

Вестник БИСТ (Башкирского института социальных технологий). 2022. № 2(55). С. 55–63.
Vestnik BIST (Bashkir Institute of Social Technologies). 2022; 2(55):55–63.

Научная статья
УДК 338.33
doi: 10.47598/2078-9025-2022-2-55-55-63

РЕЗУЛЬТАТЫ ЦЕНОЛОГИЧЕСКОГО ГРАФОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Никита Евгеньевич Попов

Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Ростов-на-Дону, Россия,
NikitaPOP@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8538-8328>

Аннотация. В статье предложена модель, направленная на минимизацию издержек производства путем эффективного формирования производственной программы и группировки конечных продуктов. Основная идея заключается в создании групп товаров, которые могут быть изготовлены из одинаковых основных сырьевых компонентов с использованием схожего оборудования. Представленный ценологический подход к решению данного вопроса достаточно гибок, поскольку позволяет использовать общесистемные ограничения и учитывать дополнительные показатели стоимости, т. е. может рассматриваться как решение двухцелевой задачи оптимизации.

Ключевые слова: граф, клик, ценоз, группировка продуктов

Для цитирования: Попов Н. Е. Результаты ценологического графового моделирования производственной программы химической продукции // Вестник БИСТ (Башкирского института социальных технологий). 2022. № 2(55). С. 55–63. <https://doi.org/10.47598/2078-9025-2022-2-55-55-63>.

Research article

RESULTS OF THE CENOLOGICAL GRAPH MODELING OF THE PRODUCTION PROGRAM OF CHEMICAL PRODUCTS

Nikita E. Popov

Rostov State University of Economics (RINH), Rostov-on-Don, Russia,
NikitaPOP@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8538-8328>

Abstract. The article proposes a model aimed at minimizing production costs by effectively forming a production program and grouping final products. The main idea is to create groups of products that can be made from the same basic raw materials using similar equipment. The presented cenological approach to solving this issue is quite flexible, since it allows using system-wide restrictions and taking into account additional cost indicators, it can be considered as a solution to a two-purpose optimization problem.

Keywords: graph, click, cenosis, grouping of products

For citation: Popov N. E. Results of the cenological graph modeling of the production program of chemical products. *Vestnik BIST (Bashkirskogo instituta social`ny`x texnologij) = Vestnik BIST (Bashkir Institute of Social Technologies)*. 2022;2(55):55–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.47598/2078-9025-2022-2-55-55-63>.

Поиск оптимальной группировки продуктов для производственных процессов в условиях промышленных предприятий связан с методами графового представления, различающихся инструментально: при планировании [1], расчетах хронометража [2], организации произ-

водства [3], настройки телекоммуникации [4] и др. Тем не менее, в большинстве современных практических приложений используется «метаэвристическая методология» [5]. Практическое применение данного подхода затруднено наличием противоречивых целей,

составляющих ее методов, решение чего, на наш взгляд, лежит в плоскости ценологии, опирающейся на идеи экосистемного представления технических и экономических объектов. В статье рассматриваются основные направления подобной интеграции, где в качестве ключевых критериев выступает поиск целевой функции оптимизации производственной программы промышленных предприятий.

Представленные графовые методы основаны на предположении, что на одном предприятии должно быть произведено n -продуктов (например, товары химического производства). Для каждой пары продуктов известно, совместимы они или нет. Совместимость может быть определена набором характеристик, связанных с продукцией. Проблема состоит в группировании ее во взаимоисключающие и всеохватывающие подмножества. Подмножества должны быть кликами, а набор кликов должен минимизировать функцию стоимости. В данном случае существует два вида стоимости:

- 1) связанной с количеством кликов;
- 2) связанной с членством в каждой клике.

Общая модель учитывает две целевые функции.

Первая (f_1) минимизирует количество кликов, что соответствует уменьшению количества групп продуктов и, следовательно, количества переходов (перенастроек).

Вторая (f_2) целевая функция минимизирует стоимость материала, рассчитанную как максимальная стоимость в группе товаров, умноженная на количество.

Эти две цели не согласованы между собой. Минимизация f_1 предполагает создания как можно меньшего числа групп, что приводит

к увеличению размера самих групп. С другой стороны, большие группы имеют тенденцию ухудшать значение f_2 , так как для производства значительного количества продуктов будет использоваться более дорогое сырье и материалы. В таком случае целесообразно рассматривать эти цели иерархически, т.е. f_1 в качестве основной, а f_2 — вторичной.

Рассмотрим инвариант из 270 объектов химического производства, для которых варьируется размер и плотность графика. В технологии производства пентафталеваых лаков и полиэфирных смол изучено пять вариантов каждой комбинации плотности графа (0,05, 0,10 и 0,20) и количества вершин в диапазоне от 10 до 1000 (всего 18 значений n). В квадрате 1000×1000 сгенерированы n точек с координатами (x, y) , представляющими вершины на графике. Произведен расчет евклидова расстояния между каждой парой точек и определено максимальное расстояние.

Ребро (i, j) между вершинами i и j добавляется к графику, если расстояние между двумя вершинами меньше максимального расстояния, умноженного на плотность. Следовательно, число ребер в графе увеличивается со значением плотности.

В таблице 1 рассмотрен инвариант комбинации сырья (полуфабрикатов) для производства полиэфирной продукции (лаков и смол) (18 из 270).

Для повышения качества анализа скорректировано значение параметра диверсификации α , который управляет рандомизацией процедуры построения и находится в диапазоне от фиксированного до случайного значения. С фиксированными значениями для $m_s = 20$,

Таблица 1 — Инварианты комбинации сырья (полуфабрикатов) для производства полиэфирной продукции

Номер	N	Плотность	Вариант	Номер	N	Плотность	Вариант	Номер	N	Плотность	Вариант
1	10	0,05	1	7	50	0,05	2	13	150	0,05	4
2	15	0,10	2	8	60	0,10	3	14	200	0,10	5
3	20	0,20	3	9	70	0,20	4	15	300	0,20	1
4	25	0,05	4	10	80	0,05	5	16	400	0,05	3
5	30	0,10	5	11	100	0,10	1	17	500	0,10	4
6	40	0,20	1	12	120	0,20	3	18	1000	0,20	5

$t_s = 10n$, и $t_e = 2n$, получены $\alpha = 0; 0,5; 0,9; 0,99; 1$.

Большое значение α указывает на выбор коротких списков вариантов. Короткие списки являются достаточными с точки зрения обеспечения разнообразия, особенно по мере того, как графики увеличиваются в размерах. Это наблюдение совпадает с аналогичным опытом, описанным Х. Пачеко, Е. Альфаро, С. Касадо [6].

Задача формирования оптимальной группировки продуктов для оптимизации производственных процессов в условиях промышленных предприятий может рассматриваться как вариант ценологического планирования с дополнительными ограничениями и функцией вторичной цели. Поскольку в настоящее время методы решения обозначенной проблемы отсутствуют, проведено сравнение производительности ценологической модели оптимизации (ЦМО) [7] с современным уровнем распределения.

Обзор литературы показал [8], что разработка алгоритмов сосредоточена на решении задач построения графов, а также процедур, которые непосредственно касаются проектирования распределения продуктов. Такая процедура построения графа является меметическим алгоритмом (МА) [9]. В таблице 2 обобщены результаты сравнения с использованием среднего значения обеих целевых функций для показателя качества продукции.

Наиболее предпочтительные решения выделены жирным шрифтом. При сравнении средних значений целевой функции f_A и f_B процедур А и В среднее качество решения процедуры А выше, чем В, при условии, если $f_1A < f_1B$ или $f_1A = f_1B$ и $f_2A < f_2B$. Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что эти две процедуры оправданы для нахождения решения с партиями продукции, имеющей до 20 вершин и плотностью 0,05 и 0,10. Для случаев с 30–150 вершинами ценологический подход доминирует над меметическим в обеих целевых функциях. Меметический алгоритм способен находить решения, которые в среднем имеют лучшие значения f_1 , чем решения, найденные с помощью процедуры ЦМО в случаях с более чем 300 вершинами и плотностью 0,2. Предположительно, это связано с пробле-

мой окрашивания графа с более низкой плотностью, которая является результатом ЦМО с более высокой плотностью.

Поскольку МА не предназначен для адресации f_2 , то во всех случаях, когда $f_1MA < f_1ЦМО$ наблюдается, что $f_2MA > f_2ЦМО$. Другой способ суммировать результаты анализа заключается в подсчете количества процедур, получающих лучшее решение. Из 270 партий продукта ЦМО находит лучшее решение 184 раза. МА может найти такое решения только в 16 случаях. В оставшихся 70 случаях обе процедуры получают одинаковый результат.

Выявлено, что для МА требуется в два раза больше итераций при поиске оптимального варианта, чем ЦМО (табл. 2).

С целью сравнения производительности ЦМО с пакетом программного обеспечения Cplex рассчитана линейная одноцелевая модель, которая состоит из замены ограничения его линеаризованной версией. Целевая функция M рассчитывается по формуле:

$$M = n(\max_{i \in V} wi). \quad (1)$$

Может также быть представлена в виде:

$$f_3 = \sum_k yk + \sum_k wk. \quad (2)$$

Для расчета W_k добавлено следующее ограничение:

$$W_k \geq wi \cdot nk - (1 - xik)M \forall i, k. \quad (3)$$

Целевая функция f_3 отдает предпочтение решениям с минимальным количеством кликов. Второй элемент этой функции, т.е. сумма весов, выступает в качестве прерывателя связей для решений с одинаковым количеством кликов. Поскольку оптимальное их количество неизвестно, целесообразно установить верхнюю грань K , которая соответствует числу кликов в ценологическом подходе.

В таблице 3 приведены результаты расчетов на примере 120 вариантов продукции химической промышленности. В столбцах f_1 и f_2 показаны средние значения целевой функции, полученные каждым методом. Столбец «Экз.» отображает количество экземпляров, для которых можно найти хотя бы одно допусти-

Таблица 2 — Сравнение среднего значения целевых функций (рассчитано автором в среде IBM ILOG CPLEX Optimization Studio)

N	Плотность	ЦМО		Время	МА		N	Плотность	ЦМО		Время	МА	
		f_1	e_2		f_1	e_2			f_1	e_2		f_1	e_2
10	0,05	9,6	11,2	0,01	9,6	11,2	80	0,05	54,0	104,2	0,37	54,0	105,6
	0,10	8,8	11,2	0,01	8,8	11,2		0,10	32,2	115,0	0,54	32,2	125,4
	0,20	6,8	13,2	0,01	6,8	13,4		0,20	14,4	142,6	0,46	14,4	152,4
15	0,05	14,4	+16,8	0,01	14,4	+16,8	100	0,05	65,0	128,6	0,71	65,0	132,2
	0,10	12,0	18,0	0,01	12,0	18,0		0,10	36,0	154,8	0,90	36,2	167,8
	0,20	8,2	19,8	0,01	8,2	21,6		0,20	15,2	178,0	0,56	15,2	194,0
20	0,05	18,2	20,4	0,02	18,2	20,4	120	0,05	71,6	157,8	1,22	71,6	166,6
	0,10	16,2	21,0	0,02	16,2	21,0		0,10	37,0	195,2	1,84	37,0	207,8
	0,20	9,8	26,4	0,02	9,8	29,2		0,20	15,4	218,8	1,19	15,4	234,0
25	0,05	22,6	24,2	0,03	22,6	24,2	150	0,05	83,0	208,8	2,71	83,0	219,6
	0,10	18,2	28,8	0,02	18,2	29,2		0,10	40,8	249,2	3,03	41,0	265,6
	0,20	10,6	34,2	0,03	10,6	36,4		0,20	16,0	276,6	1,67	16,0	299,0
30	0,05	27,0	34,2	0,04	27,0	34,4	200	0,05	97,2	282,2	4,98	97,0	303,2
	0,10	21,0	38,2	0,04	21,0	40,6		0,10	42,2	346,0	5,27	42,8	368,0
	0,20	11,8	47,0	0,06	11,8	51,0		0,20	+16,8	369,8	4,59	+16,8	395,6
40	0,05	33,4	49,4	0,08	33,4	49,8	300	0,05	114	451,2	13,67	114,8	485,8
	0,10	24,2	54,6	0,06	24,2	55,4		0,10	48,6	534,6	15,87	49,4	569,6
	0,20	12,4	63,4	0,07	12,4	68,0		0,20	+17,6	569,8	6,45	17,4	599,0
50	0,05	39,8	57,0	0,13	39,8	58,0	400	0,05	128,4	635,6	27,82	129,4	676,8
	0,10	25,8	70,6	0,12	25,8	73,6		0,10	52,8	750,6	28,18	54,0	777,4
	0,20	14,0	79,4	0,12	14,0	89,8		0,20	18,0	780,2	13,11	+17,6	800,0
60	0,05	45,6	70,2	0,19	45,6	70,8	500	0,05	139,6	804,6	51,92	144	864,4
	0,10	29,6	86,2	0,25	29,6	92,8		0,10	54,0	958,4	44,29	55,4	984,0
	0,20	13,2	102,0	0,22	13,2	109,8		0,20	18,8	994,6	24,84	18,4	998,2
70	0,05	51,2	84,4	0,27	51,2	86,4	1000	0,05	172,4	1828,4	900,45	190,4	1871,0
	0,10	31,0	102,4	0,32	31,0	110,0		0,10	63,4	1957,6	199,03	62,8	1997,4
	0,20	14,0	116,4	0,30	14,0	132,6		0,20	21,2	1982,2	105,34	20,2	2000,0

мое решение. Столбец «Вариант» показывает сколько раз достигается оптимум.

Видно, что решение линейризованной модели с помощью готового программного обеспечения является предпочтительным мето-

дом для задач с количеством вершин до 60. Для более сложных комбинаций предпочтительней ценологический анализ.

В таблице 4 представлено сравнение качества решений для максимально возможно-

Таблица 3 — Сравнение оптимальности вариантов проектирования комбинаций химической продукции (120 объектов) (Значения включают только те случаи, для которых возможно решение) (рассчитано автором в среде IBM ILOG CPLEX Optimization Studio)

N	Плотность	ЦМО			Стандарт					ЦМО	Стандарт
		Экз.	f_1	e_2	Время	Экз.	f_1	f_2	Вариант		
10	0,05	9,6	11,2	0,01	5	9,6	11,2	5	0,10	0	0
	0,10	8,8	11,2	0,01	5	8,8	11,2	5	0,19	0	0
	0,20	6,8	13,2	0,01	5	6,8	13,2	5	0,13	0	0
15	0,05	14,4	+16,8	0,01	5	14,4	+16,8	5	0,56	0	0
	0,10	12,0	18,0	0,01	5	12,0	18,0	5	0,63	0	0
	0,20	8,2	19,8	0,01	5	8,2	19,8	5	0,39	0	0
20	0,05	18,2	20,4	0,02	5	18,2	20,4	5	2,05	0	0
	0,10	16,2	21,0	0,02	5	16,2	21,0	5	2,02	0	0
	0,20	9,8	26,4	0,02	5	9,8	26,4	5	1,47	0	0
25	0,05	22,6	24,2	0,03	5	22,6	24,2	5	5,81	0	0
	0,10	18,2	28,8	0,02	5	18,2	28,8	5	8,19	0	0
	0,20	10,6	34,2	0,03	5	10,6	34,2	5	4,24	0	0
30	0,05	27,0	34,2	0,04	5	27,0	34,2	5	482,55	0	0
	0,10	21,0	38,2	0,04	5	21,0	38,2	5	268,56	0	0
	0,20	11,8	47,0	0,06	5	11,8	47,0	5	18,72	0	0
40	0,05	33,4	49,4	0,08	5	33,4	49,4	4	53,30	0	0
	0,10	24,2	54,6	0,06	5	24,2	54,6	3	64,56	0	0
	0,20	12,4	63,4	0,07	5	12,4	63,4	4	178,13	0	0
50	0,05	39,8	57,0	0,13	5	39,8	57,0	0	–	0	0
	0,10	25,8	70,6	0,12	5	25,8	70,6	0	–	0	0
	0,20	14,0	79,4	0,12	5	14,0	79,4	4	490,08	0	0
60	0,05	45,6	70,2	0,19	5	45,6	70,2	0	–	0	0
	0,10	29,6	86,2	0,25	5	29,6	86,2	0	–	0	0
	0,20	13,2	102	0,22	5	13,2	102,0	2	1787,14	0	0
70	0,05	51,2	84,4	0,27	5	51,2	84,4	0	–	0	0
	0,10	31,0	102,4	0,32	5	31,0	102,8	0	–	1	0
	0,20	14,0	116,4	0,30	5	14,0	116,0	1	3302,73	0	1
80	0,05	54,0	104,2	0,37	5	54,0	105,6	0	–	2	0
	0,10	32,2	115,0	0,54	5	32,4	117,4	0	–	4	0
	0,20	14,4	142,6	0,46	4	14,0	141,8	4	1940,23	1	0
100	0,05	65,0	128,6	0,71	5	77,2	105,4	0	–	4	0
	0,10	36,0	154,8	0,90	5	38,2	160,6	0	–	5	0
	0,20	15,2	178,0	0,56	5	15,2	183,2	1	696,13	2	0
120	0,05	71,6	157,8	1,22	5	96,0	125,8	0	–	5	0

N	Плотность	ЦМО			Стандарт					ЦМО	Стандарт
		Экз.	f_1	e_2	Время	Экз.	f_1	f_2	Вариант		
	0,10	37,0	195,2	1,84	5	49,2	169,2	0	–	5	0
	0,20	15,4	218,8	1,19	3	+15,7	213,7	0	–	5	0
150	0,05	83,0	208,8	2,71	5	123,2	195,4	0	–	5	0
	0,10	40,8	249,2	3,03	5	53,2	257,2	0	–	5	0
	0,20	16,0	276,6	1,67	2	16,5	291,5	0	–	5	0
200	0,05	97,2	282,2	4,98	1	198,0	85,0	0	–	5	0
	0,10	42,2	346,0	5,27	1	98,0	50,0	0	–	5	0
	0,20	+16,8	369,8	4,59	0	–	–	0	–	5	0

Таблица 4 — Сравнение среднего качества решений рекомбинации ресурсов и оборудования для максимально возможного числа продукции

N	Плотность	ЦМО		Стандарт		N	Плотность	ЦМО		Стандарт	
		f_1	e_2	f_1	e_2			f_1	e_2	f_1	e_2
10	0,05	9,6	11,2	9,6	11,2	80	0,05	54,0	104,2	54,0	104,2
	0,10	8,8	11,2	8,8	11,2		0,10	32,2	115,0	33,0	112,2
	0,20	6,8	13,2	6,8	13,2		0,20	14,4	142,6	15,4	133,0
15	0,05	14,4	+16,8	14,4	+16,8	100	0,05	65,0	128,6	65,2	128,2
	0,10	12,0	18,0	12,0	18,0		0,10	36,0	154,8	37,4	149,4
	0,20	8,2	19,8	8,2	19,8		0,20	15,2	178,0	18,0	152,8
20	0,05	18,2	20,4	18,2	20,4	120	0,05	71,6	157,8	71,6	157,8
	0,10	16,2	21,0	16,2	21,0		0,10	37,0	195,2	39,8	178,8
	0,20	9,8	26,4	9,8	26,4		0,20	15,4	218,8	19,4	183,8
25	0,05	22,6	24,2	22,6	24,2	150	0,05	83,0	208,8	83,8	205,8
	0,10	18,2	28,8	18,2	28,8		0,10	40,8	249,2	46,8	216,4
	0,20	10,6	34,2	10,6	34,2		0,20	16,0	276,6	22,8	210,6
30	0,05	27,0	34,2	27,0	34,2	200	0,05	97,2	282,2	99,4	274,4
	0,10	21,0	38,2	21,0	38,2		0,10	42,2	346,0	49,4	295,0
	0,20	11,8	47,0	12,0	46,6		0,20	+16,8	369,8	24,2	310,2
40	0,05	33,4	49,4	33,4	49,4	300	0,05	114,0	451,2	119,2	424,0
	0,10	24,2	54,6	24,2	54,6		0,10	48,6	534,6	62,4	432,4
	0,20	12,4	63,4	12,4	63,4		0,20	+17,6	569,8	37,2	423,8
50	0,05	39,8	57,0	39,8	57,0	400	0,05	128,4	635,6	135,4	593,6
	0,10	25,8	70,6	26,0	69,2		0,10	52,8	750,6	75,8	549,2
	0,20	14,0	79,4	+14,8	72,8		0,20	18,0	780,2	45,2	568,8
60	0,05	45,6	70,2	45,6	70,2	500	0,05	139,6	804,6	156,2	697,8

N	Плотность	ЦМО		Стандарт		N	Плотность	ЦМО		Стандарт	
		f_1	e_2	f_1	e_2			f_1	e_2	f_1	e_2
	0,10	29,6	86,2	29,6	86,2		0,10	54,0	958,4	81,8	691,2
	0,20	13,2	102,0	13,4	100,8		0,20	18,8	994,6	46,6	738,6
70	0,05	51,2	84,4	51,2	84,4	1000	0,05	172,4	1828,4	220,0	1410,0
	0,10	31,0	102,4	31,4	100,6		0,10	63,4	1957,6	127,0	1259,6
	0,20	14,0	116,4	14,4	113,8		0,20	21,2	1982,2	–	–

го варианта производства продукции для рассматриваемого предприятия в рамках одного типа технологического производства. Виден противоречивый характер двух целевых функций в том смысле, что значительно лучшие значения f_2 возможны за счет ухудшения показателя f_1 .

Для анализа используется набор данных химического предприятия ФКП «Комбинат «Каменский», состоящий из 478 заявок. На первом этапе установлен порядок совместимости, который привел к графику с 3037 ребрами. Следовательно, этот реальный пример имеет плотность около 0,03. На рисунке 1 показаны изменения значения f_1 для лучшего решения, найденного в ходе поиска. Данные типичны

для ценологического распределения, где расчет математической идеальной формы оптимизирует качество наилучшего решения.

В результате получено решение со значениями целевой функции: $(f_1, f_2) = (208, 1242)$, которая демонстрирует потенциал снижения затрат предприятия, учитывая стоимость выполнения перенастроек, сокращение производственного цикла каждой партии продукции по отдельности так и в целом производственной программы. Предложенное решение соответствует максимальному количеству видов продукции равному 206.

Таким образом, можно сделать вывод, что, поскольку многие производственные процессы состоят из нескольких этапов производ-

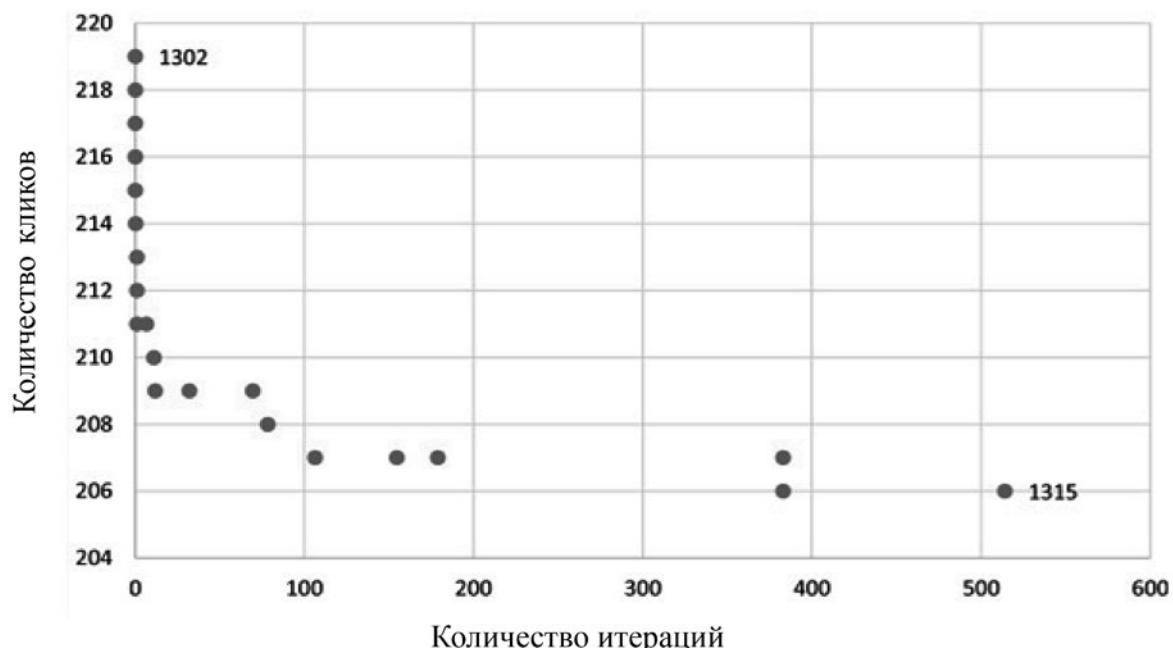


Рисунок 1 — Вариативность наилучшего решения для максимально возможного числа видов продукции

Figure 1 — Variability of the best solution for the maximum possible number of product types

ства, первичный процесс включает значительную долю общих производственных издержек. Предложенная модель направлена на снижение затрат путем группировки конечных продуктов. Основная идея заключается в создании групп товаров, которые могут быть изготовлены из одинаковых основных сырьевых компонентов.

Группировка продуктов обеспечивает непрерывность производства путем минимизации прерываний. Снижение затрат, связанных с меньшим количеством перенастроек, является существенным, поскольку оно включает увеличение времени производства и снижения количества ремонтов машин и несчастных случаев на производстве. Наряду с этим, подобная группировка повышает эффективность логистики, упрощая управление запасами и операции поставщиков. В контексте графов, модель стремится минимизировать количество групп (клик), а также учитывает конкретные производственные затраты, связанные

с группировкой продуктов, т.е. стоимостью сырья и отходов.

Предложенное решение проблемы группировки продуктов для оптимизации производственных процессов в условиях промышленных предприятий не развито. Тем не менее, показана связь поставленной задачи оптимизации с проблемой разделения клика и проблемой раскраски графа, возникающей в результате удаления второй целевой функции (то есть той, которая связана с весом каждой клики). Чтобы найти оптимальные решения для задач с сотнями продуктов, предложена процедура решения, основанная на ограниченных конструкциях и поиске ограничений.

Представленный ценологический подход к решению достаточно гибок, поскольку позволяет использовать общесистемные ограничения и учитывать дополнительные показатели стоимости, т.е. может рассматриваться как решение двухцелевой задачи оптимизации.

Список источников

- [1] Кузьбожев Э. Н., Бабич Т. Н. Применение теории графов в планировании // Экономический анализ: теория и практика. 2007. № 8. С. 8–16.
- [2] Шилов А. А. О собственно теории графов и ее составе // Вестник Тамбовского университета. Серия: Технические и естественные науки. 2007. № 1. С. 138–152.
- [3] Околелова Э. Ю. Модель управления внешнеэкономической деятельностью предприятий на основе теории графов // Вестник Воронежского технического университета. 2011. № 11-3. С. 89–93.
- [4] Девидина С. Н. Применение теории графов для моделирования архитектуры региональной сети передачи данных // Научные ведомости БелГУ. 2015. Вып. 36/1, № 19. С. 170–176.
- [5] Германчук М. С., Лемтюжникова Д. В, Лукьяненко В. А. Метаэвристические алгоритмы для многоагентных задач маршрутизации // Проблемы управления. 2020. № 6. С. 3–13.
- [6] Pacheco J., Alfaro E., Casado S. A GRASP method for building classification trees // Expert Systems with Applications. 2012. No. 39. P. 38–47.
- [7] Кузьминов А. Н., Коростиева Н. Г., Филиппов С. В. Развитие моделей управления устойчивостью промышленных предприятий // Вопросы регулирования экономики. 2016. Т. 7, № 3. С. 65–78.
- [8] Попов Н. Е., Кузьминов А. Н. Группировка продуктов для оптимизации производственных процессов в условиях промышленных предприятий // Вестник Южно-Российского государственного технического университета. Серия: Социально-экономические науки. 2022. Т. 15, № 2. С. 163–172.
- [9] Moalic L., Gondran A. Variations on memetic algorithms for graph coloring problems // Journal of Heuristics, Springer. 2018. Vol. 24(1). P. 1–24.

References

- [1] Kuzbozhev E. N., Babich T. N. Application of graph theory in planning. *E`konomicheskij analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*. 2007; (8):8–16. (In Russ.).
- [2] Shilov A. A. On graph theory proper and its composition. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Texnicheskie i estestvenny`e nauki = Bulletin of the Tambov University. Series: Technical and Natural Sciences*. 2007;(1):138–152. (In Russ.).
- [3] Okolelova E. Yu. Model of management of foreign economic activity of enterprises based on graph theory. *Vestnik Voronezhskogo texnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh Technical University*. 2011;(11-3):89–93. (In Russ.).

[4] Devitsina S. N. Application of graph theory for modeling the architecture of a regional data transmission network. *Nauchny`e vedomosti BelGU = Scientific Bulletin of BelSU*. 2015;(19):170–176. (In Russ.).

[5] Germanchuk M. S., Lemtyuzhnikova D. V., Lukyanenko V. A. Metaheuristic algorithms for multi-agent routing problems. *Problemy` upravleniya = Management Problems*. 2020;(6):3–13. (In Russ.).

[6] Pacheco J., Alfaro E., Casado S. A GRASP method for building classification trees. *Expert Systems with Applications*. 2012;(39):38–47.

[7] Kuzminov A. N., Korostieva N. G., Filippov S. V. Development of sustainability management models of industrial enterprises. *Voprosy` regulirovaniya e`konomiki = Issues of economic regulation*. 2016;(7):65–78. (In Russ.).

[8] Popov N. E., Kuzminov A. N. Grouping of products for optimization of production processes in the conditions of industrial enterprises. *Vestnik Yuzhno-Rossijskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: Social`no-e`konomicheskie nauki = Bulletin of the South Russian State Technical University. Series: Socio-economic Sciences*. 2022;(15):163–172. (In Russ.).

[9] Moalic L., Gondran A. Variations on memetic algorithms for graph coloring problems // *Journal of Heuristics*, Springer. 2018;24(1):1–24.

Информация об авторе

Н. Е. Попов — соискатель, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ).

Information about the author

N. E. Popov — the applicant, Rostov State University of Economics (RINE).

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена после рецензирования 22.06.2022; принята к публикации 24.06.2022.

The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 22.06.2022; accepted for publication 24.06.2022.