

## АНАЛИЗ ЭВРИСТИЧЕСКИХ ПРАВИЛ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ РАБОТ В ЕДИНИЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассматриваются наиболее известные эвристические правила, используемые при планировании производственных работ. На примере изготовления комплекта деталей строятся варианты расписаний производственных работ с помощью пяти правил. Анализ полученных расписаний позволяет выделить недостатки рассматриваемых эвристических правил. Предлагаются способы их совершенствования, что позволит сократить время ожидания обслуживания по деталям и минимизировать производственный цикл изготовления комплекта деталей.

### 1. Актуальность темы и постановка задачи

Выбор оптимального расписания заданного набора работ на имеющемся комплекте оборудования исследуется уже давно, но оптимальные решения получены лишь для простейших случаев. Алгоритмы построения расписаний без проведения полного или частичного перебора вариантов называются решающими правилами и играют важную роль в прикладной теории расписаний. Использовать такие правила можно не только при статическом, но и при динамическом портфеле заказов: расписание строится поэтапно, без итераций, причем на каждом этапе определяется ровно одна следующая работа, которая при дальнейшем построении расписания не меняется.

К настоящему времени существуют программные продукты, которые декларируют, что они полностью охватывают все стадии планирования производства и позволяют составлять производственные расписания. В таких системах используют разные критерии оптималь-

ности, чаще всего это максимизация прибыли от реализации продукции ( $\sum_{i=1}^n \Pi_i \rightarrow \max$ , где  $n$  – количество изделий) или минимизация суммарного штрафа за невыполнение сроков

выпуска изделия ( $\max \sum_{i=1}^n \omega_i T_i \rightarrow \min$ , где  $\omega_i$  – штраф за задержку выполнения  $i$ -го изделия

на единицу времени,  $T_i$  – время выполнения  $i$ -го изделия). Безусловно, прибыль является основным показателем работы любого предприятия. Но также большую важность представляет оборачиваемость капитала, которую можно увеличить путем сокращения времени производственных циклов изделий. Это можно достичь уменьшением времени ожидания обработки для деталей. В существующих разработках используется однокритериальный подход к планированию производства, что является недостатком таких систем, так как это может привести к снижению экономической эффективности на предприятии, получаемой от внедрения результатов решения задач по оперативному планированию [1]. Методы построения оптимальных планов в предлагаемых программных продуктах не выносятся для оценивания. Поэтому точно сказать, что такая система подойдет конкретному предприятию, невозможно. К тому же для внедрения таких систем необходима интеграция со всеми существующими заводскими разработками по автоматизации отдельных производственных задач, что является большой сложностью.

Для единичного производства характерна большая номенклатура выпускаемых изделий. Разнообразие продукции, часто изменяющейся, как правило, не повторяющейся или повторяющейся через большие интервалы, усложняет оперативное планирование, контроль и регулирование производственного процесса, т.е. управление им [3]. Поэтому очень важно в единичном производстве оптимально распределить изготовление изделий в планируемом периоде, выбрать рациональный способ использования ресурсов в целях достижения наибольшей эффективности.

Применительно к задачам планирования работ в единичном производстве возникает множество трудностей, причины которых следующие:

- оптимизация планирования требует оперативной переработки больших объемов информации и проведения довольно трудоемких расчетов в связи с тем, что изделия повторяются крайне редко;

- по сравнению с долгосрочным планированием составление краткосрочных планов требует большей детализации и должно учитывать многие параметры производственного процесса, которые при долгосрочном планировании игнорируются (обеспеченность инструментами, исправность оборудования и т. п.);

- решение задачи минимизации переналадок станков требует оперативного и достоверного учета хода производства, с помощью которого формируются исходные данные о текущем состоянии заказов, состоянии оборудования, наличии инструментов и т.д.;

- смена операций, а также различие в длительности операций на смежных рабочих местах вызывает частые перерывы в работе оборудования.

*Целью* работы является определение направления повышения эффективности краткосрочного планирования производственных работ на основе совершенствования эвристических правил, используемых для определения порядка запуска деталей в обработку.

*Задачи* данной работы:

- анализ эвристических правил [2]: 1) кратчайшей операции, 2) минимальной и 3) максимальной остаточной трудоемкости, 4) минимального простоя оборудования, 5) синтеза алгоритма поиска кратчайшей операции и максимальной остаточной трудоемкости;

- проведение экспериментальной проверки указанных выше правил для простого производственного примера;

- с учетом выявленных недостатков разработать алгоритм, позволяющий получить близкое к оптимальному результату расписание.

К краткосрочному плану могут предъявляться разнообразные требования. Расписания, полученные разными методами, необходимо оценивать согласно следующим критериям оптимальности:

1) минимизация времени ожидания обслуживания (обеспечение комплектного выпуска

деталей, улучшение структуры штучно-калькуляционного времени) ( $\min_i (\sum_{i \in I_s} W_{ij})$ , где  $W_{ij}$  – интервал времени между окончанием  $(j-1)$ -й и началом  $j$ -й операции  $i$ -й детали);

2) минимизация простоев оборудования (максимальная загрузка) ( $\min(q_{ik} - \sum_{i \in I_s} F_{iks})$ , где

$q_{ik}$  – трудоемкость операции  $i$ -й детали на  $k$ -м станке;  $I_s$  – множество деталей заказа  $s$ ;

$F_i = (W_{ij} + p_i)$  – длительность прохождения  $i$ -й детали в системе, включая время простоя;

$p_i = \sum_{j=1}^{g_i} p_{ij}$  – общая длительность всех операций  $i$ -й детали,  $g_i$  – операции  $i$ -й детали;  $P_{ij}$  –

длительность выполнения операции);

3) минимизация времени выполнения всех работ по комплекту деталей ( $\min_s (\sum_{i \in I_s} R_{ik} - \sum_{i \in I_s} F_i)$ , где  $R_{ik}$  – объем работ, который необходимо выполнить по  $i$ -й детали заказа  $S$ ).

Сведение к минимуму времени ожидания обслуживания обеспечивается такой последовательностью работ, при которой наилучшим образом синхронизируется длительность технологических операций и повышается загрузка оборудования. Это важно для единичного производства, где на одном и том же производственном участке обрабатываются детали с резко отличающимися циклами обработки и структурой трудоемкости.

## 2. Решение задачи и анализ результатов

Для оценки эвристических правил составления расписания рассмотрим пример обработки деталей некоторого заказа, исходные данные для которого представлены в табл. 1.

Правило кратчайшей операции позволяет строить расписания работ, когда из текущего набора работ, подготовленных к выполнению на конкретном станке, выбирается деталь с минимальным временем обработки на этом станке с целью как можно быстрее загрузить работой следующие по технологическому маршруту станки. Оценить время готовности всех деталей можно с помощью диаграммы Ганта (рисунок, поз.а). Ось X – это время выполнения операций, Y - перечень работ. Ширина блоков равна длительности операций, цифра в блоке – это номер детали, буква – тип станка (т – токарный, ш – шлифовальный, ф – фрезерный). Время выполнения всех работ составляет 27 часов. Способ сокращения производственного цикла – использование дополнительного токарного станка или возможность запустить в производство в первую очередь деталь с наибольшей трудоемкостью, т.е. деталь 1. Результаты решения задачи приведены в табл. 2.

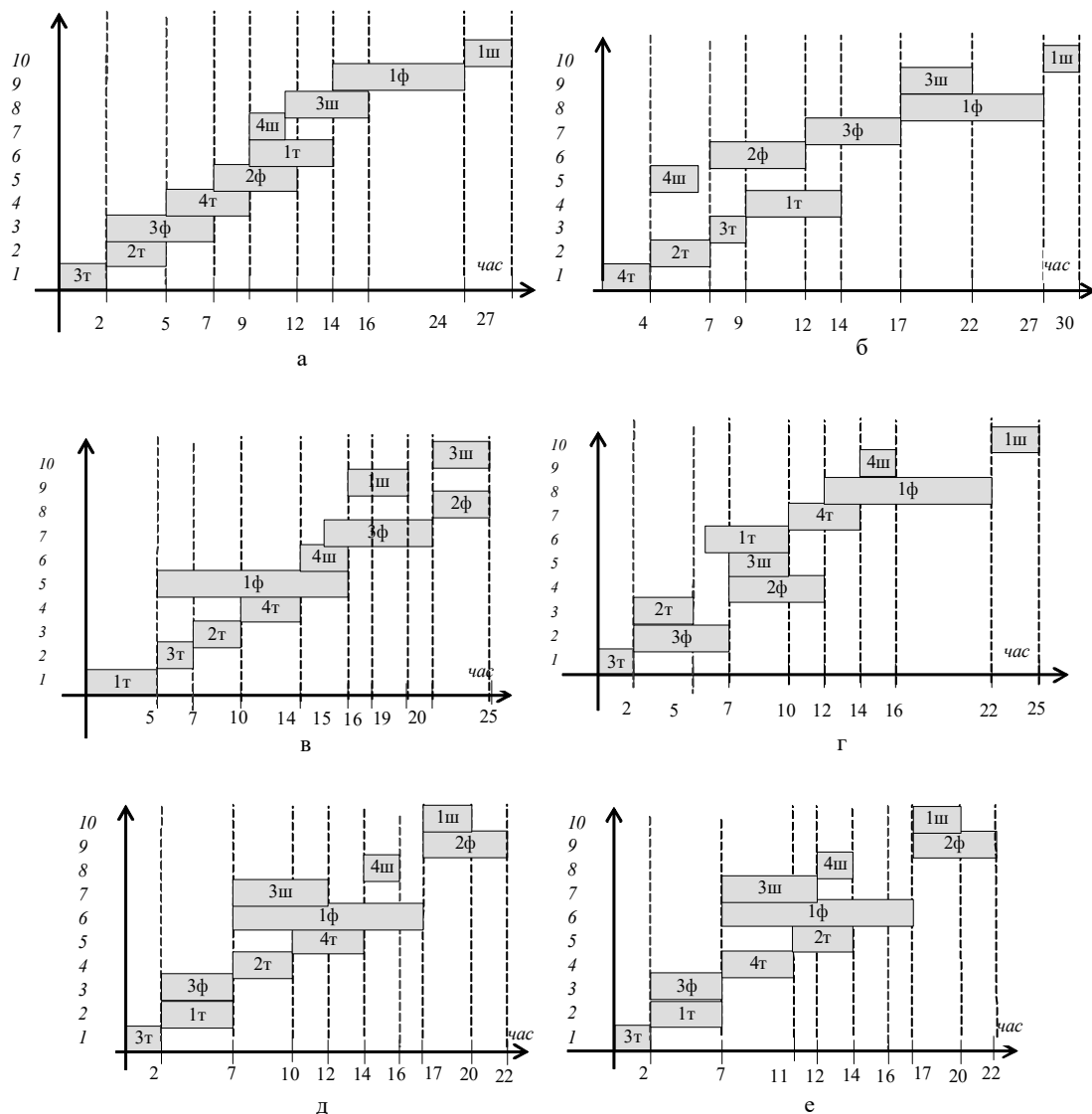
Решая задачу по правилу минимальной остаточной трудоемкости из текущего набора работ, подготовленных к выполнению на станке, выбирается деталь с минимальной суммой времен обработки на всех еще не пройденных станках с учетом текущего станка, или деталь с минимальным числом еще не выполненных операций. Правило используют для того, чтобы по возможности быстрее разгрузить производственную систему, сократив количество находящихся в производстве наименований деталей. Оценивая трудоемкость выполнения каждой детали, по табл. 1 получаем следующий порядок запуска деталей:  $4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ . Диаграмма Ганта производственного расписания работ по правилу минимальной остаточной трудоемкости представлена на рисунке, поз.б.

Используя правило максимальной остаточной трудоемкости из портфеля работ, подготовленных к выполнению на станке, выбирается деталь с максимальной суммой времени обработки на всех еще не пройденных станках, включая данный станок (рисунок, поз.в). Если детали комплекта имеют различные технологические маршруты обработки, вместо максимальной остаточной трудоемкости иногда используется максимальное число еще не выполненных операций.

Таблица 1

Станок \ Деталь	Трудоемкость изготовления детали, ч				$t_{обр}, ч$
	1 (муфта)	2 (ролик)	3 (плита)	4 (вал)	
Токарный	5	3	2	4	14
Фрезерный	10	5	5	-	20
Шлифовальный	3	-	5	2	10
<i>Трудоемкость, ч</i>	18	8	12	6	<b>44</b>

Согласно правилу минимизации простоев станков в расписание включают детали с минимальным временем обработки на первом станке для того, чтобы максимально быстро загрузить второй станок. С другой стороны, для сокращения простоев второго станка целесообразно в первую очередь загружать его деталями с максимальным временем обработки. Таким образом, последними будут выполняться работы с минимальным временем (это позволит сократить время работы станков, участвующих в выполнении работ по заказу после завершения работ на первом станке). На рисунке, поз. г представлена диаграмма Ганта полученного расписания.



Расписания, полученные с помощью эвристических правил: а – кратчайшей операции; б – минимальной остаточной трудоемкости; в – максимальной остаточной трудоемкости; г – минимальных простоев станков; д – объединение правил кратчайшей операции и максимальной трудоемкости; е – оптимальное расписание

Решение задачи с помощью алгоритма, объединяющего правила кратчайшей операции и максимальной остаточной трудоемкости, представлено диаграммой Ганта на рисунке, поз. д. Равномерность загрузки обеспечивается тем, что на каждом этапе планирования выбирается деталь, для которой в текущий момент минимально отношение (трудоемкость очередной операции)/(трудоемкость всех невыполненных операций). Общее время выполнения операций 22 часа, которое по сравнению с предыдущими методами минимальное (см. табл. 2). Последовательность работ по данному правилу является близкой к оптимальному расписанию (рисунок, поз.е), но неоптимальной, так как имеется простой оборудования и потеря времени от ожидания обслуживания детали 3 около 16% (7 часов из 44 часов общей трудоемкости работ).

Таблица 2

Критерии оптимальности	Эвристические правила составления расписания производственных работ					ОР*	P <sub>i</sub>
	Пр. 1	Пр. 2	Пр. 3	Пр. 4	Пр. 5		
Общее время выполнения работ, ч	27	30	25	25	22	22	0,4
Время ожидания обслуживания, ч:	6	6	19	4	7	3	0,3
- деталь 1	-	3	1	2	-	-	5
- деталь 2	2	-	10	2	7	3	
- деталь 3	4	3	8	-	-	-	
Потеря времени при выполнении комплекта деталей, %	<b>13,6</b>	<b>13,6</b>	<b>43</b>	<b>9,1</b>	<b>15,9</b>	<b>6,8</b>	-
Общая длительность простоев оборудования, ч:	10	16	1	8	3	3	0,2
- фрезерный станок	2	-	-	-	-	-	5
- шлифовальный станок	8	11+5	1	2+6	2+1	3	
Оценка полученного расписания	<b>15,8</b>	<b>19,1</b>	<b>15,1</b>	<b>13,8</b>	<b>11,6</b>	<b>10,6</b>	1

Примечание: ОР\* – оптимальное расписание.

Наилучший результат дает алгоритм объединения правил кратчайшей операции и максимум остаточной трудоемкости. Однако полученная последовательность производственных работ по этому правилу имеет потери времени почти 16% (время ожидания обслуживания). При этом в оптимальном расписании эти потери составляют менее 7%.

### 3. Выводы

*Научная новизна.* В результате анализа эвристических правил поиска оптимального расписания работ в единичном производстве впервые определены следующие направления повышения эффективности краткосрочного планирования производственных работ:

1. Использование существующих эвристических правил для поиска оптимального расписания работ позволяет получить только близкие к оптимальному расписанию решения. Применение того или иного правила в разных производственных ситуациях зависит от характера приоритетов работ, количества дополнительного оборудования, размера незавершенного производства и других производственных факторов. Если набор операций по комплекту деталей более 50, то в полученном расписании потери времени составляют не менее 40%.

2. Для получения близкого к оптимальному расписанию необходимо комбинировать правила так, чтобы они позволяли формировать расписания с учетом ожидаемого результата на один шаг вперед. Для каждого оборудования необходимо оценивать длительности последующих операций по деталям и времени окончания их обработки так, чтобы время между операциями было минимально (рисунок, поз.е – изменен порядок запуска детали 2 и 4). Это обеспечит не только сравнительно малое время выполнения комплекса работ, но и изготовление деталей с потерей времени не более 15% (время простоя станков сократится до 3%).

*Практическая ценность* работы состоит в том, что полученные направления легли в основу методики составления оптимального расписания запуска деталей в производство, которая реализована в программном комплексе «Расписание».

**Список литературы:** 1. Царев В.В. Внутрифирменное планирование. СПб.: Питер, 2002. 496 с. 2. Горнев В.Ф., Емельянов В.В., Овсянников М.В. Оперативное управление в ГПС. М.: Машиностроение, 1990. 256 с. 3. Родионов Б.Н. Организация, планирование и управление машиностроительным предприятием. М.: Машиностроение, 1990. 328с.

Поступила в редколлегию 07.03.2007

**Кузьменко Виктор Михайлович**, канд. техн. наук, проф. кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: информационные технологии в дискретных системах, имитационное моделирование сложных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.

**Таран Светлана Викторовна**, ассистент кафедры компьютерных информационных технологий Донбасской государственной машиностроительной академии (г. Краматорск), аспирант кафедры системотехники ХНУРЕ. Научные интересы: оперативное планирование единичного производства машиностроительных предприятий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14.