i,l,k'}(t)$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $t = \overline{1, T}$ ,  $k' = \overline{1, 2}$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $l = \overline{1, L}$ .

2. Положим  $p_{i,l}(x_{i,l}(t)) := a_{i,l}^0(t) + a_{i,l}^1(t)x_{i,l}(t)$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $t = \overline{1, T}$ , формируя исходную ослабленную задачу.

3. Находим решение задачи полуопределенного программирования (2)–(7) с дискретными переменными  $G^q$ , используя приближенный алгоритм [17, 18] и метод следования центральному пути. Оптимальное решение обозначим  $Y^q$ ,  $X^q$ ,  $z^q$  ( $Y^q = \|y_{i,j}^q(t)\|$ ,  $X^q = \|x_{i,l}^q(t)\|$ ,  $z^q = z(X^q, Y^q)$ ).

4. Увеличиваем номер шага алгоритма  $q := q + 1$ .

5. Проверка условий оптимальности. Проверяем выполнение условий (1). Если выполняются все условия

$$p_{i,l}(x_{i,l}^{q-1}(t)) = \begin{cases} p_{i,l,1}(t) & \text{при } x_{i,l}^{q-1}(t) \leq s_{i,l,1}(t), \\ a_{i,l}^0(t) + a_{i,l}^1(t)x_{i,l}^{q-1}(t) & \text{при } x_{i,l}^{q-1}(t) > s_{i,l,1}(t), \end{cases}$$

$\forall i = \overline{1, I}$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $t = \overline{1, T}$ , переход к пункту 7, иначе следующий пункт.

6. Если  $x_{i,l}^{q-1}(t) \leq s_{i,l,1}(t)$  и  $p_{i,l}(x_{i,l}^{q-1}(t)) > p_{i,l,1}(t)$ , заменяем стоимостную оценку переменной  $x_{i,l}(t)$  фиксированным значением:  $p_{i,l}(x_{i,l}(t)) := p_{i,l,1}(t)$ .

Если  $x_{i,l}^{q-1}(t) > s_{i,l,1}(t)$  и  $p_{i,l}(x_{i,l}^{q-1}(t)) = p_{i,l,1}(t)$ , заменяем фиксированную стоимостную оценку переменной  $x_{i,l}(t)$  линейной функцией  $p_{i,l}(x_{i,l}(t)) := a_{i,l}^0(t) + a_{i,l}^1(t)x_{i,l}(t)$  и дополняем систему ограничений (2)–(6) условием  $x_{i,l}(t) \geq s_{i,l,1}(t)$ . Проверки и необходимые замены оценок производятся для всех переменных  $x_{i,l}(t) \forall i = \overline{1, I}$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $t = \overline{1, T}$ .

7. Находим решение текущей задачи  $Y^q$ ,  $X^q$  ( $Y^q = \|y_{i,j}^q(t)\|$ ,  $X^q = \|x_{i,l}^q(t)\|$ ) и переходим к пункту 3.

8. На текущем шаге  $q$  получено оптимальное решение задачи (1)–(7)  $Y^*$ ,  $X^*$ ,  $z^*$ . Останов алгоритма.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Традиционно для работы с набором подзадач математического программирования мы использовали специализированный пакет IBM ILOG CPLEX, который создан специально под нужды и особенности решения задач математической оптимизации, в том числе полуопределенного программирования, в состав которого входит реализация барьерного алгоритма.

В качестве среды разработки для программирования алгоритма выбрана JetBrains Rider 2020.2 и язык программирования C#. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio – это комплексный набор инструментов для моделирования и решения задач оптимизации, который имеет возможности взаимодействовать с другими средствами разработки и языками программирования с помощью API. В нашем случае мы работали со сборками (библиотеками) CPLEX в выбранной среде разработки. Результатами работы программы является набор многомерных массивов значений переменных и полученное значение целевой функции.

Результаты расчетов десяти сгенерированных тестовых задач различных размерностей сведены в таблицу. Размерности задач были приближены к реальным на больших предприятиях. Исходные данные для тестов были взяты из открытых источников (оптовые цены сырья и комплектующих и скидки (в процентах) у поставщиков) – из сайтов торговых и производственных фирм, реализующих вычислительную технику и ее комплектующие. В качестве предприятия, для которого производился поиск решения, бралась гипотетическая фирма, у которой есть три типа потребителей: 1) розничные; 2) потребители, имеющие скидку 2 %; 3) потребители, имеющие скидку 5 %.

Конфигурация системы: процессор Intel Core i5 8265U @ 1.60 ГГц, оперативная память DDR4 16 Гб, операционная система Windows 10 Home (version 1903, OS build 18362.1016), Framework: .NET Core 3.1.201.

#### Результаты экспериментов

##### Experimental results

No	Cont	Boolean	LineConstr	NonlineConstr	It	Time
1	2218	120	816	6	1	00.25
2	10 208	120	3426	6	5	02.71
3	19 258	120	6426	6	5	03.86
4	37 358	120	12 426	6	5	08.56
5	73 558	120	24 426	6	2	06.46
6	145 958	120	48 426	6	2	09.66
7	182 158	120	60 426	6	2	13.33
8	290 758	120	96 426	6	2	21.4
9	363 158	120	120 426	6	2	30.57
10	580 358	120	192 426	6	2	51.43

В таблице обозначено: No – номер теста, Cont – число непрерывных переменных, Boolean – число булевых переменных, LineConstr – число линейных ограничений, NonlineConstr – число нелинейных ограничений, It – среднее число итераций алгоритма и Time – среднее время решения в секундах.

Из таблицы можно сделать вывод, что оценка быстродействия алгоритма вполне обнадеживает. Вычислительные эксперименты с программной реализацией алгоритма решения формально неразрешимых точными методами задач (1)–(7) в целом показали высокую эффективность алгоритма. Это обуславливает отличные перспективы внедрения разработки, поскольку, как отмечалось выше, поиск оптимальных решений рассматриваемой задачи управления актуален для большей части хозяйствующих субъектов.

## ВЫВОДЫ

Исходя из результатов тестирования программной реализации полученного алгоритма мы сделали вывод, что с ее помощью можно получить точное решение задач (1)–(7) произвольной размерности. Результаты, найденные посредством применения программной реализации представленного алгоритма в одном из режимов, ослабляющих ограничения (5) до тривиального совпадения входных и выходных потоков, сравнивались с полученными ранее в работе [19], в которой не было учета производственной составляющей. Результаты вычислений оказались близкими. Во всех прочих случаях релевантность результатов проверялась на уровне содержательного анализа и противоречий выявлено не было.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутусов О.Б., Дубин М.Е. Система поддержки принятия решений для выбора поставщика в цепи поставок // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 4. – № 1 (15). – С. 268–271.
2. Parunakjan V., Sizova E. Increase of efficiency of interaction of production and transport in the logistic chains of material traffic of enterprises // Transport Problems. – 2008. – Т. 3 (3). – С. 95–104.
3. Bosov A., Khalipova N. Formation of separate optimization models for the analysis of transportation-logistics systems // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 3 (3). – С. 11–20.
4. Kolga M., Smedt V. De, Nerom L. Van. Planning principles in metallurgy // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5 (45). – С. 78–80.
5. Arshinsky L., Zhang K. The application of operations research in logistics // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2012. – № 10. – С. 5–12.
6. Using metaheuristic and fuzzy system for the optimization of material pull in a push-pull flow logistics network / A. Mehraei, H.-R. Karimi, K.-D. Thoben, B. Scholz-Reiter, M. Chadli // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–19.
7. Koriashkina L., Saveliev V., Zhelo A. On mathematical models of some optimization problems arising in the production of autoclaved aerated concrete // Advanced Engineering Forum. – Trans Tech Publications, 2017. – Vol. 22. – P. 173–181.
8. Castro P.M., Grossmann I.E., Zhang Q. Expanding scope and computational challenges in process scheduling // Computers and Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 114. – P. 14–42.
9. Авхадиев Р.А., Елизарова Н.Ю., Сабитов Ш.Р. Система оперативного управления производственными процессами предприятия «1С: MES: облачное управление производством» // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М., 2014. – С. 4909–4914.
10. Karpak B., Kumcu E., Kasuganti R.R. Purchasing materials in the supply chain: managing a multi-objective task // European Journal of Purchasing and Supply Management. – 2001. – Vol. 7, N 3. – P. 209–216.

11. *Karpak B., Kasuganti R.R., Kumcu E.* Multi-objective decision-making in supplier selection: an application of visual interactive goal programming // *Journal of Applied Business Research*. – 1999. – Vol. 15. – P. 57–72.
12. A new enhanced support vector model based on general variable neighborhood search algorithm for supplier performance evaluation: a case study / B. Vahdani, S.M. Mousavi, R. Tavakkoli-Moghaddam, H. Hashemi // *International Journal of Computational Intelligence Systems*. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 293–311.
13. *Сигаев В.С.* Задача размещения заказов для сети аптек региона и ее приближенное решение // *Проблемы информатики*. – 2011. – № 1 (9). – С. 11–19.
14. *Просветов Г.И.* Математические методы в логистике. – М.: Изд-во РДЛ, 2006. – 272 с.
15. *Бродецкий Г.Л.* Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности. – М.: Academia, 2010. – 336 с.
16. *Бочкарев А.А.* Планирование и моделирование цепи поставок. – М.: Альфа-Пресс, 2008. – 192 с.
17. *Мезенцев Ю.А.* Математические модели управления подсистемами логистики на предприятиях // *Автоматизация и современные технологии*. – 2008. – № 8. – С. 46–55.
18. *Baranova N.V., Mezentsev Yu.A.* Research and development of an algorithm for solving the problem of control over the input-output material flows of an industrial company // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2018. – Vol. 2098: Optimization problems and their applications (OPTA-SCL 2018), Omsk, 2018. – P. 33–44. – Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки.
19. *Мезенцев Ю.А., Павлов П.С.* К программной реализации декомпозиционного алгоритма решения одного класса задач дискретной оптимизации с полуопределенной релаксацией // *Информационные технологии*. – 2012. – № 2 (186). – С. 54–59.

*Баранова Нина Владимировна*, ассистент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – дискретные задачи оптимизации, управление производством. E-mail: baranova.nina.vl@gmail.com

*Мезенцев Юрий Анатольевич*, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование операций, методы оптимизации, системный анализ. Имеет более 100 печатных работ и учебных пособий. E-mail: mezenцев@corp.nstu.ru

*Павлов Павел Сергеевич*, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – логистика, оптимизация производства и поставок. E-mail: pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com

*Baranova Nina V.*, assistant lecturer, Department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on discrete optimization problems, production management. E-mail: baranova.nina.vl@gmail.com

*Mezentsev Yuri A.*, D. Sc. (Eng.), professor, Department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on operations research, optimization methods, and system analysis. He has more than 100 publications and teaching manuals. E-mail: mezenцев@corp.nstu.ru

*Pavlov Pavel S.*, senior teacher, Department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on logistics, optimization of production and supply. E-mail: pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com

### ***On the problem and algorithms for coordinated optimal management of production and material flows of an enterprise\****

*N.V. BARANOVA<sup>a</sup>, Yu.A. MEZENTSEV<sup>b</sup>, P.S. PAVLOV<sup>c</sup>*

*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

*<sup>a</sup> baranova.nina.vl@gmail.com    <sup>b</sup> mezencev@corp.nstu.ru*

*<sup>c</sup> pavlov.pavel.sergeevich@gmail.com*

#### **Abstract**

At present, any unified approach that would allow solving the problems of coordinated optimal control of input and output material flows and production has not been implemented in the theory and practice of managing technological and organizational systems. The works published in this area are often aimed at solving specific problems. When attempting a complex solution the declared systemicity is either indicated only in words, or is implemented heuristically by gluing the constituent components without discussing and analyzing the effectiveness and, moreover, proof.

This article, based on the earlier works of the authors, develops an apparatus of coordinated optimal control of all logically related subsystems. A formal setting created for this purpose is a discrete optimization problem and it takes into account all the main factors of production and movement of material flows. A special algorithm for an approximate solution is constructed, which transfers the created problem from the category of NP-hard problems to the category of polynomially solvable ones. The formal setting contains logical conditions for choosing from a variety of parameters, including sources and directions of flows, conditions of supply, volumes and dynamics of production, and determination of optimal prices at the output. Thus, the restrictions systematically take into account both production components and restrictions on resources and the logic of movement of input and output material flows.

A maximum net profit at the end of the planning period was used as a criterion for the effectiveness of all processes. The considered model and control problems are investigated using a unified approach that allows working with logical conditions of any complexity and setting appropriate formal optimization problems. The results of testing the algorithm on test data close to real dimensions are also given.

**Keywords:** discrete optimization problems, production, supply and sales management, mixed integer programming, discount functions, sales price optimization, efficient algorithm, material flows, optimal control, semi-definite relaxation

#### **REFERENCES**

1. Butusov O.B., Dubin M.E. Sistema podderzhki prinyatiya reshenii dlya vybora postavshchika v tsepi postavok [Decision support system for supplier selection in supply chain]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, vol. 4, no. 1 (15), pp. 268–271.

---

\* Received 13 February 2021.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-37-90048. (The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90048) And also with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the State Assignment (project No. FSUN-2020-0009). (The research is supported by Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (project No. FSUN-2020-0009).)

2. Parunakjan V., Sizova E. Increase of efficiency of interaction of production and transport in the logistic chains of material traffic of enterprises. *Transport Problems*, 2008, vol. 3 (3), pp. 95–104.
3. Bosov A., Khalipova N. Formation of separate optimization models for the analysis of transportation-logistics systems. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. 3 (3), pp. 11–20.
4. Kolga M., Smedt V. De, Nerom L. Van. Planning principles in metallurgy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013, no. 5 (45), pp. 78–80.
5. Arshinsky L., Zhang K. The application of operations research in logistics. *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem = Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*, 2012, no. 10, pp. 5–12.
6. Mehraei A., Karimi H.-R., Thoben K.-D., Scholz-Reiter B., Chadli M. Using metaheuristic and fuzzy system for the optimization of material pull in a push-pull flow logistics network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1–19.
7. Koriashkina L., Saveliev V., Zhelo A. On mathematical models of some optimization problems arising in the production of autoclaved aerated concrete. *Advanced Engineering Forum*. Trans Tech Publications, 2017, vol. 22, pp. 173–181.
8. Castro P.M., Grossmann I.E., Zhang Q. Expanding scope and computational challenges in process scheduling. *Computers and Chemical Engineering*, 2018, vol. 114, pp. 14–42.
9. Avkhadiyev R.A., Elizarova N.Yu., Sabitov Sh.R. [System of operational management of production processes of the enterprise "IC: MES: cloud production management"]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014 [XII All-Russian meeting on management problems VSPU-2014]*. Moscow, 2014, pp. 4909–4914. (In Russian).
10. Karpak B., Kumcu E., Kasuganti R.R. Purchasing materials in the supply chain: managing a multi-objective task. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 2001, vol. 7, no. 3, pp. 209–216.
11. Karpak B., Kasuganti R.R., Kumcu E. Multi-objective decision-making in supplier selection: An application of visual interactive goal programming. *Journal of Applied Business Research*, 1999, vol. 15, pp. 57–72.
12. Vahdani B., Mousavi S.M., Tavakkoli-Moghaddam R., Hashemi H. A new enhanced support vector model based on general variable neighborhood search algorithm for supplier performance evaluation: a case study. *International journal of computational intelligence systems*, 2017, vol. 10 (1), pp. 293–311.
13. Sigaev V.S. Zadacha razmeshcheniya zakazov dlya seti aptek regiona i ee priblizhennoe reshenie [Problem of placing orders for a network of regional pharmacies and its approximate solution]. *Problemy informatiki = Problems of Informatics*, 2011, no. 1 (9), pp. 11–19.
14. Prosvetov G.I. *Matematicheskie metody v logistike [Mathematical methods in logistics]*. Moscow, RDL Publ., 2006. 272 p.
15. Brodetskii G.L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybor v usloviyakh neopredelennosti [System analysis in logistics. Choice under Uncertainty]*. Moscow, Academia Publ., 2010. 336 p.
16. Bochkarev A.A. *Planirovanie i modelirovanie tsepi postavok [Planning and modeling of the supply chain]*. Moscow, Al'fa-Press Publ., 2008. 192 p.
17. Mezentsev Yu.A. Matematicheskie modeli upravleniya podsistemami logistiki na predpriyatiyakh [Mathematical models of the logistic subsystem management on the enterprises]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and modern technologies*, 2008, no. 8, pp. 46–55.
18. Baranova N.V., Mezentsev Yu.A. Research and development of an algorithm for solving the problem of control over the input-output material flows of an industrial company. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2098, pp. 33–44.
19. Mezentsev Yu.A., Pavlov P.S. K programmnoi realizatsii dekompozitsionnogo algoritma resheniya odnogo klassa zadach diskretnoi optimizatsii s poluopredelennoi relaksatsiei [On the software implementation of a decomposition algorithm for solving one class of discrete optimization problems with semi-definite relaxation]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*, 2012, no. 2 (186), pp. 54–59.

Для цитирования:

Баранова Н.В., Мезенцев Ю.А., Павлов Ю.А. О задаче и алгоритмах согласованного оптимального управления производством и материальными потоками предприятия // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 3 (83). – С. 7–18. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18.

For citation:

Baranova N.V., Mezentsev Yu.A., Pavlov P.S. O zadache i algoritmakh soglasovannogo optimal'nogo upravleniya proizvodstvom i material'nymi potokami predpriyatiya [On the problem and algorithms for coordinated optimal management of production and material flows of an enterprise]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 3 (83), pp. 7–18. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-3-7-18.