

УДК 658.512.6+658.514.4

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.008)

Алгоритм оптимизации процессов формирования производственного расписания предприятий позаказного производства

И.Р. Харсекин, Е.А. Кузнецова✉, И.О. Князева

*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация
kuznetsova_ea@mail.sibsau.ru✉*

Резюме. В статье рассматривается проблема простоев производственных предприятий с повременной оплатой труда. Нерациональное использование ресурсов ведет к потерям. Решить данную проблему можно посредством автоматизации процессов формирования производственного расписания. В представленной работе авторами используется терминология теории расписаний. В результате проведенных исследований, разработан алгоритм, который является решением задачи дискретной оптимизации посредством эвристических алгоритмов. Алгоритм предполагает случайный выбор операции на основе критериев с проверкой свободного в данный временной период ресурса и назначением его на соответствующую операцию. Алгоритм выполняется циклично до тех пор, пока не будут задействованы все операции или ресурсы на заданный временной промежуток. Построение алгоритма опирается на вычисленный рекорд, превышение которого ведет к прекращению реализации алгоритма, и его повторному запуску. Описанный алгоритм по истечению количества итераций, заданных пользователем, визуализирует решение, представляя его в виде диаграммы Ганта, для обеспечения диспетчеризации производственных процессов. Полученные авторами результаты позволят создать систему интеллектуального формирования производственного расписания и внедрить ее в существующую систему управления производственным предприятием, занимающимся производством изделий из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: теория расписания, комбинаторная оптимизация, эвристические алгоритмы, дискретное программирование.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке федеральной программы академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Харсекин И.Р., Кузнецова Е.А., Князева И.О. Алгоритм оптимизации процессов формирования производственного расписания предприятий позаказного производства. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1299> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.008

Process optimization algorithm for forming the production schedule of custom production enterprises

I.R. Kharsekin, Y.A. Kuznetsova✉, I.O. Knyazeva

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation
kuznetsova_ea@mail.sibsau.ru✉*

Abstract. This article deals with the problem of downtime in production enterprises with time-based wages. Irrational allocation of resources leads to losses. This problem can be solved through the automation of production schedule process formation. In the presented paper, the authors use the terminology of schedule theory. As a research result, an algorithm that is a solution to the problem was

developed. The algorithm assumes a random selection of an operation based on the criteria; the resource availability in a given time period is checked and then assigned to the appropriate operation. The algorithm is executed cyclically until all operations or resources are involved for a given time period. The construction of the algorithm is based on a calculated record, the excess of which leads to the termination of algorithm implementation and its re-launch. The described algorithm, after the expiration of the number of iterations specified by the user, visualizes the solution through the Gantt chart to ensure dispatching of production processes. The results obtained by the authors will make it possible to form a system for the intelligent formation of a production schedule and introduce it into the existing management system of a manufacturing enterprise engaged in the production of products from polymer composite materials.

Keywords: schedule theory, combinatorial optimization, heuristic algorithms, discrete programming.

Acknowledgements: the research was carried out with the support of the federal program of academic leadership “Priority-2030”.

For citation: Kharsekin I.R., Kuznetsova Y.A., Knyazeva I.O. Process optimization algorithm for forming the production schedule of custom production enterprises. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1299> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.008 (In Russ.).

Введение

Проблема простоев является значимой проблемой современных производственных предприятий с повременной оплатой труда. К причинам возникновения простоев можно отнести неэффективное распределение ресурсов в графике производственного процесса, а также воздействие множества возмущающих факторов, требующих оперативного принятия управленческих воздействий в рамках заданных ограничений. Применение эффективных методов составления производственного расписания позволит решить данную проблему.

В этой связи перед исследователями ставится задача разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений по составлению производственного расписания с применением методов оптимизации с последующим встраиванием в существующую систему управления бизнес-процессами предприятий мелкосерийного производства.

В рамках решения данной задачи используется терминология теории расписаний, относящейся к специальному разделу дискретной математики [1]: ресурс, работа (операция) и процесс. Под ресурсами в рамках задачи понимаются трудозатраты, требуемые для выполнения технологических операций, их исполнители (работники) и технологическое оборудование. Технологическая операция – действия работника и / или оборудования над изготавливаемым изделием в рамках технологического процесса. Технологическая операция является основной единицей производственного планирования. Технологический процесс представляет собой определенную последовательность технологических операций для получения нужного результата (заготовки, сборочного элемента или готового изделия) с заданными ресурсами.

На данном этапе исследования при составлении производственного расписания важно учитывать:

- а) требуемые заказчиком сроки выполнения поступающего в производство заказа, а также его приоритетность;
- б) ресурсы, необходимые для выполнения технологических операций, в том числе и время выполнения операции, которое задается при составлении технологического процесса;

- в) время использования ресурсов в виде исполнителей технологических операций ограничивается продолжительностью рабочей смены;
- г) приоритетность выполнения поступающих в производство заказов;
- д) в рамках одного технологического процесса технологические операции могут выполняться строго последовательно;
- е) если по условиям технологического процесса работающее технологическое оборудование не требует постоянного присутствия работников, то выполнение операций посредством оборудования не зависит от рабочего графика работника;
- ж) при выполнении условия (е) работники и технологическое оборудование могут работать параллельно над разными технологическими операциями в рамках разных технологических процессов;
- з) операции, к выполнению которых уже приступили, должны быть завершены в первую очередь.

Таким образом, предполагается получить алгоритм, позволяющий эффективно распределять ресурсы в производство и выполнять заказы в срок.

Материалы и методы

Одна из ключевых задач при планировании производства – оптимальное распределение технологических процессов предприятия и задействованных в этих процессах ресурсов. Вопрос эффективного распределения рабочих процессов с установлением временных границ выполнения процесса и затрачиваемых при этом ресурсов рассматривается в рамках составления производственного расписания.

Составление производственного расписания является сложной задачей для человека, особенно, когда число ресурсов и процессов крайне велико. Поэтому для решения задачи составления производственного расписания используют специализированные инструменты, представленные программными компонентами [2] и алгоритмами.

Задачи планирования и оптимального распределения ресурсов являются NP-трудными [1]. Это означает, что нет алгоритмов, которые способны решать класс задач календарного планирования за полиномиальное время.

На практике часто используют эвристические алгоритмы [3], жадные алгоритмы [3], графовые алгоритмы [4], а также генетические алгоритмы [5] и нейросети [6-7].

Алгоритм, который предлагают авторы данной статьи, является решением многокритериальной задачи с применением эвристического алгоритма при выборе технологических операций.

Метод, предложенный авторами, перекликается с исследованиями, освещенными в работах [8-10]. Отличием данного исследования от существующих является апробация алгоритма составления производственного расписания на реальном производственном предприятии с применением реальных данных, предполагающая его дальнейшее внедрение в имеющуюся систему управления производством.

Постановка задачи построения производственного расписания

На производственном предприятии, занимающемся производством изделий из полимерных композиционных материалов, существует потребность во внедрении системы автоматического формирования оптимального производственного расписания. План работ формируется из поступающих в производство заказов в виде технологических процессов из определенной последовательности технологических операций.

Производственный цех располагает следующими ресурсами: сотрудники и технологическое оборудование. Сотрудники – это специалисты различных профессий и квалификаций, таких как: мастер производственного отдела, заместитель мастера, старший техник, техник, техник 2 категории, инженер по качеству, начальник отдела контроля качества. Технологическое оборудование, такое как станки ЧПУ, фрезерные-гравировальные станки, термокамера, сушильный шкаф.

Требуемые ресурсы для выполнения технологического процесса определяются на этапе его разработки: определяется последовательность технологических операций и ресурсы для их выполнения (человеческие, временные, технические). Для каждого поступающего заказа определяется его приоритетность в зависимости от сроков договора.

Необходимо разработать алгоритм, определяющий такую комбинацию выполнения технологических операций, которая не перегружает ресурсы в соответствии с рабочим графиком, не выходит за границу сроков сдачи каждого заказа и является оптимальным решением. В случае любого изменения данных (поступление нового заказа, изменение исполнителей и т. д.) необходимо повторно составлять комбинацию с учетом уже выполненных операций.

Данная задача относится к разделу дискретного программирования. Решение поставленной задачи предлагается осуществить посредством эвристических алгоритмов.

Постановка целевой функции

В поставленной задаче можно выделить критерии, влияющие на результат составления оптимального производственного расписания, например: порядок операций, приоритет операций, трудозатраты и др. Сведем критерии в общую целевую функцию, и таким образом будет решаться многокритериальная задача. Для нахождения решения сведем задачу оптимизации от многокритериальной к однокритериальной методом линейной свертки. Предполагается, что все критериальные функции линейно упорядочены по важности, в порядке возрастания их индексов. Тогда введем целевую функцию следующего вида:

$$f(U) = w_1 f_1(u_1) + w_2 f_2(u_2) + \dots + w_n f_n(u_n), \quad (1)$$

где U – множество, состоящее из u_n критериев,

$f_n(u_n)$ – функция, определяющее значение критерия,

w_n – весовой коэффициент,

n – количество критериев.

Вероятность выбора каждой операции будет определяться как:

$$p_a = \frac{f_a(U_a)}{\sum_{i=1}^k f_i(U_i)}, \quad (2)$$

где a – номер текущей выбранной операции,

k – количество выбираемых операций на текущий шаг.

Вероятности p_a , вычисленные для операций, используются для последующего выбора операций путем генерации дискретных случайных величин с заданным законом распределения. Каждое значение p_a разбивает диапазон от 0 до 100 на интервалы и затем генерируется случайная величина в том же диапазоне, попадающая в один из интервалов.

Выбранные операции используются для составления последовательности операций, которое должно удовлетворять условию:

$$o_{m1} \rightarrow o_{m2} \rightarrow \dots \rightarrow o_{mp}, \quad (3)$$

где m – номер технологического маршрута, состоящий из p операций,

o – технологическая операция.

При составлении последовательности необходимо учитывать доступность ресурсов на их выполнение и на основе этого определять даты начала и окончания выполнения операции. Под доступностью ресурсов подразумевается, что время работы каждого ресурса не должно выходить за рамки его рабочего графика.

Весовые коэффициенты необходимо проставить опытным путем, а также с учетом практической задачи, при этом для весовых коэффициентов должно выполняться условие:

$$w_{a1} + w_{a2} + \dots + w_{am} = 1. \quad (4)$$

Запишем в качестве примера, как будет определяться значение для $f_1(U_1)$:

$$f_1(U_1) = w_{11}f_{11}(u_{11}) + w_{12}f_{12}(u_{12}) + w_{13}f_{13}(u_{13}). \quad (5)$$

Условия задаются следующим образом:

1) u_{11} – это приоритет операции: высокий, средний, низкий в зависимости от срочности выполнения заказа. Функция f_{11} имеет следующую зависимость:

$$y_{a1} = \begin{cases} 0, & \text{если } u_{a1} = -1 \\ q_1, & \text{если } u_{a1} = 0, \\ 1, & \text{если } u_{a1} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

где q_1 – параметр для приоритета операции, задаваемый пользователем (по умолчанию равен 0,5).

2) u_{12} – это приоритет того, что операция в процессе выполнения должна быть завершена. Функция f_{12} имеет следующую зависимость:

$$y_{a2} = \begin{cases} 0, & \text{при } u_{a2} = 0 \\ 1, & \text{при } u_{a2} = 1 \end{cases}. \quad (7)$$

3) u_{a3} – это трудозатраты, заложенные на выполнение технологических операций. Функция f_{13} имеет следующую зависимость:

$$y_{a3} = \begin{cases} \frac{q_2}{u_{a3}}, & \text{при } u_{a3} > q_2, \\ 1, & \text{при } 0 \leq u_{a3} \leq q_2 \end{cases}, \quad (8)$$

где q_2 – параметр для минимального времени трудозатрат, задаваемый пользователем (по умолчанию равен 0,5 часам).

Один из критериев выбора технологической операции – выбор операции с наименьшими трудозатратами (Рисунок 1).

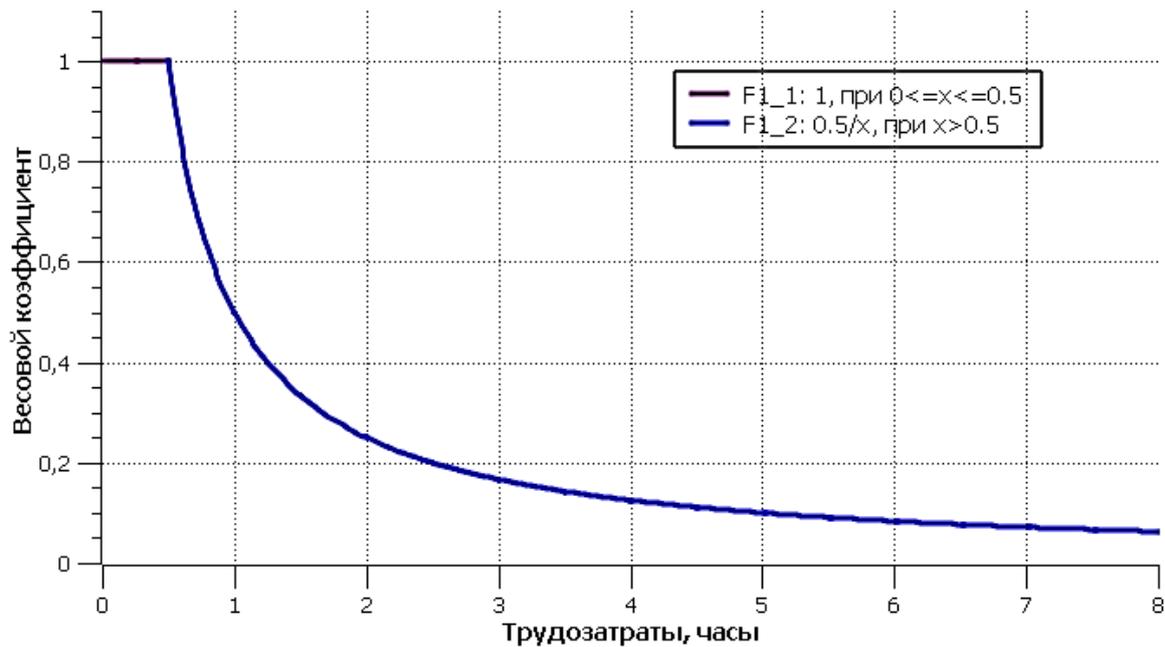


Рисунок 1 – График определения веса критерия трудозатрат
Figure 1 – Graph for determining the weight of the labor cost criterion

Из графика видно, что чем больше необходимо потратить времени на операцию, тем меньше значение функции от этого критерия влияет на значение целевой функции (1).

Таким образом, исследователями составлена математическая модель критериев, которые требуется включить в алгоритм на данном этапе исследования.

Результаты

Алгоритм предполагает, что перед его запуском все входные данные заранее определены. В качестве входных данных используются заказы в производство в виде технологических процессов. В технологических процессах уже определены требуемые ресурсы, последовательность технологических операций, дата начала выполнения работ, а в договорах определены сроки сдачи заказов и их приоритетность.

В общем виде, работу алгоритма можно представить в виде графового дерева (Рисунок 2).

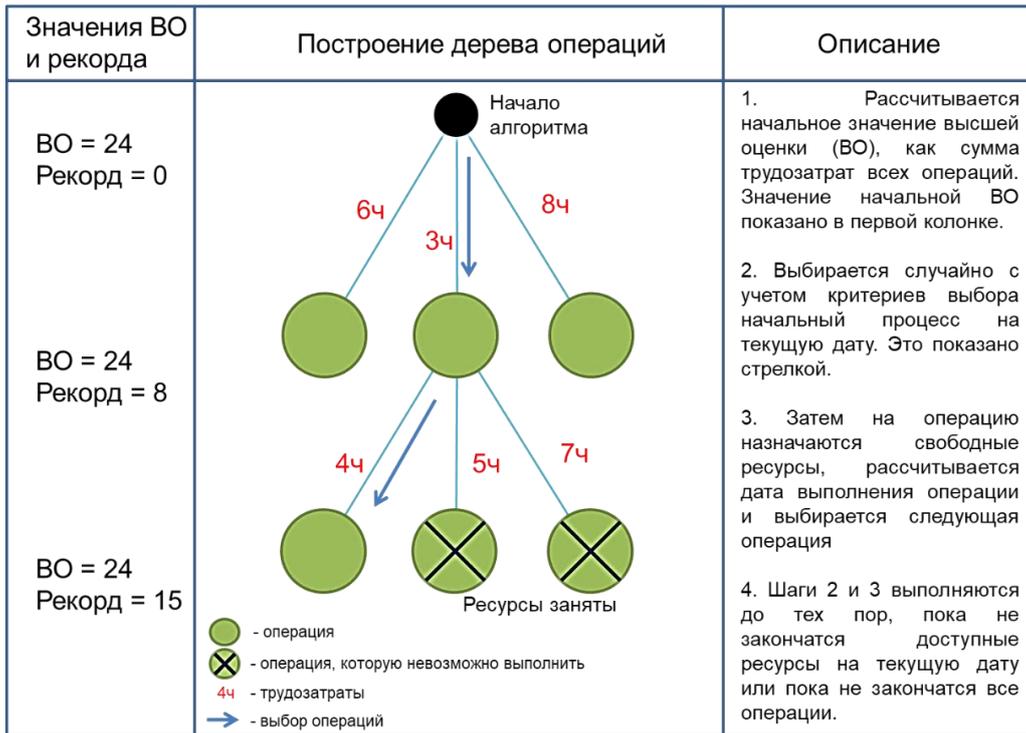


Рисунок 2 – Схема построения дерева операций на один день с описанием работы алгоритма

Figure 2 –Diagram for building a tree of operations for one day with a description of the algorithm

В начале работы алгоритма случайным образом на основе критериев выбирается операция, затем проверяется, какой из ресурсов свободен в данный день и после назначается на эту операцию. Вторым шагом по такому же принципу выбирается следующая операция, и алгоритм повторяется до тех пор, пока не будут задействованы все операции или не использованы все ресурсы на текущую дату. В случае использования всех ресурсов текущей даты, алгоритм повторяет построение дерева на следующий день.

Важным шагом в начале работы алгоритма является вычисление рекорда. Рекордом называется переменная, которая хранит значение о всех трудозатратах операций. До начала построения дерева вычисляется верхняя оценка (ВО), которая является самой дальней датой окончания всех партий. В ходе выполнения алгоритма значение ВО изменяется в зависимости от вычисленного рекорда нового расписания. Верхняя оценка – это оценка, которая вычисляется как разность дат между самой поздней операцией и текущей датой [11].

В случае, если при проходе дерева по операциям ВО стала больше рекорда, т. е. вышла за верхнюю границу, то построение дерева прекращается и алгоритм выполняется заново. Если ВО меньше рекорда, то рекорду присваивается значение ВО.

Построение дерева повторяется заданное пользователем количество раз (стандартно 100 шагов), и программа возвращает оптимально составленное расписание. Таким образом, алгоритм находит одно из наиболее оптимальных расписаний для выполнения заказов в производстве.

Предположим, что описанная выше задача имеет исходные данные, представленные в Таблице 1. При этом срок сдачи работ по договору до 31.12.2022 г., приоритет заказа - средний.

Таблица 1 – Используемые данные в рамках выполнения 1 заказа в производство
Table 1 – Data used in the execution of 1 production order

№ процесса	Операция	Трудозатраты	Исполнители	Оборудование
1	1	0:40:00	Техник 1	Фрезерно-гравировальный станок
	2	0:20:00	Техник 2	Сушильный шкаф
	3	2:30:00	Техник 2	Сушильный шкаф
	4	1:30:00	Техник 2	Термокамера
	5	0:20:00	Инженер по качеству	-
	6	0:20:00	Инженер по качеству	-
2	1	2:00:00	Техник 2	Станок ЧПУ
	2	0:40:00	Техник 1	Фрезерно-гравировальный станок
	3	0:20:00	Техник 2	Термокамера
	4	2:30:00	Техник 2	Термокамера
	5	1:30:00	Техник 2	Сушильный шкаф
	6	0:20:00	Инженер по качеству	-
	7	0:20:00	Инженер по качеству	-
3	1	2:00:00	Техник 3	Станок ЧПУ
	2	0:40:00	Техник 1	Фрезерно-гравировальный станок
	3	0:20:00	Техник 3	Термокамера
	4	2:30:00	Техник 3	Термокамера
	5	1:30:00	Техник 3	Сушильный шкаф
	6	0:20:00	Инженер по качеству	-
	7	0:20:00	Инженер по качеству	-

Для последующего встраивания в систему управления бизнес-процессами предприятия производственное расписание визуализировано посредством диаграммы Ганта.

Для заданных исходных данных диаграмма Ганта выстроится следующим образом (Рисунок 3).

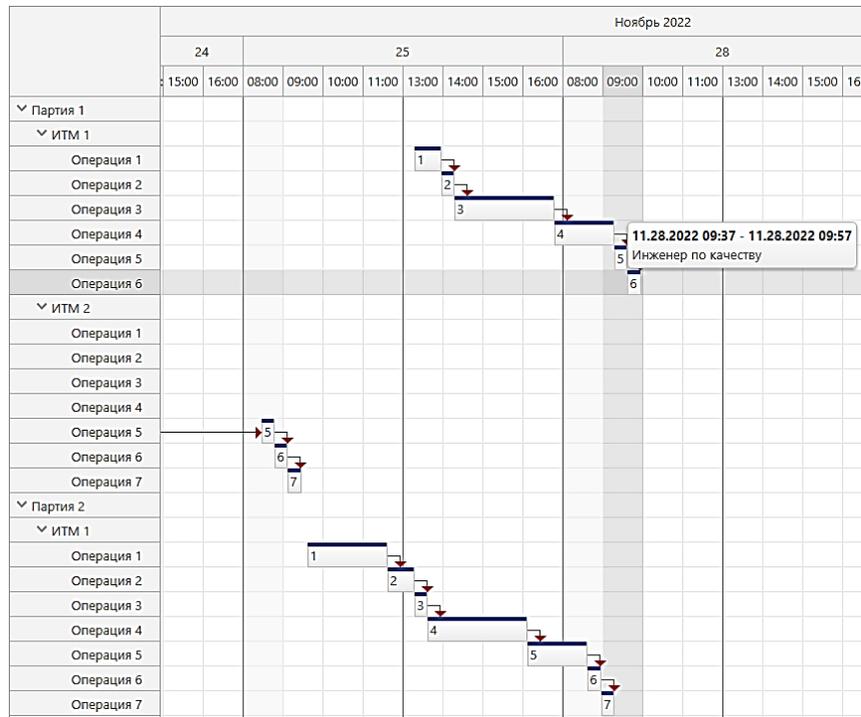


Рисунок 3 – Диаграмма Ганта
Figure 3 – Gantt chart

Диаграмма Ганта позволяет упростить процесс диспетчеризации заказов в производстве мастером производственного отдела.

Заключение

Основным результатом выполнения работы в части разработки алгоритма построения производственного расписания стал прототип программного продукта, позволяющий решить задачу по составлению оптимального производственного расписания для предприятия, удовлетворяющий всем критериям, выделенным авторами при постановке целевой функции.

Уже сейчас алгоритм может успешно использоваться для частичного выполнения диспетчерских функций мастером производственного отдела производственного предприятия.

В дальнейшем планируется совершенствование прототипа с возможностью полного выполнения им функции составления производственного расписания с применением методов интеллектуального планирования и прогнозирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. *Теория расписаний. Задачи и алгоритмы*. М.: Дрофа; 2011. 144 с.

2. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний. *Труды Института системного программирования РАН*. 2017;29(3):247–296.
3. Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж. *Структуры данных и алгоритмы*. М.: Издательский дом «Вильямс»; 2000. 384 с.
4. Stastny J., Skorpil V., Balogh Z., Klein R. Job shop scheduling problem optimization by means of graph-based algorithm. *Applied Sciences*. 2021;11(4). Доступно по: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1921/xml>. DOI: 10.3390/app11041921 (дата обращения: 07.12.2022).
5. Сиркин Т.В., Чернышова А.П., Мартынов П.А., Морозов А.Д. Разработка автоматизированной системы составления и оптимизации расписания занятий. *Молодой ученый*. 2020;317(27):65–71.
6. Zang Z., Wang W., Song Y., Lu L., Li W., Wang Y., Zhao Y. Hybrid deep neural network scheduler for job-shop problem based on convolution two-dimensional transformation. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019;2019:1–19. Доступно по: <https://www.hindawi.com/journals/cin/2019/7172842/>. DOI: 10.1155/2019/7172842 (дата обращения: 07.12.2022).
7. Вех Р. *Implementing a process scheduler using neural network technology*. Extended abstract of masters's thesis. Netherlands; 2008. 65 p. Доступно по: <https://theses.ubn.ru.nl/handle/123456789/168> (дата обращения: 11.12.2022).
8. Samira C. *Monte Carlo tree search for job shop scheduling problems*. Extended abstract of masters's thesis. Austria; 2017. 90 p. Доступно по: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/2220344/AC14530216n01.pdf> (дата обращения: 11.12.2022).
9. Geirsson E. *Rollout algorithms for job-shop scheduling*. Iceland, University of Iceland; 2012. 53 p. Доступно по: https://skemman.is/bitstream/1946/11956/1/Einar_Geirsson_ritgerd.pdf (дата обращения: 13.12.2022).
10. Lenstra J.K., Shmoys D.B., Tardos E. Approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. *Mathematical Programming*. 1987;46(1–3):217–224. Доступно по: https://www.researchgate.net/publication/4355176_Approximation_Algorithms_for_Scheduling_Unrelated_Parallel_Machines. DOI: 10.1109/SFCS.1987.8 (дата обращения: 13.12.2022).
11. Колесов Н.В., Толмачева М.В. Составление расписаний решения задач в конвейерных вычислительных системах. *Информационно-управляющие системы*. 2005;(5):16–21.

REFERENCES

1. Lazarev A.A., Gafarov E.R. *Theory of schedules. Tasks and algorithms*. Moscow, Drofa; 2011. 144 p. (In Russ.).
2. Anichkin A.S., Semenov V.A. An object-oriented framework for software implementation of schedule theory applications. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2017;29(3):247–296. (In Russ.).
3. Akho A., Khopkroft Dzh., Ul'man Dzh. *Data structures and algorithms*. Moscow, Izdatel'skii dom "Vil'yams"; 2000. 384 p. (In Russ.).
4. Stastny J., Skorpil V., Balogh Z., Klein R. Job shop scheduling problem optimization by means of graph-based algorithm. *Applied Sciences*. 2021;11(4). Available from:

- <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1921/xml>. DOI: 10.3390/app11041921 (accessed on 07.12.2022).
5. Sirkin T.V., Chernyshova A.P., Martynov P.A., Morozov A. D. Development of an automated system for compiling and optimizing the schedule of classes. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2020;317(27):65–71. (In Russ.).
 6. Zang Z., Wang W., Song Y., Lu L., Li W., Wang Y., Zhao Y. Hybrid deep neural network scheduler for job-shop problem based on convolution two-dimensional transformation. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019;2019:1–19. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/cin/2019/7172842/>. DOI: 10.1155/2019/7172842 (accessed on 07.12.2022).
 7. Bex P. *Implementing a process scheduler using neural network technology*. Extended abstract of masters's thesis. Netherlands; 2008. 65 p. Available from: <https://theses.ubn.ru.nl/handle/123456789/168> (accessed on 11.12.2022).
 8. Samira C. *Monte Carlo tree search for job shop scheduling problems*. Extended abstract of masters's thesis. Austria; 2017. 90 p. Available from: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/2220344/AC14530216n01.pdf> (accessed on: 11.12.2022).
 9. Geirsson E. *Rollout algorithms for job-shop scheduling*. Iceland, University of Iceland; 2012. 53 p. Available from: https://skemman.is/bitstream/1946/11956/1/Einar_Geirsson_ritgerd.pdf (accessed on 13.12.2022).
 10. Lenstra J.K., Shmoys D.B., Tardos E. Approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. *Mathematical Programming*. 1987;46(1–3):217–224. Available from: https://www.researchgate.net/publication/4355176_Approximation_Algorithms_for_Scheduling_Unrelated_Paralle_Machines. DOI: 10.1109/SFCS.1987.8 (accessed on 13.12.2022).
 11. Kolesov N.V., Tolmacheva M.V. Scheduling of problem solving in pipeline computing systems. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2005;(5):16–21. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Харсекин Иван Романович, магистрант кафедры Информатики и вычислительной техники, программист, процессный аналитик Научной лаборатории «Системная инженерия и цифровизация», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.
e-mail: xxx-1525@mail.ru

Ivan Romanovich Kharsekin, Graduate Student, the Department of Informatics and Computer Engineering, Programmer, Process Analyst at System Engineering and Digitalization Scientific Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation.

Кузнецова Евгения Александровна, магистр кафедры Системного анализа и исследования операций, и.о. заведующего, научный сотрудник Научной лаборатории «Системная инженерия и цифровизация», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.
e-mail: kuznetsova_ea@mail.sibsau.ru

Yevgeniya Aleksandrovna Kuznetsova, Master's Student, the Department of System Analysis and Operations Research, Acting Head, Research Fellow at System Engineering and Digitalization Scientific Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation.

ORCID: [0000-0002-3559-8394](https://orcid.org/0000-0002-3559-8394)

Князева Ирина Олеговна, аспирант кафедры Системного анализа и исследования операций, процессный аналитик Научной лаборатории «Системная инженерия и цифровизация», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: knio95@mail.ru

ORCID: [0000-0001-6632-0670](https://orcid.org/0000-0001-6632-0670)

Irina Olegovna Knyazeva, Postgraduate Student, the Department of System Analysis and Operation Research, Process Analyst at System Engineering and Digitalization Scientific Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 25.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 10.02.2023.

The article was submitted 25.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 10.02.2023.