

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа демонстрирует зарекомендовавшие себя способы оптимизации расчёта балансов предприятий горноперерабатывающей промышленности. Среди них распрямление переносов продуктов, изменение способов сортировки, а также создание групп продуктов в зависимости от их приоритета.

УДК 658.512

**УПОРЯДОЧЕНИЯ РАБОТ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ
ПЕРЕНАЛАДОК ОБОРУДОВАНИЯ**

Сошников А.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна*

**RATIONAL ORDERING OF WORK ON THE PRODUCTION LINE IN THE PRESENCE OF
EQUIPMENT CHANGEOVERS**

Soshnikov A.V.

*St. Petersburg state University
industrial technology and design*

DOI: [10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.260](https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.260)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена задача выбора рациональной очередности выполнения работ в технологических комплексах с последовательной структурой, широко распространенных в различных отраслях промышленности. Постановка задачи отличается учетом переналадок машин, входящих в линию, при смене выполняемых работ. Предложена многокритериальная модель задачи. Предложен подход и конкретные методы поиска рациональных вариантов упорядочения работ при запуске их на линию. Подход базируется на использовании принципов систематической эвристики, позволяющих генерировать ограниченное и управляемое с учетом производственных условий количество вариантов, среди которых, как предполагается, имеются и рациональные (практически приемлемые) варианты.

ABSTARCT

The method of rational ordering of work on the production line in the presence of equipment changeovers. The problem of choosing a rational sequence of work in technological complexes with a consistent structure, widespread in various industries, is considered. The problem statement differs taking into account changeovers of the cars entering the line, at change of the performed works. A multicriteria model of the problem is proposed. The approach and specific methods of search of rational variants of ordering of works at their start on the line are offered. The approach is based on the use of the principles of systematic heuristics, which allow to generate a limited and manageable number of options, taking into account the production conditions, among which there are supposed to be rational (practically acceptable) options.

Ключевые слова: технологические линии, переналадки машин, очередность выполнения работ, многокритериальная модель, эвристические методы, Парето-оптимальные решения

Keywords: process lines, machine changeovers, sequence of work, multi-criteria model, heuristic methods, Pareto-optimal solutions.

Задача поиска оптимального или субоптимального порядка выполнения заданного множества работ на технологической линии при одинаковых маршрутах их движения подробно изучена в теории расписаний, и для нее имеются различные алгоритмы, в основном построенные на эвристических правилах назначения приоритетов [2],[3].

Критерием качества расписания часто выступает общее время выполнения работ. В традиционной постановке не учитываются возможные переналадки машин при смене выполняемых на них работ. Среди

производственных структур часто встречаются комплексы машин, формально не связанных в единую линию, работающих автономно, но по отношению к объекту обработки представляющие цепочки операций, выполняемых последовательно. Переналадки отдельных машин при смене работ достаточно часто имеют место на практике. В этом случае в такой технологической системе правомерно ставить задачу выбора очередности выполнения работ, при которой приближаются к своим наилучшим или нормативным значениям такие показатели как общее время выполнения работ, затраты на переналадки как отдельных

машин, так и суммарные затраты. Такая постановка рассматривается в данной статье.

Пусть имеется система из m автономных (не связанных жесткими связями) машин. В системе должны быть выполнены n работ, каждая из которых включает m , выполняемых последовательно в порядке нумерации. Каждая операция закреплена за определенной машиной. Соблюдаются условия задачи Джонсона (непрерывность операций, неделимость работ, невозможность выполнения каждой машиной одновременно операций нескольких работ). При смене работ на каждой машине требуется произвести ее переналадку, причем длительность этой операции зависит от видов сменяющих друг друга работ. Для всех работ заданы длительности технологических операций, выполняемых на соответствующих машинах. Эти длительности обозначены через τ_{ik} и представлены в виде матрицы τ . Также заданы длительности переналадок при переходе на k -й машине с работы i на работу j . Эти длительности обозначены через g^k_{ij} и представлены в виде $m \times (n \times n)$ -матриц $g^k = (g^k_{ij})$, $k = 1, 2, \dots, m$. Порядок выполнения работ на всех машинах будем считать одинаковым, так что достаточно найти порядок (очередность) запуска работ на первую машину данной системы.

Трудности решения данной задачи достаточно очевидны: прямой перебор всех $n!$ вариантов запуска исключается для задач уже умеренной размерности; известный алгоритм Джонсона, дающий строго оптимальный результат, не учитывает наличие переналадок, зависящих от очередности, и пригоден лишь для случая двух и при выполнении некоторых условий трех машин [5]; рациональный вариант запуска, найденный каким-либо точным или эвристическим методом без учета переналадок, при попытке их учета может быть кардинально изменен до потери признака оптимальности или рациональности.

При решении практических задач, для которых приведенная выше постановка является подходящей моделью, как правило, применяются эвристические методы, не имеющие формального обоснования, но обеспечивающие получение приемлемого решения при незначительном объеме вычислительной работы. Характерным для таких методов является применение приоритетной схемы, состоящей в назначении для каждой работы по некоторому правилу численного параметра (приоритета) с последующим упорядочением работ по убыванию или возрастанию их приоритетов. Качество решения (степень близости значения критерия к минимальному) зависит, очевидно, от принятого правила назначения приоритетов. Для задачи без операций переналадки предложено большее число различных правил, приводящих к расписаниям с удовлетворительными оценками качества [2],[3],[5]. Приоритеты в таких правилах рассчитываются как те или иные функции длительностей технологических операций $p_i = p(\tau_{ik})$. Указать какие-либо правила расчета приоритетов по длительностям переналадок

представляется невозможным, так как эти длительности относятся не к отдельным работам, а связывают между собой пары работ, что в итоге приводит к связности всей совокупности работ. Это ведет к трудностям или даже невозможности оценки влияния отдельной работы на потенциальные затраты ресурсов на переналадки.

Рассмотрим более подробно предлагаемый подход к решению задачи. Согласно этому подходу предварительно формулируются некоторые формальные или эвристические правила, по которым в результате поочередного их применения генерируется множество вариантов упорядочения работ, которые оцениваются по принятому набору критериев. Число используемых правил, очевидно, ограничено. Соответственно, анализу подвергается относительно небольшое и, что важно отметить, регулируемое количество вариантов. То обстоятельство, что правила формулировались как действующие в сторону улучшения соответствующего критерия качества формируемого расписания, дают определенные основания ожидать, что среди сгенерированных вариантов будут и приемлемые, рациональные варианты. Выбор наиболее предпочтительного варианта осуществляется согласно принятым требованиям к решению. Процедура выбора по единственному критерию очевидна. Выбор с учетом нескольких критериев возможен по различным схемам, используемым при выборе из конечного множества альтернатив. В частности, укажем такие методы, как предварительное выявление и последующий сравнительный анализ Парето-оптимальных решений [7].

Рассмотрим задачу в многокритериальной постановке. В качестве критериев примем два показателя: 1) общее время выполнения всех работ на линии $T^0 = T^0(\pi_q)$, зависящее от упорядочения работ π_q $q = 1, 2, \dots, N$, и 2) суммарные потери, связанные с переналадками на всех машинах $S^0 = S^0(\pi_q)$, определяемые принятой очередностью выполнения работ и линейно зависящие от длительностей операций переналадки. Целевые функции, выражающие эти критерии, имеют вид:

$$T^0 = \max_k (T_k) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$k \in U^*$$

где

T_k – момент окончания выполнения работ на k -й машине, $k = 1, 2, \dots, m$;

U^* – множество вариантов упорядочения работ π_q , $q = 1, 2, \dots, N$, предварительно сгенерированных по принятым правилам и число которых N установлено с учетом ограничения на время поиска решения.

$$S^0 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} s^k g^k_{[i][i+1]} \rightarrow \min \quad (2)$$

$$k \in U^*$$

где

s^k – потери из-за простоев k -й машины в течение учетной единицы времени;

$g^k_{[i][i+1]}$ – длительность операции переналадки k -й машины при смене $[i]$ -й по очереди работы на

$[i+ 1]$ -ю (обозначение $[i]$ указывает место i -й работы в упорядоченной последовательности π_q).

Предположим, что соотношение ожидаемых общих затрат времени на выполнение технологических операций и операций по переналадке машин дает основание для учета обоих указанных критериев. Для иллюстрации подхода примем один из возможных наборов правил генерирования вариантов очередности выполнения работ.

Правило 1. Рассчитаем для каждой j -й работы ($j = 1, \dots, n$) значения приоритета p_j по данным о длительностях ее технологических операций τ_{ij} , $i = 1, \dots, m$. Задачу выбора способа расчета приоритетов работ без учета переналадок считаем предварительно решенной. Большое число способов расчета на основе различных эвристик представлено в литературе (см. например, [2], [3]). Сформируем вариант упорядочения работ π_1^0 , расположив их по убыванию приоритетов. Заметим, что можно применить и такой прием: сгенерировать несколько последовательностей, рассчитывая каждый раз приоритеты по различным правилам.

Правило 2. Данное правило предусматривает генерирование m вариантов упорядочения, каждый из которых дает рациональную очередность выполнения работ на одной из машин. Последовательность работ, рациональную по критерию сокращения потерь из-за переналадок на k -й машине, обозначим через π_2^k , $k = 1, 2, \dots, m$. Для поиска этих последовательностей может быть использован метод, предложенный в статье [1].

Предположим, что в результате применения указанных правил сформировано множество вариантов упорядочения работ U^* . Дальнейшие действия могут вестись в двух направлениях. Первое направление основано на предположении о

наличии в множестве U^* приемлемого (рационального) варианта и задача состоит в его выявлении. Второе направление состоит в «конструировании» искомого варианта из сгенерированных вариантов с помощью некоторого правила. Причем этот компромиссный вариант может не совпадать ни с одним из вариантов, присутствующих в U^* .

Рассмотрим первое из указанных направлений. Процедура выбора достаточно проста и включает три этапа.

Этап 1. Для каждого варианта упорядочения $\pi_q \in U^*$ рассчитываем по формулам (1), (2) значения критериев $T^0(\pi_q)$ и $S^0(\pi_q)$.

Этап 2. Среди всех вариантов путем попарного сравнения двухкомпонентных векторов критериев выявляем Парето-оптимальные варианты. Напомним, что вариант a доминирует по Парето над вариантом b , если выполняются, в данном случае, два неравенства $T^0(a) \leq T^0(b)$ и $S^0(a) \leq S^0(b)$, причем, хотя бы одно из них строгое. Если выявлен единственный вариант, обладающий этим свойством, то именно он выбирается в качестве компромиссного решения задачи. Если Парето-оптимальных вариантов несколько, то выполняется этап 3.

Этап 3. С учетом субъективных суждений лица, принимающего решения, об относительной важности критериев выбирается один из Парето-оптимальных вариантов упорядочения.

Процедура закончена.

Приведем пример применения данной процедуры.

На линии из двух последовательных машин ($m = 2$) должны быть выполнены пять работ ($n = 5$) a, b, c, d, e . Выполняются условия задачи Джонсона. Длительности технологических операций τ_{ij} ($i = 1, 2; j = a, b, c, d, e$) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Длительности технологических операций (усл. ед. времени)

Номер машины	Длит-ти операций	a	b	c	d	e	Σ
1	τ_{1j}	3	4	3	4	5	19
2	τ_{2j}	5	7	3	2	1	18

При смене работ на каждой машине необходимо выполнить операции переналадки.

Длительности операций по переналадке каждой из машин представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2.

Длительности операций переналадки первой машины

Работы	a	b	c	d	e
a	∞	1	3	5	4
b	3	∞	5	6	1
c	4	5	∞	1	6
d	6	2	1	∞	1
e	4	5	5	1	∞

Таблица 3.

Длительности операций переналадки первой машины

Работы	a	b	c	d	e
a	∞	4	3	5	1
b	1	∞	7	6	4
c	5	1	∞	3	2
d	6	8	1	∞	4
e	4	3	2	1	∞

Оценки потерь от простоев машин в единицу времени равны $s^1 = 3$ усл.ед., $s^2 = 5$ усл. ед. Требуется найти вариант рациональной очередности выполнения работ с учетом двух критериев (2) и (3), которые для лица, принимающего решение, являются равноценными.

Следуя приведенным выше правилам, сгенерируем варианты упорядочения работ. Последовательность π_1^0 получим, применив алгоритм Джонсона для двух машин. Для этого разделим множество работ на два подмножества J_1 и J_2 по правилу: $J_1 = \{j: \tau_{1j} < \tau_{2j}\}$ и $J_2 = \{j: \tau_{1j} \geq \tau_{2j}\}$. Подмножество J_1 упорядочим по возрастанию τ_{1j} , подмножество J_2 – по убыванию τ_{2j} . Вначале

запускаются работы из J_1 , затем – из J_2 [5]. В результате получим последовательность $\pi_1^0 = \langle a, b, c, d, e \rangle$, оптимальную по критерию общего времени выполнения всех работ на линии.

Последовательности π_2^1 и π_2^2 получим, применив алгоритм, предложенный в [1], поочередно к первой и второй машинам, используя, соответственно, данные таблиц 2 и 3. Получим следующие последовательности:

$$\pi_2^1 = \langle a, b, e, d, c \rangle \text{ и } \pi_2^2 = \langle e, d, c, b, a \rangle.$$

Построив для каждой последовательности диаграммы Ганта, определим для них значения критериев $T^0(\pi_q)$ и $S^0(\pi_q)$. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Значения критериев для различных вариантов упорядочения работ

Последовательность	Общее время выполнения работ	Общее время переналадок
π_1^0	39	26
π_2^1	31	14
π_2^2	36	14

Из этих последовательностей только одна, а именно, π_2^1 является Парето-оптимальной (в таблице выделена жирным шрифтом), так как она доминирует по Парето две другие последовательности.

Именно последовательность π_2^1 может быть принята, как искомое решение задачи.

Рассмотренный пример носит иллюстративный характер и не дает оснований для вывода об абсолютной и относительной эффективности использованных методов. Для этого требуются более основательные статистические исследования. Здесь ограничимся указанием на результаты значительного числа расчетов, подтверждающих возможность применения предложенного подхода для поиска рациональных вариантов упорядочения работ при решении задачи в производственных условиях.

Литература

1. Сошников А.В. Метод сокращения организационных простоев оборудования при смене ассортимента продукции // Вестник СПбГУПТД. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2019. – № 4. – С. 3–8.
2. Архипов А. В. Эвристические методы в управлении производством: на материале текстильной и легкой промышленности. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 163 с.
3. Эвристические методы календарного планирования / Подчасова Т. П., Португал В. М., Татаров В. А., Шкурба В. В. – К.: Техніка, 1980. – 140 с.
4. Танаев В. С., Шкурба В. В. Введение в теорию расписаний. – М.: «Наука», 1975. – 256 с.
5. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний. – М.: «Наука», 1975. – 360 с.
6. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач – М.: Наука. – 1982. – 286 с.

УДК 658.512

ЭКСПРЕСС-МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ ВРЕМЕНИ НА ПЕРЕНАЛАДКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ СМЕНЕ АССОРТИМЕНТА ПРОДУКЦИИ

Сошников А.В.

Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна

METHOD OF REDUCING ORGANIZATIONAL DOWNTIME OF EQUIPMENT WHEN CHANGING THE PRODUCT RANGE

Soshnikov A.V.

St. Petersburg state University
industrial technology and designDOI: [10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.261](https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.261)