

Научная статья  
УДК 338.33  
DOI: 10.17213/2075-2067-2022-2-163-172

## ГРУППИРОВКА ПРОДУКТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Никита Евгеньевич Попов<sup>1</sup>✉, Александр Николаевич Кузьминов<sup>2</sup>*

*<sup>1,2</sup>Ростовский государственный экономический университет (РИНХ),  
Ростов-на-Дону, Россия*

*<sup>1</sup>nikitarop@yandex.ru✉, ORCID: 0000-0002-8538-8328, AuthorID РИНЦ: 2826-9460*

*<sup>2</sup>mr.azs@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9400-4285, AuthorID РИНЦ: 672964*

**Аннотация.** *Целью исследования* является обзор научных подходов к проблеме оптимизации производственного процесса и снижения времени на переналадку оборудования как фактора, повышающего конкурентоспособность продукции и обеспечивающего устойчивое развитие промышленного предприятия.

*Методологическую базу исследования* представляют общенаучные методы: анализ, обобщение, приемы систематизации и классификации.

**Результаты исследования.** *Сокращение временного отрезка при переходе от производства одного вида продукта к другому имеет решающее значение для удовлетворения спроса потребителей при минимальных затратах. В статье рассмотрено производство металлургической и химической продукции в контексте поиска групп продуктов, имеющих схожесть характеристик, которые позволяют минимизировать затраты на выполнение производственной программы и удовлетворить спрос на данные виды продукции.*

**Перспективы исследования** *заключаются в повышении эффективности использования сырьевых составляющих, производственных мощностей и технологического оборудования*

**Ключевые слова:** *метаэвристика, комбинаторная оптимизация, производство продукции, производственная программа, клик, граф*

**Для цитирования:** *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. <http://dx.doi.org/10.17213/2075-2067-2022-2-163-172>.*

Original article

## GROUPING OF PRODUCTS TO OPTIMIZE PRODUCTION PROCESSES IN INDUSTRIAL ENTERPRISES

*Nikita E. Popov<sup>1</sup>✉, Alexander N. Kuzminov<sup>2</sup>*

*<sup>1,2</sup>Rostov State University of Economics (RSUE), Rostov-on-Don, Russia*

<sup>1</sup>*nikitapop@yandex.ru*✉, ORCID: 0000-0002-8538-8328, AuthorID RSCI: 2826-9460

<sup>2</sup>*mr.azs@mail.ru*, ORCID: 0000-0002-9400-4285, AuthorID RSCI: 672964

**Abstract.** *The purpose of the study is to review scientific approaches to the problem of optimizing the production process and reducing the time for equipment changeover, as a factor that increases the competitiveness of products and ensures the sustainable development of an industrial enterprise.*

*The methodological basis of the research is represented by general scientific methods: analysis, generalization, methods of systematization and classification.*

**Research results.** *Reducing the time interval during the transition from the production of one type of product to another is crucial to meet consumer demand at minimal cost. The article considers the production of metallurgical and chemical products in the context of the search for groups of products with similar characteristics that allow minimizing the costs of implementing the production program and meeting the demand for these types of products.*

*The prospects of the study are to increase the efficiency of the use of raw materials, production facilities and technological equipment*

**Keywords:** *metaheuristics, combinatorial optimization, production, production program, click, graph*

**For citation:** *Popov N. E., Kuzminov A. N. Grouping of products to optimize production processes in industrial enterprises // Bulletin of the South Russian State Technical University. Series: Socio-economic Sciences. 2022; 15(2): 163–172. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17213/2075-2067-2022-2-163-172>.*

**Введение.** Эффективное планирование производства представляет интерес для менеджмента в силу усиления конкуренции и роста неопределенности спроса. Снижение затрат имеет решающее значение для увеличения прибыли и обеспечения устойчивого развития предприятия. Первые систематические подходы к планированию производства известны с середины 20-х годов прошлого века. В отечественных и зарубежных исследованиях предполагалось, что временем перенастройки оборудования для выпуска различных изделий можно пренебречь или учесть его во времени производства. Однако разнообразие продуктов, производимых на отдельных предприятиях, увеличивается, а необходимость минимизации времени, затрачиваемого на переналадку оборудования, стала очевидной.

Большой интерес к изучению времени, затрачиваемого на производство продукции и на перенастройку оборудования как отдельных временных рамок технологического процесса, а также влияние на длительность технологического цикла потери времени на переналадку появился в середине 1970-х годов [1].

Решению указанной проблемы посвящены различные исследования (табл. 1).

В представленной статье рассмотрены принципы оптимальной группировки промышленных продуктов в процессе производства различных по своей природе и технологии получения товаров, таких как химическая продукция — полиэфирная ненасыщенная смола и продукты металлургического производства — металлические рулоны.

Например, в процессе производства изделий из металла с проблемами эффективного комплектования партий в операциях периодического отжига на стадии холодной прокатки производства стали сталкиваются большинство крупных металлургических компаний мира. Задача следующая: выбрать стальные рулоны из набора имеющихся, чтобы сформировать партии для отжига в доступных печах и выбрать верную заготовку для каждой печи отжига.

Например, ряд теоретиков представляют состав для литья как набор зарядов, где заряд представляет собой партию расплавленной стали (т.е. преобразованную железную руду) [10]. Загрузки в отливке имеют одинаковые

марки стали и, следовательно, чтобы минимизировать время переналадки (т.е. максимизировать эффективность производства), целесообразно настроить отливки с наибольшим количеством загрузок. Подобный подход включает в себя этап предварительной группировки, который пытается упростить проблему путем определения совместимых заказов (на основе правил перехода по марке стали). Клики находятся в графе совместимости, где грань между двумя порядками представляет их совместимость, которая должна быть упорядочена в одном и том же приведении. Однако этот шаг только пытается идентифицировать клики, а не решить проблему их разделения.

При работе с большим количеством продуктов в условиях, когда решения о планировании должны учитывать зависящие от пос-

ледовательности время переключения режимов и переналадки оборудования, кластеризация или группировка с учетом ключевых атрибутов продукта может значительно снизить размерность матрицы управления [11].

Настройка производственных систем используется для сохранения конкурентоспособности на рынке с изменяющимся спросом на продукцию и возрастающей конкуренцией. Массовая настройка приводит к растущему числу вариантов деталей/продуктов, росту числа операций, последовательность которых может быть использована для группировки аналогичных вариантов, то есть операций со схожими операционными потоками. Варианты могут быть сгруппированы по объемному сходству, чтобы увеличить загрузку машины. Известен комплексный коэффициент по-

Таблица 1  
Table 1

**Группировка подходов к оптимизации времени технологического цикла  
(составлено автором)**  
**Grouping of approaches to optimizing the time of the technological cycle  
(compiled by the author)**

Авторы	Содержание подхода
Англани А., Грико А. [2]	Использование интеллектуального анализа правил ассоциации для кластеризации заказов. Результаты обеспечивают сравнение производительности для различных проблем между их подходом и ранее существовавшей эвристикой
Фрамимам Дж., Паз П. [3]	Обеспечение максимизации эффективности производственной программы и распределения ресурсов посредством объединения типов продуктов со сходными потребностями в обработке в семействах
Лю Ц., Лин С., Инг К. [4]	Обеспечение эффективного планирования производства посредством алгоритма кластеризации временных рядов и создания семейства продуктов из тысяч наименований
Уддина М., Шанкерб К. [5]	Применение генетических алгоритмов для решения проблемы одновременного назначения технологических маршрутов деталей и машин с целью минимизировать перемещение. При этом рассматриваются несколько маршрутов для каждой детали
Неилвал К., Гупта Д., Шарма С. [6]	Организация производственных ячеек путем объединения продуктов в группы со сходными свойствами
Алахверди А. [7]	Кластеризация потребителей при планировании производства в условиях ограниченных производственных и транспортных возможностей
Мартынов Р. С. [8]	Время переналадки оборудования – фактор, влияющий на объемы незавершенного производства
Казимиров Д. Ю., Исаченко А. С. [9]	Метод кластеризации представлен двухходовым объединением, позволяющим наглядно представить сформировавшиеся кластеры и определить отношения между ними

добыча, который учитывает операции, потоки, объем и является алгоритмом кластеризации с критерием средней связи для создания групп вариантов в производственной среде [12].

Для проектирования на практике используются различные методы, среди которых особое внимание принадлежит технологиям сетевого моделирования. Проблеме разделения кликов посвящено множество исследований. И. А. Бадеха и П. В. Ролдугин определяют задачу разбиения клика на графе с весами ребер. Задача состоит в том, чтобы найти разбиение вершин на непересекающиеся множества таким образом, чтобы эти множества образовывали клики и сумма их веса ребер была максимальной [13].

А. Н. Целых, В. С. Васильев и Л. А. Целых проанализировали кластеризацию вершин полного реберно-взвешенного графа. Цель состояла в том, чтобы максимизировать сумму весов краев в пределах клики. Прикладное применение этого подхода включает группировки в гибких производственных системах, биологии [14] и ценологии [15].

Р. Е. Илларионов определил задачу разделения клика как нахождение минимального количества подмножеств таким образом, чтобы каждое подмножество являлось кликой [16].

Производственные процессы, как правило, состоят из нескольких этапов: добыча или производство сырьевых компонентов, преобразование в промежуточные полуфабрикатные продукты (первичный процесс) и производство товарной продукции (вторичный процесс). Производство полиэфирной продукции является примером такого процесса. Сначала производят сырьевые материалы (малеиновый и фталевые ангидриды, различные виды гликолей, стирол и т. д.). Эти материалы участвуют в промежуточных реакциях при синтезе высоковязкой основы материала. Далее основа растворяется и доводится до необходимых технических показателей. При этом трехфазный процесс характерен не только для производства химической продукции.

В качестве другого примера можно рассмотреть металлургическую промышленность, а именно — производство стальных рулонов. Сначала добывается сырье (руда). Далее из минералов производится сплав, который формуется в слябы. При последующем производственном процессе с помощью

ленточного стана слябы перерабатываются в рулоны холодной прокатки.

Характеристики товарного продукта определяют его стоимость, затраты на производство и распределение в течение жизненного цикла. Это обуславливает определенные сложности и необходимость учета ряда особенностей, характерных для рассматриваемых продуктов химической и металлургической промышленности. При производственном процессе стоимость остановки и повторного запуска основного оборудования высока. Эти затраты включают трудозатраты на настройку и подготовку оборудования для производства продукции с различными характеристиками, затраты на электроэнергию, связанные с перезапуском оборудования, а также увеличения временного цикла технологического процесса.

Таким образом, уменьшение количества переходов от производства одного вида продукции к другому имеет весомое значение при оптимизации себестоимости продукции и способствует решению ряда возможных негативных последствий:

— действия, связанные с подготовкой сложного технологического оборудования связаны с привлечением рабочего персонала. Это увеличивает вероятность получения травм и причин выхода из строя оборудования, обусловленного человеческим фактором;

— управление запасами целесообразно оптимизировать, сократив количество товарной продукции на складе. При этом упрощается контроль за хранением продукции и эффективно используется высвободившееся складское пространство.

Чтобы создать сопоставления промышленных продуктов с товарной продукцией «один ко многим», необходимо сгруппировать продукты на основе набора соответствующих характеристик. Например, при изготовлении стальных рулонов характеристиками могут быть ширина, вес, марка и срок изготовления каждой катушки. При изготовлении полиэфирной продукции целесообразно использовать такие характеристики, как марка, время технологического цикла, физико-механические показатели, наличие отдельных видов гликолей в рецептуре.

В качестве параметра при изготовлении стальных рулонов необходимо рассмотреть ширину каждой катушки. Предположим, что

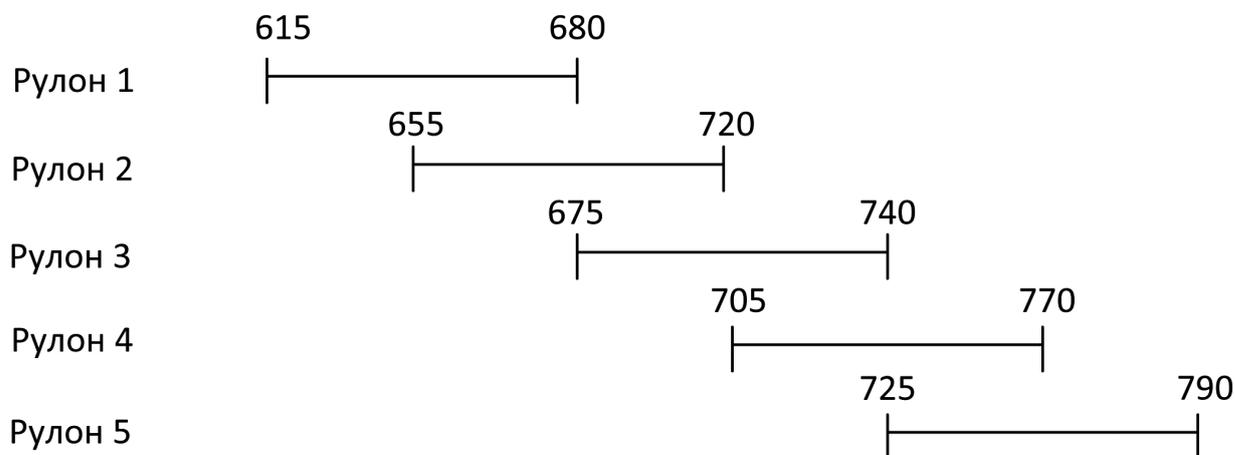
необходимо изготовить пять типов стальных рулонов шириной 600, 640, 660, 690 и 710 мм. Ленточный стан уменьшает ширину стальной плиты от 15 до 80 мм. Следовательно, стальная плита шириной от 615 до 680 мм необходима для изготовления рулона шириной 600 мм. Для производства четырех других рулонов требуются стальные слябы шириной 655–720, 675–740, 705–770 и 725–790 мм. На рисунке 1 показаны диапазоны стальных слябов, связанных с каждой катушкой.

Диапазоны заготовок могут быть использованы для определения пар «совместимых» стальных катушек. Две стальные катушки совместимы, если их диапазоны перекрываются, т.е. являются общими для обоих. Диапазон перекрытия определяет ширину стальной плиты, необходимую для производства совместимых рулонов. Таким образом, рулоны 1 и 2 совместимы, потому что их диапазон ширины плиты перекрывается. Эти две катушки могут быть изготовлены из слябы шириной от 655 до 680 мм. Кроме того, рулоны 1 и 3 перекрываются и могут быть изготовлены из стальной плиты толщиной от 675 до 680 мм. Аналогичным образом рулоны 2 и 3 перекрываются и могут быть изготовлены из слябы толщиной от 675 до 720 мм. Поскольку рулоны 1, 2 и 3 являются попарно совместимыми, все они могут быть изготовлены из одной стальной плиты с шириной от 675 до 680 мм, что является диапазоном перекрытия всех пар. Ни катушка 4, ни катушка 5 не могут быть добавлены в группу, потому что они не совместимы попарно с ка-

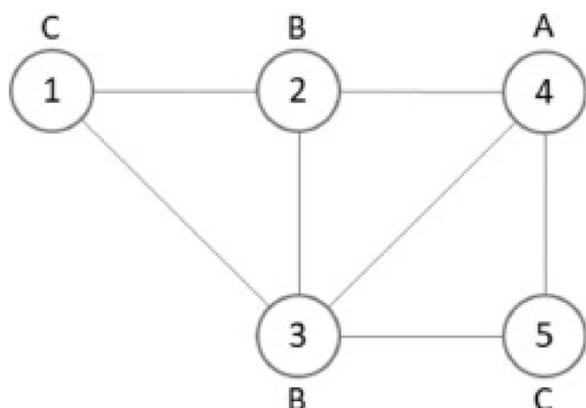
тушкой 1. Однако они совместимы между собой и, следовательно, могут образовывать свою собственную группу. Для изготовления катушек 4 и 5 можно использовать стальную плиту шириной от 725 до 770 мм.

Вместо того чтобы использовать пять различных стальных слябов, для производства пяти катушек нужны только два. Использование двух вместо пяти стальных плит приводит к снижению затрат и другим преимуществам, упомянутым выше. В данном примере рассмотрена только ширина слябы. В реальных условиях парная совместимость должна учитывать и иные характеристики. Хотя с группировкой катушек связаны некоторые преимущества, необходимо проанализировать соотношение между этими преимуществами и дополнительными затратами. Дополнительные расходы связаны с увеличением лома и использованием более высоких марок стали. В нашем примере, если используются взаимозаменяемые стальные слябы, то отходы представляют собой полосу 15 мм независимо от полученного рулона. Это связано с тем, что для рулонов 1–5 будут использоваться стальные плиты размером 615, 655, 675, 705 и 725 мм соответственно. С другой стороны, если используется предложенная выше группировка, то отходы составляют 75, 35 и 15 мм для рулонов 1, 2 и 3 соответственно. Лом для катушек 4 и 5 будет 35 и 15 мм соответственно.

При распределении «один ко многим» стальная плита должна иметь сортность, соответствующую максимальному классу в группе рулонов. Это означает, что некото-



**Рис. 1.** Диапазон стальных плит для пяти типов рулонов  
**Fig. 1.** Range of steel plates for five types of rolls



**Рис. 2.** График совместимости с марками стали  
**Fig. 2.** Graph of compatibility with steel grades

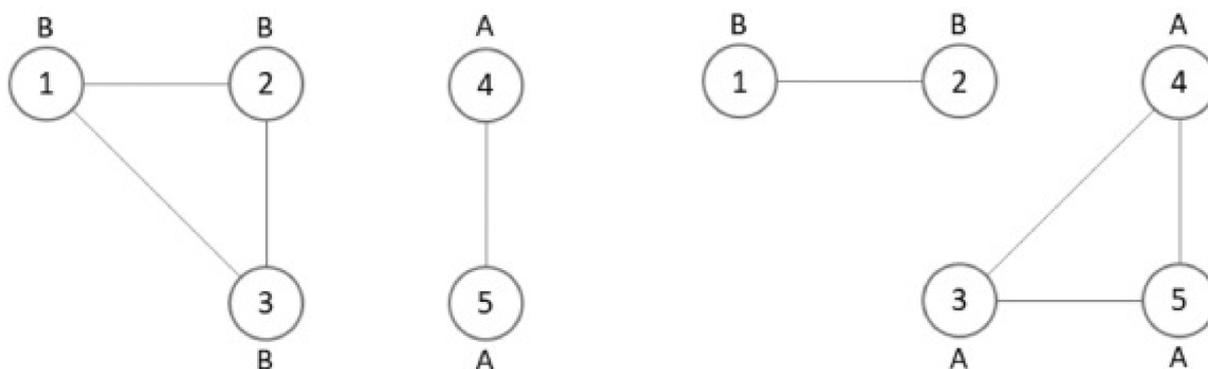
рые из катушек будут иметь марку стали, которая выше, чем требуется. Чтобы проиллюстрировать это, необходимо ввести графическое представление парной совместимости. В частности, рулоны представлены узлами, а парная совместимость представлена ребрами. На рисунке 2 показан набор из пяти рулонов, а их совместимость представлена ребрами, которые их соединяют.

На рисунке 2 буква рядом с узлами обозначает марку стали. Справедливо предположить, что затраты на изготовление различны и составляют 3, 2 и 1 для классов А, В и С соответственно. Следовательно, класс А выше, чем В, а класс В выше, чем С. На рисунке 3 показаны две возможные группы рулонов. Марки стали соответствуют самой высокой марке в группе.

Группировка в левой части рисунка 3 использует три стальных сляба класса В и две плиты класса А. Таким образом, общая стоимость составляет  $2 \times 3 + 3 \times 2 = 12$ . Для группировки на правой стороне рисунка 3 используются три стальные плиты марки А и две плиты марки В общей стоимостью  $3 \times 3 + 2 \times 2 = 13$ . Очевидно, что при прочих равных условиях предпочтение будет отдано группировке, обозначенной в левой части рисунка.

Цель производственной программы — изготовление стальных рулонов с минимальными издержками. Стоимость минимизируется путем нахождения наименьшего числа попарно совместимых групп, которая сводится к минимуму благодаря использованию слябов, максимально приближенных к минимальным требованиям. С учетом графика совместимости проблема минимизации изменений (игнорирование затрат, связанных с маркой стали) известна как проблема разделения кликов.

То, что представлено совместимой группой, известно как клик в теории графов. Формально клика графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  есть множество вершин в графе и  $E$  представляет собой множество ребер, представляет собой подмножество  $W$  из  $V$  таким образом, что для каждой пары вершин в  $W$  существует ребро  $E$ . Задача разбиения на клики состоит в том, чтобы найти наименьшее количество кликов в графе, чтобы каждая вершина графа принадлежала только одной клике. Разбиение клика графа  $G$  эквивалентно раскраске графа дополнения  $G'$ , где каждая вершина (ребро) в  $G$  соответствует ребру (вершине) в  $G'$ . Раскраска графа относится к проблеме нахождения наименьшего



**Рис. 3.** Две возможные группировки катушек  
**Fig. 3.** Two possible groupings of coils

количества цветов таким образом, что каждой вершине графа назначается цвет. Ни одна пара соединенных вершин не имеет такой же цвет. Проблема разделения клики и стоимость клики, определяемой произведением максимальной стоимости узла и размера клики, в литературе не рассматривалась.

Данный подход упрощает структуру затрат, возникающих в процессе прокатки изделий. В частности, не рассматривается стоимость производства, связанная с увеличением количества рулонов, используемых для выполнения заказов. Стоимость рулона не зависит от веса и ширины заготовки. Стоимость увеличивается с количеством рулонов, поэтому для порядка заданного веса целесообразно сделать рулоны максимально тяжелыми (в пределах допустимого диапазона) и таким образом выполнить заказ с наименьшим количеством рулонов.

Например, существуют два заказа на общую массу 1320 тонн. Заказ А предназначен для катушек в диапазоне от 10 до 12 тонн. За-

каз В — для катушек в диапазоне от 9 до 11 тонн. Если заказы выполняются отдельно, то для минимизации количества витков заказ А будет выполнен с 110 катушками по 12 тонн, а заказ В будет выполнен с 120 катушками по 11 тонн. Вместо этого, чтобы избежать перехода, необходимо сгруппировать заказы и выполнить их, используя катушки по 11 тонн. В этом случае общее количество катушек увеличится на 10, что приведет к увеличению производственных затрат.

На рисунке 4 представлен фронт Парето, который сгенерирован для одного из их набора заказов.

**Заключение.** В статье рассмотрены различные подходы к проблеме разделения кликов. Предложена модель двухцелевой оптимизации, в которой сгенерирована граница Парето с целью минимизации как количества кликов, так и производственных затрат. Это было сделано с помощью многоцелевого эвристического оптимизационного кода,

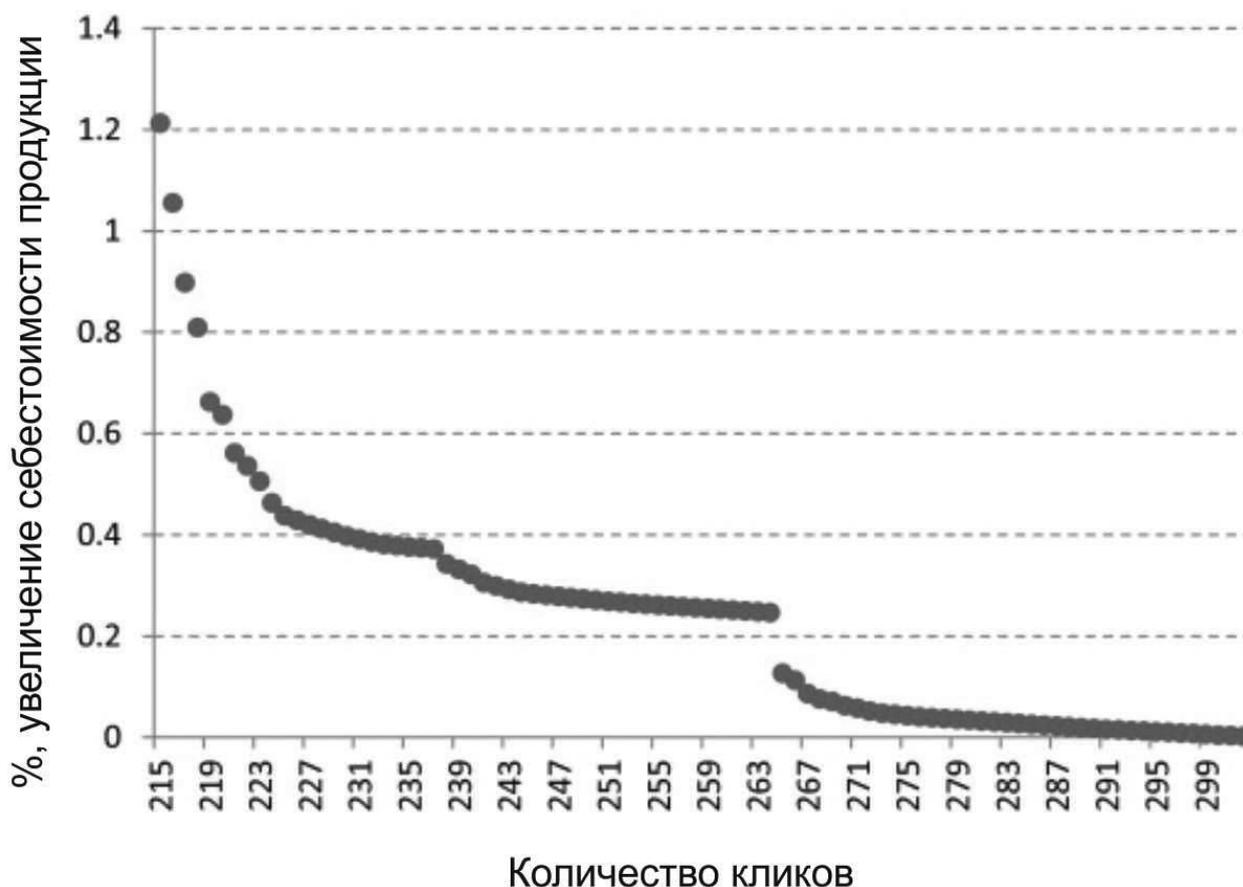


Рис. 4. Аппроксимация фронта Парето для набора заказов  
Fig. 4. Approximation of the Pareto front for a set of orders

который адаптирован для производственной задачи. Качество полученного результата целесообразно рассматривать с точки зрения снижения себестоимости производства изделий. Данный подход применим для различных отраслей использования.

### Список источников

1. Panwalkar S., Dudek R., Smith M. Sequencing Research and the Industrial Scheduling Problem // Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications, 1973. P. 29–38.

2. Anglani A., Grieco A., Guerriero E., Musmanno R. Robust scheduling of parallel machines with sequence-dependent set-up cost // European Journal of Operational Research. 2005. Vol. 161. P. 704–720.

3. Framimam J., Paz P. The 2-stage assembly flow shop scheduling problem with total completion time: Efficient constructive heuristic and metaheuristic // Computer & Operation Research. 2017. Vol. 12. P. 237–246.

4. Lu C., Lin S., Ying. K. Minimization of total tardiness on unrelated parallel machines with sequence- and machine-dependent setup times under due date constraints // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 53(4). P. 353–361.

5. Uddina M., Shankerb K. Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm // International Journal of Production Economics. 2002. Vol. 76. P. 219–228.

6. Nailwal K., Gupta D., Sharma S. Fuzzy bi-criteria scheduling on parallel machines involving weighted flow time and maximum tardiness // Cogent Mathematics. 2015. Vol. 2. P. 33–38.

7. Allahverdi A. Third Comprehensive Survey on Scheduling Problems with Setup Times // European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 4. P. 345–378.

8. Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2011. №4(38). С. 87–90.

9. Казимиров Д.Ю., Исаченко А.С. Формирование последовательности запуска

в производство изделий одновременной кластеризацией по технологическим признакам и классам деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. №7. С. 24–36.

10. Costa A., Cappadonna F., Fichera S. Minimizing the total completion time on a parallel machine system with tool changes // Computer and Industrial Engineering. 2016. Vol. 91. P. 290–301.

11. Diana R., Souza S., Filho M. A Variable Neighborhood Descent as ILS local search to the minimization of the total weighted tardiness on unrelated parallel 81 machines and sequence dependent setup times // Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 66. P. 191–198.

12. Navaei J., ElMaraghy H. Grouping product variants based on alternate machines for each operation // Procedia CIRP. 2014. №17. P. 61–66.

13. Бадеха И. А., Ролдугин П.В. Построение покрытий рёбер графа кликами // Прикладная дискретная математика. 2009. №1. С. 95–96.

14. Целых А.Н., Васильев В.С., Целых Л.А. Кластеризация ориентированных взвешенных знаков графов на основе функционала потенциальной энергии упругой деформации с использованием когнитивных моделей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. №3. С. 33–45.

15. Кузьминов А.Н., Ансари М., Яровой Н.А. Ценологический ландшафт устойчивости предприятия // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). 2018. №4. С. 37–49.

16. Илларионов Р.Е. Двухфазный алгоритм решения задачи о клике для разреженных графов большой размерности // Молодой ученый. 2016. №3. С. 4–8.

### References

1. Panwalkar S., Dudek R., Smith M. Sequencing Research and the Industrial Scheduling Problem // Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications, 1973. P. 29–38.

2. Anglani A., Grieco A., Guerriero E., Musmanno R. Robust scheduling of parallel machines with sequence-dependent set-up cost // European Journal of Operational Research. 2005. Vol. 161. P. 704–720.

3. Framimam J., Paz P. The 2-stage assembly flow shop scheduling problem with total completion time: Efficient constructive heuristic and metaheuristic // *Computer & Operation Research*. 2017. Vol. 12. P. 237–246.
4. Lu C., Lin S., Ying. K. Minimization of total tardiness on unrelated parallel machines with sequence-and machine-dependent setup times under due date constraints // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 53(4). P. 353–361.
5. Uddina M., Shankerb K. Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm // *International Journal of Production Economics*. 2002. Vol. 76. P. 219–228.
6. Nailwal K., Gupta D., Sharma S. Fuzzy bi-criteria scheduling on parallel machines involving weighted flow time and maximum tardiness // *Cogent Mathematics*. 2015. Vol. 2. P. 33–38.
7. Allahverdi A. Third Comprehensive Survey on Scheduling Problems with Setup Times // *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 4. P. 345–378.
8. Martynov R. S. Sokrashhenie vremeni perenaladki oborudovaniya kak faktor povysheniya jeffektivnosti ispol'zovaniya material'nyh resursov na predpriyatii [Reduction of equipment changeover time as a factor of increasing the efficiency of material resources use at the enterprise]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo social'no-jekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Socio-Economic University]. 2011; 4(38): 87–90. (In Russ.).
9. Kazimirov D. Ju., Isachenko A. S. Formirovanie posledovatel'nosti zapuska v proizvodstvo izdelij odnovremennoj klasterizaciej po tehnologicheskim priznakam i klassam detalej [Formation of the sequence of launching products into production by simultaneous clustering according to technological characteristics and classes of parts]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2016; (7): 24–36. (In Russ.).
10. Costa A., Cappadonna F., Fichera S. Minimizing the total completion time on a parallel machine system with tool changes // *Computer and Industrial Engineering*. 2016. Vol. 91. P. 290–301.
11. Diana R., Souza S., Filho M. A Variable Neighborhood Descent as ILS local search to the minimization of the total weighted tardiness on unrelated parallel 81 machines and sequence dependent setup times // *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. 2018. Vol. 66. P. 191–198.
12. Navaei J., ElMaraghy H. Grouping product variants based on alternate machines for each operation // *Procedia CIRP*. 2014. №17. P. 61–66.
13. Badeha I. A., Roldugin P. V. Postroenie pokrytij rjober grafa klikami [Construction of edge coverings of a graph by cliques]. *Prikladnaja diskretnaja matematika* [Applied discrete mathematics]. 2009; (1): 95–96. (In Russ.).
14. Celyh A. N., Vasil'ev V. S., Celyh L. A. Klasterizacija orientirovannyh vzveshennyh znakov grafov na osnove funkcionala potencial'noj jenergii uprugoj deformacii s ispol'zovaniem kognitivnyh modelej [Clustering of oriented weighted signs of graphs based on the potential energy functional of elastic deformation using cognitive models]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki* [News of the SFU. Technical sciences]. 2018; (3): 33–45. (In Russ.).
15. Kuz'minov A. N., Ansari M., Jarovoj N. A. Cenologicheskij landshaft ustojchivosti predpriyatija [Technological landscape of enterprise sustainability]. *Journal of Economic Regulation (Voprosy regulirovanija jekonomiki* [Issues of economic regulation]). 2018; (4): 37–49. (In Russ.).
16. Illarionov R. E. Dvuhfaznyj algoritm reshenija zadachi o klike dlja razrezhennyh grafov bol'shoj razmernosti [A two-phase algorithm for solving the clique problem for sparse graphs of large dimension]. *Molodoj uchenyj* [Young Scientist]. 2016; (3): 4–8. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.01.2022; одобрена после рецензирования 25.01.2022; принята к публикации 15.02.2022.

The article was submitted on 21.01.2022; approved after reviewing on 25.01.2022; accepted for publication on 15.02.2022.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



**Попов Никита Евгеньевич** — соискатель, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ).  
Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 69

**Nikita E. Popov** — Candidate, Rostov State University of Economics (RSUE).  
69 B. Sadovaya st., Rostov-on-Don, Russia



**Кузьминов Александр Николаевич** — доктор экономических наук, профессор кафедры «Инновационный менеджмент и предпринимательство» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), главный научный сотрудник Института развития технологий цифровой экономики.  
Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 69

**Alexander N. Kuzminov** — Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Innovation Management and Entrepreneurship of Rostov State University of Economics (RSUE), Chief Researcher at the Institute for the Development of Digital Economy Technologies.  
69 B. Sadovaya st., Rostov-on-Don, Russia

### **Вклад авторов:**

**Попов Н. Е.** — *практическая экспериментальная работа; обработка данных; написание исходного текста; итоговые выводы.*

**Кузьминов А. Н.** — *научное руководство; концепция исследования; доработка текста.*

### **Contribution of the authors:**

**Popov N. E.** — *practical experimental work; data processing; writing the source text; final conclusions.*

**Kuzminov A. N.** — *scientific leadership; research concept; revision of the text.*