

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПОРЯДКОМ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

О.М. Демиденко¹, А.И. Якимов², Е.М. Борчик², Е.А. Якимов², Д.А. Денисевич²

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Белорусско-Российский университет, Могилев

SOLVING THE PROBLEM OF ORDER FULFILLMENT MANAGEMENT OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

O.M. Demidenko¹, A.I. Yakimov², E.M. Borchik², E.A. Yakimov², D.A. Denisevich²

¹Francisk Skorina Gomel State University

²Belarusian-Russian University, Mogilev

Аннотация. Рассматривается производственный процесс выполнения заказов с параметрами, требующими переналадки оборудования. Задача определения оптимальной стратегии переналадки производственного оборудования является задачей оптимизации, которая сформулирована как задача коммивояжера. При решении такой задачи узлами графа являются заказы, дугами – переналадки с известной стоимостью при переходе от одного заказа к другому. Критерий оптимизации – минимальная общая стоимость переналадок оборудования. На основе матрицы стоимостей переналадок оборудования при выполнении заказов с известными параметрами проведены исследования решения задачи с помощью генетического алгоритма. Даны примеры оценки общей стоимости переналадок для заказов, имеющих несколько параметров с разными уровнями. Представлены шаги реализации генетического алгоритма для решения поставленной задачи, показаны результаты экспериментов.

Ключевые слова: промышленное предприятие, заказы с параметрами, переналадка оборудования, оптимизация, задача коммивояжера, полносвязный граф, генетический алгоритм.

Для цитирования: Решение задачи управления порядком выполнения заказов промышленного предприятия / О.М. Демиденко, А.И. Якимов, Е.М. Борчик, Е.А. Якимов, Д.А. Денисевич // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 1 (58). – С. 86–92. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_86. – EDN: CAFDUQ

Abstract. The production process of fulfilling orders with parameters that require readjustment of equipment has been studied. The problem of determining the optimal strategy for readjustment of production equipment is an optimization problem, which is formulated as a traveling salesman problem. When solving this problem, the nodes of the graph are orders, the arcs are changeovers with known cost when moving from one order to another. The optimization criterion is the minimum total cost of equipment changeovers. Based on the matrix of the cost of equipment changeovers during the execution of orders with known parameters, the research of the problem solution with the help of a genetic algorithm was carried out. The examples are given for estimating the total cost of changeovers for orders with several parameters with different levels. The implementation steps of the genetic algorithm for solving the problem are presented, and the results of the experiments are shown.

Keywords: industrial enterprise, orders with parameters, equipment changeover, optimization, traveling salesman problem, fully connected graph, genetic algorithm.

For citation: Solving the problem of order fulfillment management of an industrial enterprise / O.M. Demidenko, A.I. Yakimov, E.M. Borchik, E.A. Yakimov, D.A. Denisevich // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 1 (58). – P. 86–92. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_86 (in Russian). – EDN: CAFDUQ

Введение

В статье рассматривается производственный процесс последовательного выполнения заказов, которые характеризуются множеством параметров. Такими параметрами заказа могут быть, например, цвет продукции, размеры, вес, форма и др. Для каждого параметра заказа предусматриваются уровни (например, для цвета – красный, белый, желтый, зеленый и др.) и определяются матрицы стоимостей переналадок производственного оборудования при переходе от одного уровня к другому.

Переналадка оборудования – это изменение настроек или компонентов производственного оборудования для переключения между производством разных типов продукции. Переналадка может включать в себя замену инструментов, установку новых программных настроек или комбинацию этих и других действий для подготовки оборудования к производству определенного изделия. При этом для переналадки оборудования требуются опытные работники – специалисты в области производства и управления производственными процессами, чтобы быстро и эффективно перенастроить машины.

Выходными параметрами производственного процесса являются, например, стоимость произведенной продукции; время, затраченное на ее производство, стоимость переналадок оборудования при выполнении заказов. При составлении плана выполнения значительного количества заказов возникает сложность планирования последовательности выполнения заказов с учетом требуемых переналадок оборудования. Переналадка оборудования регламентируется определенным временем, в течение которого заказы на определенных этапах не выполняются. Нерациональный порядок выполнения заказов на различных этапах производственного процесса может привести к повышению стоимости продукции из-за переналадок и/или долгосрочного выполнения на одном из этапов, что приведет к переносу сроков выполнения. Задача сокращения сроков выполнения заказов в производстве решается, например, путем разработки и использования автоматизированной системы планирования производства [1]. Эффект достигается за счет автоматизации выполнения трудоемких и рутинных операций по ведению оснастки.

Известно решение задачи для сокращения непроизводительных потерь времени в многономенклатурных производствах, связанных с необходимостью переналадок оборудования при смене ассортимента продукции [2]. Разработана модель производственной ситуации в виде комбинаторной задачи поиска простой цепи в полном ориентированном графе с нагруженными дугами. Предложен эвристический метод решения задачи, использующий ряд приемов, позволяющих существенно сократить объем перебора при поиске варианта очередности обработки небольшого количества различных видов продукции, приемлемого по критерию суммарной длительности переналадок.

Выполнены исследования по разработке инструментов для быстрой переналадки оборудования SMED (Single Minute Exchange of Dies). В SMED время, затрачиваемое на замену формы или штампа, должно составлять менее десяти минут. Это повышает производительность за счет сокращения времени, затраченного для переналадки производственного оборудования [3].

Важным направлением является исследование в теории производственных расписаний задачи коммивояжера TSP (Travelling Salesman Problem), к которой сводится поиск оптимальной последовательности выполняемых заказов при их значительном количестве. Например, показано, что метаэвристика POPMUSIC (Partial OPTimization Metaheuristic Under Special Intensification Conditions) очень эффективна для решения различных сложных комбинаторных задач [4]. При этом разрабатываются эвристические приемы, позволяющие сократить выбор дуг исследуемого

графа для получения лучшего решения за короткое время.

В задаче TSP с количеством узлов графа более тысячи используются современные методы машинного обучения [5]. Для сокращения временных затрат ограничивается пространство поиска при получении решения и, соответственно, снижается вычислительная нагрузка. Модель машинного обучения используется для выбора высоковероятных дуг при конструировании лучшего решения.

Масштабируемость алгоритмов решения проблемы коммивояжера (TSP) для обработки крупномасштабных задач является актуальной проблемой. Проведены исследования с миллионом узлов графа и ограничением времени вычислений до одного часа. Предложены алгоритмы, применяющие методы кластеризации узлов графа и использования генетического алгоритма для каждого кластера в отдельности на основе концепции «разделяй и властвуй» [6], [7]. Другим направлением сокращения времени построения лучшего решения для больших данных является применение облачных вычислений [8].

В представленной работе рассматривается задача определения оптимального порядка выполнения заказов, при котором минимизируется суммарная стоимость переналадок оборудования на основе формализации проблемы в виде задачи коммивояжера и применения генетического алгоритма для большого количества заказов, имеющих несколько параметров с разными уровнями.

1 Материалы и модели

Пусть имеется мультимножество

$$Z_M = \{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{|Z_M|}\},$$

$i = 1, 2, \dots, |Z_M|$ заказов с множеством

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_q, \dots, l_{|L|}\}$$

параметров, требующих переналадки производственного оборудования, на котором заказы должны быть выполнены. Параметры $l_q \in L$, $q = 1, 2, \dots, |L|$ имеют множество дискретных значений

$$K^{l_q} = \{k_1^{l_q}, k_2^{l_q}, \dots, k_n^{l_q}, \dots, k_{|K^{l_q}|}^{l_q}\}, \quad q = 1, 2, \dots, |L|,$$

которые будем именовать уровнями.

Каждый заказ требует определенной настройки оборудования, которая определяется разной стоимостью c_{ij} в зависимости от требуемой переналадки при переходе от заказа z_i к заказу z_j с другими уровнями параметров (рисунок 1.1).

Заказы с одинаковыми уровнями параметров $z_{i1} = z_{i2} = z_{i3}$ не требуют переналадки и объединены в один кластер z_i . Аналогично заказы $z_{j1} = z_{j2}$ объединены в кластер z_j (рисунок 1.1). Таким образом, рассматривается множество Z , $|Z| < |Z_M|$ заказов с разными уровнями параметров.

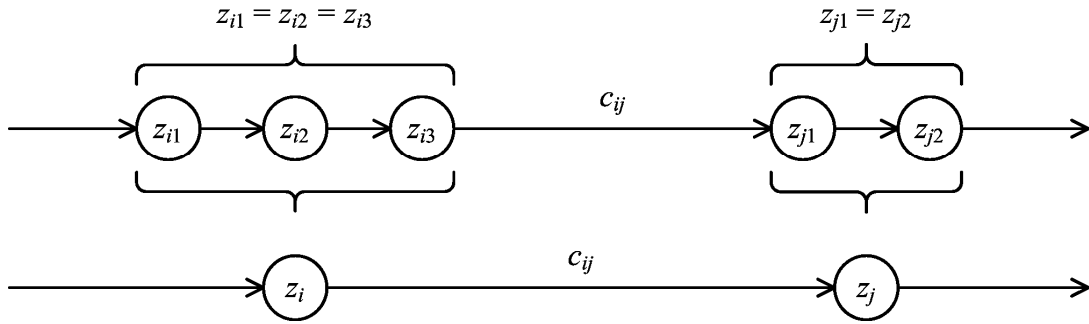


Рисунок 1.1 – Стоимость переналадки оборудования c_{ij} при переходе в процессе производства от заказа z_i к заказу z_j

Цель состоит в определении оптимальной последовательности выполнения заказов и переналадок оборудования, чтобы минимизировать стоимость настройки оборудования и общую стоимость выполнения множества заказов.

Задача определения оптимальной стратегии переналадки производственного оборудования является задачей оптимизации, которая может быть сформулирована как задача коммивояжера.

Математически задача определяется следующим образом: пусть имеется множество узлов графа, каждая из которых соответствует определенному заказу. Между узлами есть дуги, которые соответствуют переналадкам оборудования. Каждая переналадка оборудования имеет свою стоимость (может быть представлена временными параметрами). Требуется найти путь минимальной стоимости в этом графе, который будет соответствовать оптимальной последовательности выполнения заказов и переналадок оборудования.

Решение этой задачи может быть получено с использованием алгоритмов решения задачи коммивояжера, таких как жадный алгоритм, динамическое программирование, метод ветвей и границ, эволюционные алгоритмы. При этом необходимо учитывать все возможные варианты переналадок оборудования.

Для формализации производственного процесса введем обозначения матриц стоимостей переналадки параметров оборудования. В общем виде будет рассматриваться случай с $|L|$ параметрами, каждый из которых имеет $|K^{l_q}|$, $q = 1, 2, \dots, |L|$ различных уровней. Например, в общем случае параметр l_1 имеет $|K^{l_1}|$ уровней, параметр l_2 имеет $|K^{l_2}|$ уровней и т. д. Матрица $|P_q|$ стоимостей переналадки для параметра l_q между уровнями в общем случае:

$$P_q = (p_{qij})_{|K^{l_q}| \times |K^{l_q}|}, p_{qij} \in R; p_{qij} \neq p_{qji};$$

$$p_{qij} = 0, i = j; q = 1, \dots, |L|, i, j = 1, \dots, |K^{l_q}|,$$

где $|L|$ – количество параметров, $|K^{l_q}|$ – количество уровней q -го параметра, $|L|, |K^{l_q}| \in N$, $p_{qij} \in R$ – стоимость переналадки для q -го параметра при переходе с уровня i на уровень j (например, стоимость перехода в крашении с белого на красный цвет отличается от стоимости перехода с красного цвета на белый, т. е. $p_{qij} \neq p_{qji}$).

В терминах задачи о коммивояжере будем рассматривать стоимость переналадки оборудования между выполняемыми заказами, как расстояние между заказами c_{ij} (рисунок 1.1). Пусть имеется $|Z|$ заказов с параметрами:

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{|Z|} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1|L|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{|Z|1} & l_{|Z|2} & \dots & l_{|Z||L|} \end{pmatrix}.$$

Каждый заказ z_i характеризуется параметрами с соответствующими уровнями:

$$z_i = (l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{i|L|}), i = 1, \dots, |Z|.$$

Тогда матрица расстояний C между заказами принимает вид:

$$C = (c_{ij})_{|Z| \times |Z|}, c_{ij} \in R; c_{ij} = 0,$$

$$i = j; i, j = 1, \dots, |Z|; |Z| \in N,$$

где $|Z|$ – количество заказов.

Стоимости переналадки оборудования c_{ij} при переходе в процессе производства от заказа z_i к заказу z_j могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$c_{ij} = \sum_{q=1}^{|L|} p_{qij}, i, j = 1, \dots, |Z|,$$

где p_{qij} – стоимость переналадки оборудования для q -го параметра, $q = 1, 2, \dots, |L|$.

Пример. Пусть рассматривается случай с четырьмя параметрами ($|L| = 4$), каждый из которых имеет четыре уровня ($|K^{l_q}| = 4, q = 1, \dots, 4$). Матрица стоимостей переналадки оборудования между уровнями параметров имеет вид:

$$P_q = \begin{matrix} k_1^q & k_2^q & k_3^q & k_4^q \\ \begin{pmatrix} 0 & p_{i12} & p_{i13} & p_{i14} \\ p_{i21} & 0 & p_{i23} & p_{i24} \\ p_{i31} & p_{i32} & 0 & p_{i34} \\ p_{i41} & p_{i42} & p_{i43} & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}, q = 1, \dots, 4.$$

Матрицы стоимости переналадки между уровнями для каждого из параметров:

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 5 & 8 & 7 \\ 10 & 0 & 9 & 6 \\ 5 & 10 & 0 & 3 \\ 9 & 10 & 6 & 0 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} 0 & 9 & 9 & 1 \\ 5 & 0 & 1 & 4 \\ 2 & 5 & 0 & 2 \\ 3 & 7 & 7 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_3 = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 3 & 6 \\ 10 & 0 & 10 & 2 \\ 5 & 6 & 0 & 8 \\ 5 & 8 & 3 & 0 \end{pmatrix}, P_4 = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 5 & 9 \\ 5 & 0 & 1 & 9 \\ 7 & 5 & 0 & 2 \\ 10 & 8 & 5 & 0 \end{pmatrix}.$$

Параметру l_1 соответствуют номера строк и столбцов матрицы P_1 , параметру l_2 соответствуют номера строк и столбцов матрицы P_2 и т. д.

Параметры четырех заказов с соответствующими уровнями представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Матрица уровней параметров четырех заказов

Заказы	Уровень параметра			
	l_1	l_2	l_3	l_4
z_1	3	4	2	2
z_2	4	1	1	2
z_3	3	3	3	2
z_4	2	2	4	3

Требуется определить стоимость оптимальной последовательности выполнения заказов.

Решение. Найдем стоимость c_{12} переналадки между заказами z_1 и z_2 (таблица 1.1).

Шаг 1. В матрице P_1 находим значение $p_{134} = 3$.

Шаг 2. В матрице P_2 находим значение $p_{241} = 3$.

Шаг 3. В матрице P_3 находим значение $p_{321} = 10$.

Шаг 4. В матрице P_4 находим значение $p_{422} = 0$.

Шаг 5. Находим суммарное значение переналадок по всем параметрам:

$$c_{12} = p_{134} + p_{241} + p_{321} + p_{422} = 16.$$

Аналогично по шагам 1–5 найдем стоимость c_{21} переналадки между заказами z_2 и z_1 :

$$c_{21} = p_{143} + p_{214} + p_{312} + p_{422} = 6 + 1 + 7 + 0 = 14.$$

Повторяя шаги 1–5 заполняем матрицу расстояний C между заказами, по которой определим оптимальный порядок выполнения заказов,

минимизирующий суммарную стоимость переналадок оборудования:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 16 & 17 & 20 \\ 14 & 0 & 18 & 25 \\ 13 & 10 & 0 & 24 \\ 26 & 21 & 18 & 0 \end{pmatrix}.$$

Минимальная стоимость C_Z последовательности выполнения заказов z_4, z_3, z_2, z_1 :

$$C_Z = C(z_4, z_3, z_2, z_1) = c_{43} + c_{32} + c_{21} = 42.$$

Для решения задачи определения оптимального порядка выполнения заказов $z_i, i = 1, \dots, |Z|$, при котором суммарная стоимость переналадок оборудования будет минимальной, предлагается применение алгоритма случайного поиска на основе генетического алгоритма. В качестве хромосом при решении данной задачи предлагается использовать вектора последовательностей заказов, характеризующих суммарными стоимостями переналадок оборудования.

2 Эксперименты и методы

Генетический алгоритм – это алгоритм случайного поиска, который моделирует естественную эволюцию. Широко используется для решения NP -полных задач в различных предметных областях, которые в свою очередь не могут быть решены алгоритмами перебора.

Чтобы применить генетический алгоритм для решения задачи оптимизации, необходимо установить, что является популяцией, хромосомой, геном, выбрать способ кодирования решений.

Популяция – это множество возможных решений поставленной задачи, образующее пространство поиска. В популяции представлены хромосомы – наборы параметров, определяющие предлагаемое возможное решение. Ген – один из параметров хромосомы. Скрещивание – операция, при которой хромосомы обмениваются генами. Мутация – случайная перестановка нескольких генов в хромосоме. Приспособленность – оценка хромосомы согласно целевой функции. Поколение – одна итерация алгоритма.

Для решения поставленной задачи хромосомой представляется множество заказов, указанные в порядке следования их выполнения на оборудовании. Каждый ген хромосомы – это отдельный заказ, который не может повторяться дважды в одной хромосоме. Например, хромосомы из семи заказов могут быть представлены в виде $\{5, 2, 1, 4, 3, 7, 6\}$. Приспособленностью хромосомы будет являться сумма переналадок оборудования при выполнении заказов.

Пусть имеется семь заказов. Матрица стоимостей переналадок оборудования при выполнении заказов представлена в таблице 2.1.

Генетический алгоритм поиска оптимального порядка выполнения заказов реализуется следующей последовательностью шагов.

Таблица 2.1 – Матрица стоимостей переналадки оборудования

№ за-каза	1	2	3	4	5	6	7
1	0	16	17	20	16	15	15
2	14	0	18	25	12	17	13
3	13	10	0	24	10	16	19
4	26	21	18	0	10	23	18
5	23	19	7	15	0	15	26
6	17	25	18	27	17	0	10
7	20	20	14	27	21	7	0

Шаг 1. Установить параметры для поиска наилучшего решения: размер популяции, количество поколений, процент мутации.

Шаг 2. Сгенерировать начальную популяцию. В качестве первой хромосомы в популяции установим гены (заказы) в порядке возрастания их номера {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}. Генерируем следующие хромосомы в популяции, переставляя гены случайным образом, пока не достигнем необходимого размера популяции.

Шаг 3. Вычислить для каждой хромосомы в популяции, согласно значениям, приведенным в таблице 2.1, приспособленность (сумму стоимостей переналадки оборудования).

Шаг 4. Применить операцию скрещивания.

4.1 Выбрать случайным образом пару хромосом. Пусть парой выбранных хромосом являются $Ch1$: {1, 6, 4, 3, 2, 7, 5} и $Ch2$: {5, 1, 2, 7, 4, 6, 3} со значениями функции приспособленности 120 и 119 соответственно (рисунок 2.1).

Хромосомы	Гены							Приспособленность
$Ch1$	1	5	7	3	6	4	2	120
$Ch2$	1	6	2	4	3	5	7	119
$Ch11$	1	5	2	4	3	7	6	104
$Ch22$	1	6	7	3	4	2	5	96

Рисунок 2.1 – Применение операции скрещивания

4.2 Сгенерировать точку разрыва (выделена полужирно на рисунке 2.1).

4.3 Часть генов $Ch1$ до точки разрыва, копируем в $Ch11$ (новую хромосому).

4.4 Часть генов $Ch2$ после точки разрыва, копируем в $Ch11$, если данные гены еще не были унаследованы.

4.5 Если не все гены $Ch11$ были заполнены, то выбираем не унаследованные гены $Ch1$;

4.6 Аналогичным образом формируем гены $Ch22$. Копируем часть генов $Ch2$ до точки разрыва, часть $Ch1$ после точки разрыва, заполняем не унаследованными генами $Ch2$.

Интерпретация хромосом означает получение фенотипа из генотипа, т. е. определение порядка выполнения заказов (рисунок 2.2).

Шаг 5. Применить операцию мутации. На данном шаге осуществляем обмен двух сгенерированных генов в случайной хромосоме.

Шаг 6. Добавить полученные хромосомы-потомки ($Ch11$, $Ch22$ на рис.3) в популяцию, образовавшуюся после операции скрещивания на шаге 4.

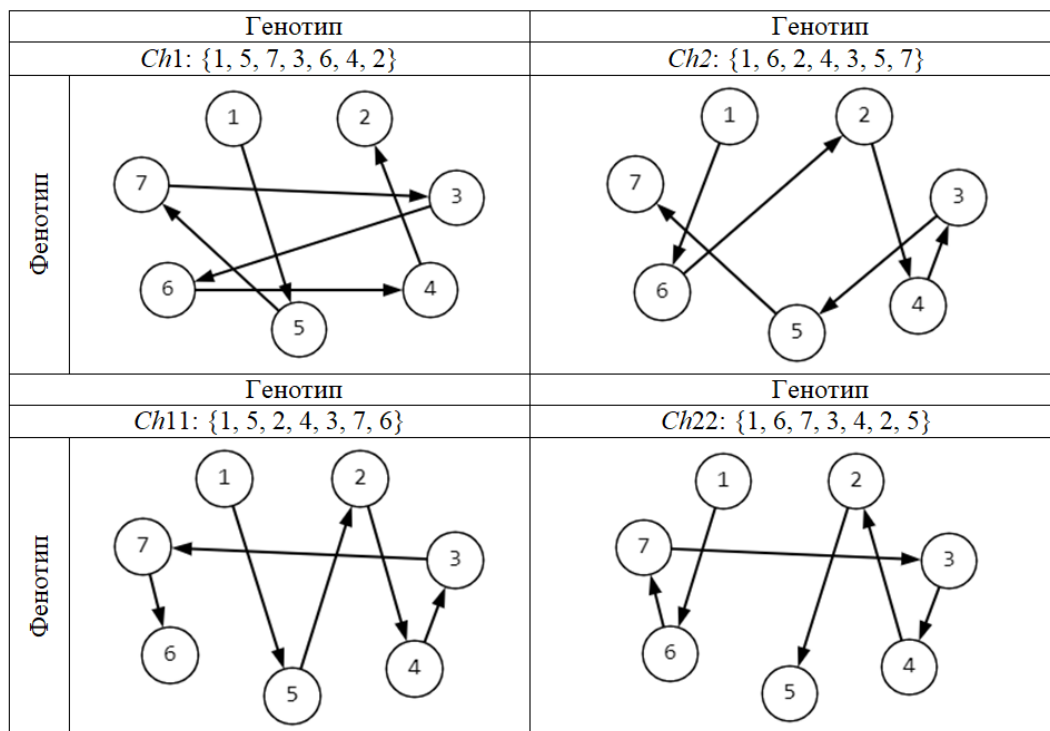


Рисунок 2.2 – Интерпретация хромосом

Таблица 3.1 – Результаты исследования генетического алгоритма

Показатели	Исследования $I_i, i = 1, \dots, 4$ с разным количеством заказов $ Z $			
	$I_1: Z = 5$	$I_2: Z = 10$	$I_3: Z = 50$	$I_4: Z = 100$
Количество поколений, K	10	100	100000	1000000
Лучшее решение, C_Z	42	54	269	410
Время поиска, T [с]	0,023	0,036	81,21	839,83

Шаг 7. Сортировать все хромосомы в порядке возрастания значений функции приспособленности и удалить из популяции наименее приспособленные хромосомы в количестве, добавленном на шаге 6.

Шаг 8. Повторить шаги 3–7 в соответствии с заданным количеством поколений.

Шаг 9. Определить решение в качестве наилучшего в работе алгоритма, равным хромосоме с наименьшим значением приспособленности.

3 Результаты

На основании матриц P_1 – P_4 стоимостей переналадки между уровнями для каждого из параметров, полученных в ходе постановки задачи (таблица 1.1), проведены предварительные исследования генетического алгоритма при различных начальных условиях (размер популяции, количество поколений). Принято решение об исследовании задачи управления порядком выполнения заказов с размером популяции, равным семидесяти хромосомам.

Итоговые результаты исследований представлены в таблице 3.1. В ходе экспериментов решались задачи тестирования программного продукта, оценки погрешности полученной приспособленности, определения времени поиска решения.

В результате исследований экспериментальные данные позволяют провести анализ получения результатов по общей стоимости переналадок оборудования C_Z выполнения заказов, времени (T , с) нахождения лучшего решения, приближенного к оптимальному, за количество поколений K . Критерием для остановки генетического алгоритма является количество итераций (поколений K).

В первом исследовании I_1 решение получено методом полного перебора (число перестановок равно 120) и с применением генетического алгоритма. Результаты в обоих случаях совпадают, абсолютная погрешность равна нулю. Генетический алгоритм находит оптимальное решение за короткое время, благодаря рациональному заданию количества поколений $K = 10$.

В исследовании I_2 метод полного перебора не применялся в связи с 3628800 вариантами для поиска оптимального значения. Так же с увеличением числа заказов $|Z|$ для поиска лучших решений необходимо увеличивать количество поколений, что в итоге приводит к увеличению

вычислительных затрат и, соответственно, увеличению времени поиска лучшего решения.

В исследованиях I_3 и I_4 показано, что увеличение числа заказов в два раза с $|Z| = 50$ до $|Z| = 100$ приводит к увеличению времени поиска лучшего решения более чем в десять раз.

Заключение

Полученные результаты работы генетического алгоритма при большом количестве заказов являются приближенными, не являются оптимальными. Однако полученные решения являются рациональными для практического применения.

С ростом масштабируемости задачи возникает необходимость увеличения количества итераций (числа поколений), что приводит к значительному времени работы генетического алгоритма.

Практическая значимость исследований состоит в разработке методики применения генетического алгоритма для решения задачи управления порядком выполнения большого количества заказов при планировании производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терехов, М.В. Повышение эффективности производства на основе разработки автоматизированной системы планирования производства / М.В. Терехов, В.С. Заикин, А.В. Аверченков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 2 (12). – С. 49–57. – DOI: 10.30987/2658-6436-2021-2-49-57.
2. Сошников, А.В. Экспресс-метод сокращения потерь времени на переналадки оборудования при смене ассортимента продукции / А.В. Сошников // Национальная ассоциация ученых. – 2020. – № 1 (57). – С. 43–48. – DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.261.
3. Saravanana V. Lead Time Reduction through Execution of Lean Tool for Productivity Enhancement in Small Scale Industries / V. Saravanana, S. Nallusamyb, K. Balajic // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2017. – № 29. – P. 165–174. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.34.116.
4. Taillard, É.D. POPMUSIC for the Travelling Salesman Problem / É.D. Taillard, K. Helsgaun // European Journal of Operational Research. – 2019. – № 2 (272). – P. 420–429. – DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.039.

5. *Mele, U.J.* New Constructive Heuristic driven by Machine Learning for the Traveling Salesman Problem / U.J. Mele, L.M. Gambardella, R. Montemanni. – A Preprint. – 2021. – 12 p. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/354088626>.

6. *Alhanjouri, M.A.* Proposed Algorithms to solve Big Data traveling salesman problem / M.A. Alhanjouri // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 5, iss. 6. – P. 14–20. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/326325068>.

7. *Mariescu-Istodor, R.* Solving the Large-Scale TSP Problem in 1 h: Santa Claus Challenge 2020 / R. Mariescu-Istodor, P. Frănti // Frontiers in Robotics and AI. – 2021. – № 8. – P. 1–20. – DOI: 10.3389/frobt.2021.689908.

8. *Gawali, M.B.* Task scheduling and resource allocation in cloud computing using a heuristic approach / M.B. Gawali, S.K. Shinde // Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications. – 2018. – № 4. – 16 p. – DOI: 10.1186/s13677-018-0105-8.

Поступила в редакцию 29.11.2023.

Информация об авторах

Демиденко Олег Михайлович – д.т.н., профессор

Якимов Анатолий Иванович – д.т.н., доцент

Борчик Екатерина Михайловна – к.т.н.

Якимов Евгений Анатольевич – к.т.н.

Денисевич Дмитрий Александрович – ст. преподаватель