

# СОСТАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАСПИСАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДА «СТОИМОСТЬ-ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

Мауэргруз Ю. Е.

Доклад является русскоязычной версией доклада “Cost-Efficiency Method for Production Scheduling”, прочитанного автором на конгрессе World Congress on Engineering, Лондон, 5 июля 2013.

Оригинал доклада размещен на сайте [www.iaeng.org/publication/WCE2013](http://www.iaeng.org/publication/WCE2013), pp.587-593.

## Аннотация

Описывается динамический Парето-оптимальный метод составления расписаний работ для различных задач о производственных расписаниях, основанный на одновременном использовании двух критериев: производственных затрат и средней полезности выполнения заказов. Метод основан на применении понятия производственной напряженности, являющейся динамическим параметром производственного процесса. Разработан пакет прикладных программ, позволяющих вести планирование для среднего количества работ. Результатом работ программ является набор не доминируемых (не улучшаемых) вариантов, которые предлагаются пользователю для принятия окончательного решения.

Ключевые слова: расписание; производственная напряженность; одиночная машина; параллельные машины; Парето – оптимальность.

## 1. Введение

Критерии качества т.н. первого уровня модели цепочек поставок SCOR, который, как правило, используется в процессе планирования, относятся к одной из 4 категорий – уровень обслуживания потребителей; экономические показатели; гибкость удовлетворения спроса; развитие выпускаемых продуктов.

В процессах производственного планирования обычно критерии последней категории не рассматриваются, а гибкость удовлетворения спроса обеспечивается выбором стратегии – «на склад» или «под заказ». Поэтому качество планирования зависит от уровня обслуживания и стоимости производства. Высокий уровень обслуживания потребителей (эффективность) достигается своевременным выполнением обязательств производителя. Однако точное выполнение заказов находится в противоречии с высоким уровнем использования оборудования и увеличивает затраты. Такая тенденция называется «дилеммой планирования операций» (Nyhuis and Wiendal, 2008).

Для решения этой проблемы в последние годы вызвало появление ряда исследований, в которых рассматриваются многокритериальные задачи планирования. Решение этих задач в большой степени зависит от выбранных критериев качества расписания. В качестве таких критериев часто выбирается время выполнения всего установленного списка работ  $C_{\max}$ , наибольшее запаздывание  $T_{\max}$ , среднее запаздывание  $\bar{T}$  и т.п. Характерный пример этого подхода осуществлен в работе Ang et al. (2009), в которой для одиночной машины используются три критерия: критерий последовательных приходов FIFO, критерий относительной трудоемкости переналадки SSU+ и критерий критического отношения CR. Критерий SSU+ представляет собой отношение трудоемкости наладки  $s_i$  к полной трудоемкости  $\sum p_i$  всех планируемых работ одного вида.

Из-за большой сложности в исследованиях, главным образом, используются различные эвристические методы. Некоторые из таких методов направлены на построение Парето-оптимальных решений для двух выбранных критериев. В ряде случаев совокупность нескольких критериев путем их суммирования с различным весом для каждого критерия сводится к одному обобщенному критерию. Например, в статье Azadeh et al. (2010) для одиночной машины используются критерии суммарного запаздывания

$\sum T_i$ , суммарной длительности цикла  $\sum F_i$  и полной загрузки машины  $K$ . Для параллельных машин аналогичная задача была сведена к однокритериальной путем использования линейной комбинации исходных критериев (Bozorgirad and Logendran, 2012). Для поточного производства в работе (Yagmahan and Yenisey, 2010) разработан метод «муравейника» (ant colony system algorithm). В качестве критериев оптимизации используются  $C_{\max}$  и длительность производственного цикла.

Указанные выше критерии являются косвенными и непосредственно не отражают требования SCOR-модели. Поэтому в некоторых работах последнего времени (Sillaparcha, 2012) делаются попытки составления расписания путем прямого использования критерия стоимости и критерия своевременного обслуживания. Для этой цели в указанной работе описывается довольно сложная система последовательного планирования.

Снижение издержек при планировании обычно достигается за счет применения группирования подобных работ, которое обеспечивает небольшую трудоемкость перехода от одной работы к другой внутри группы. Как показано в работе Mauergauz (2012<sup>a</sup>), при групповом планировании в качестве критериев могут рассматриваться относительная стоимость переналадок  $U$  и средняя полезность заказов  $\bar{V}$ . В настоящей работе демонстрируется возможность применения этих критериев для решения нескольких задач производственных расписаний.

Остальная часть статьи организована следующим образом. В разделе 2 определяются функция текущей полезности заказов и функция потерь от прямых затрат. В разделе 3 описывается составление расписаний для группового последовательного выполнения работ на одиночной машине. В разделе 4 описываются расписания для группового планирования участка из параллельных машин при производственной стратегии «на склад». Раздел 5 посвящен планированию универсального производства, заключение содержится в разделе 6.

## 2. Функции полезности при планировании

Положим, что планирование проводится в момент времени  $t = 0$ , причем к этому моменту для некоторых работ уже возможна просрочка директивного срока выполнения, т.е. некоторые  $d_i \leq 0$ . Поэтому необходимо использовать динамический критерий уровня обслуживания потребителей, пригодный в диапазоне сроков выполнения  $-\infty < d_i < \infty$ .

Уровень выполнения заказов можно оценить с помощью функций текущей полезности заказов  $V$ . С точки зрения производителя, ценность заказа увеличивается с ростом его трудоемкости, поскольку это повышает занятость персонала предприятия. Кроме того, чем больше запас времени для выполнения заказа, тем заказ привлекательнее, т.к. имеется возможность для подготовки его выполнения. С течением времени этот запас уменьшается и, соответственно, ценность заказа падает. Более того, если выполнение заказа просрочено, то ценность заказа может стать отрицательной.

Отношение производителя к заказу со временем изменяется, а соответствующая функция называется производственной напряженностью (Мауэргруз, 1999):

$$H_i = \frac{w_i p_i}{G} \frac{1}{(d_i - t) / \alpha G + 1} \quad \text{при } d_i - t \geq 0 \quad \text{и} \quad H_i = \frac{w_i p_i}{G} \left( \frac{t - d_i}{\alpha G} + 1 \right) \quad \text{при } d_i - t \leq 0, \quad (1)$$

где  $p_i$  – трудоемкость  $i$ -ой работы,  $w_i$  – коэффициент приоритета,  $G$  – длительность планового периода,  $\alpha$  – «психологический коэффициент».

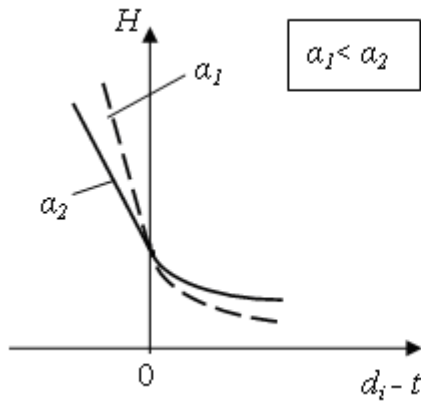


Рис.1 - Зависимость производственной напряженности от запаса времени

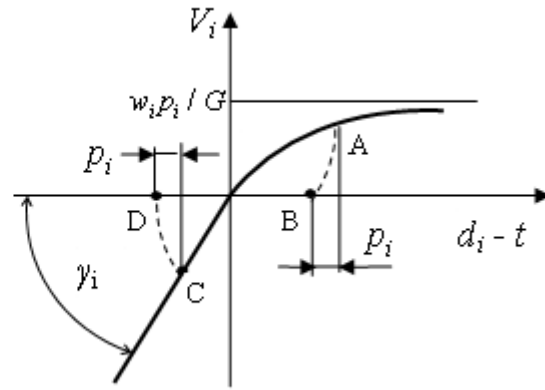


Рис.2 – Функция текущей полезности заказа

Кривые на рис.1 отличаются значением психологического коэффициента. Психологический коэффициент определяет степень спокойствия, когда запас времени больше 0 и степень нервозности, при величине, меньшей 0. Чем больше  $\alpha$ , тем спокойней воспринимаются задержки, тем меньше напряженность. Использование напряженности для описания состояния объектов при планировании, благодаря присущему ей свойству аддитивности, позволяет проводить самые разнообразные оценки производственной ситуации: сравнивать напряженность на различном оборудовании, на участках, цехах, заказах и т.д.

Понятие производственной напряженности можно использовать для определения функции текущей полезности заказов  $V$  (рис.2). Положим, что для  $i$ -ого заказа текущая полезность

$$V_i = \frac{w_i p_i}{G} - H_i. \quad (2)$$

Кривая на рис.2 в положительной области  $d_i - t \geq 0$  стремится к горизонтальной асимптоте

$$V_i = w_i p_i / G. \quad (3)$$

В отрицательной области  $d_i - t \leq 0$  кривая превращается в прямую, для которой

$$\operatorname{tg} \gamma_i = \frac{w_i p_i}{\alpha G^2}. \quad (4)$$

Рассмотрим характер изменения полезности на отрезке времени от начала выполнения работы до ее окончания. Пусть точка A в положительной области на рис.2 соответствует в расписании началу выполнения  $i$ -ой работы с трудоемкостью  $p_i$ . При выполнении работы ее остающаяся трудоемкость падает примерно по линейному закону. Однако, поскольку напряженность с течением времени нарастает, то текущая полезность заказа  $V_i$  за время  $p_i$  будет нелинейно уменьшаться с увеличением времени (с падением  $d_i - t$ ) до 0, что отражается на рис.2 штриховой линией AB. Аналогично при начале выполнения  $i$ -ой работы в точке C отрицательной области на рис.2 полезность заказа  $V_i$  за время  $p_i$  увеличивается по линии CD.

Положим, что количество заказов на горизонте планирования равно  $N$ . Тогда их общая текущая полезность равна сумме полезностей каждого, т.к. заказы, как правило, независимы и суммарное значение функции текущей полезности заказов

$$V = \sum_{i=1}^N V_i = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^N w_i p_i - \sum_{i=1}^N H_i. \quad (5)$$

Значение функции  $V$  меняется со временем, т.к. изменяется запас времени до планового момента выполнения. Кроме того, часть заказов оказывается выполнена, а также появляются новые заказы.

Пусть в момент времени  $C_l$  заканчивается работа в узле дерева возможных вариантов расписаний, находящемся на уровне  $l$ . Если  $k$ -ая работа начинается в момент  $t_k$ , который больше или равен  $C_l$ , то средняя полезность всего имеющегося набора работ  $J$  за все время от начала работ до окончания выполнения  $k$ -ой работы в момент  $t_k + p_k$  в узле на уровне  $l+1$  определяется как

$$\bar{V}_{l+1,k} = \frac{1}{t_k + p_k} \int_0^{t_k + p_k} V dt = \frac{1}{t_k + p_k} (\bar{V}_l \times C_l + \int_{C_l}^{t_k + p_k} V_k dt). \quad (6)$$

Интеграл в (6) согласно (2) равен

$$\int_{C_l}^{t_k + p_k} V_k dt = \frac{1}{G} \int_{C_l}^{t_k + p_k} \sum_{i \in J - I_l} w_i p_i dt - \int_{C_l}^{t_k + p_k} \sum_{i \in J - I_l} H_i dt, \quad (7)$$

где  $I_l$  – множество работ, выполняемых по плану до момента  $t_k$ .

Возможные варианты использования формулы (7) для одиночной машины, а также правила вычисления входящих в нее интегралов приведены в (Мауэргауз, 2012<sup>б</sup>).

Величина относительных прямых издержек для одиночной машины используется качестве первого критерия в дилемме «стоимость/эффективность». Если порядковый номер планируемой работы равен  $n$ , то

$$U = \frac{1}{c} [c_s \sum_{l=0}^n s_l + c_r \sum_{l=0}^n (t_{kl} - C_l)], \quad (8)$$

где  $c_s$  – стоимость единицы времени (часа) переналадок,  $c_r$  – стоимость единицы времени (часа) простоя,  $s_l$  – длительность переналадки работ на уровне  $l$ .

Таким образом, оптимизация расписания для одиночной машины состоит в достижении максимально возможного значения средней полезности заказов  $\bar{V}$  и минимально возможных затрат  $U$  на горизонте планирования  $h$ . При этом значения  $\bar{V}$  определяются по формуле (6), а значения  $U$  по формуле (8), на каждом уровне дерева возможных решений.

### 3. Расписания для группового последовательного выполнения работ на одиночной машине

Положим, что для обработки на машину в любой последовательности поступают работы, относящиеся к одному из  $S$  различных видов, причем длительность переналадок  $s_{fq}$  с вида  $f$  на другой вид  $q$  зависит от их порядка, простаивание машины при наличии работ возможно, но вызывает дополнительные затраты. В соответствии с известным трехэлементным способом классификации расписаний рассматриваемая задача имеет вид

$$1 | r_i, d_i, s_{fq} | U, \bar{V}. \quad (9)$$

В формуле (9) есть две целевых функции, причем их одновременное улучшение возможно только в определенных пределах. Таким пределом является Паретовская компромиссная кривая, в точках которой улучшение (уменьшение) функции  $U$  всегда связано с ухудшением (уменьшением) значения  $\bar{V}$ . Для решения задачи (9) целесообразно воспользоваться методом, основанным на «жадном» подходе (Canon and Jeannot, 2011), для чего построим дерево поиска не доминируемых решений. Пользуясь выражениями (1-2), (6,7) и формулами, приведенными в (Мауэргауз, 2012<sup>б</sup>), можно рассчитать значения

критерия  $\bar{V}$  в каждом узле дерева. Одновременно в каждом узле по формуле (8) определяется значение  $U$ . Ниже приведен алгоритм решения задачи методом «жадного» многокритериального поиска.

Шаг 1. (Расчет функций полезности в начальный момент планирования)

Положим номер уровня  $l=0$ ; машина свободна, т.е.  $C_l=0$ ; начальная функция издержек  $U_0=0$ ; начальная полезность заказов  $V_0$  определяются по формуле (5).

Шаг 2. (Расчет функций полезности на следующих уровнях)

Для каждой  $k$ -ой работы, которая поступила к моменту  $C_l$ , и не является выполненной ранее, рассчитываются значения  $U_{l+1,k}$  и  $\bar{V}_{l+1,k}$  по формулам (8) и (6).

Шаг 3. (Определение доминируемых узлов дерева)

Если уровень  $l+1 < N$ , то для доминирования на  $l+1$ -ом уровне  $j$ -ого узла дерева с  $i$ -ой работой над  $r$ -ым узлом с  $k$ -ой работой достаточно, чтобы соблюдались неравенства

$$U_{l+1,j} \leq U_{l+1,r}, \quad \bar{V}_{l+1,j} \geq \bar{V}_{l+1,r} \text{ и } g_i < g_k, \quad (10)$$

причем первое или второе неравенство является строгим.

Иначе: для доминирования на последнем уровне  $l+1 = N$  необходимо, чтобы

$$U_{l+1,j} \leq U_{l+1,r}, \quad \bar{V}_{l+1,j} \geq \bar{V}_{l+1,r}. \quad (11)$$

Шаг 4. (Переход на новый уровень или окончание работы)

Увеличение номера уровня  $l = l + 1$ .

Если уровень  $l = N$ , то окончание работы.

Иначе: переход на шаг 2.

В неравенстве (10) используется необходимый момент запуска  $g_i$ , который определяется как

$$g_i = d_i - p_i. \quad (12)$$

Рассмотрим пример, в котором на машине могут в любой последовательности выполняться 3 вида работ, причем длительность переналадки зависит от их порядка (табл.1). В табл.1 приведены 5 работ, которые должны быть выполнены на 7-часовом горизонте. Нормы времени на переналадку меняются в пределах от 0,1 до 0,3.

Таблица 1 – Характеристики работ

| Работа                            | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|----|---|---|---|---|
| Вид продукта                      | 1  | 2 | 1 | 3 | 1 |
| Трудоемкость в часах $p_i$        | 1  | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Требуемый момент выполнения $d_i$ | -1 | 2 | 3 | 3 | 6 |
| Возможный момент запуска $r_i$    | -4 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| Необходимый момент запуска $g_i$  | -1 | 1 | 3 | 2 | 6 |

Как следует из табл.1, необходимо запланировать три вида работ, так что группирование целесообразно. Для нахождения не доминируемых решений по критериям  $U$  и  $\bar{V}$  была разработана программа на языке VBA для MS Excel. Результаты полученного численного решения, записанные на листе MS Excel, приведены на рис.3. Номера работ в каждом из вариантов автоматически сгруппированы по видам работ. Так, например, в вариантах 2 и 3 группируются работы 1 и 3, относящиеся к виду 1, а в варианте 4 сгруппированы работы 1, 3 и 5.

|   | A | B   | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2 |   | Недоминируемые варианты в результате расчета на горизонте планируемых работ, равном 7 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3 |   | Вариант 1: 1, 2, 3, 4, 5  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 4 |   | Вариант 2: 1,3, 2, 4, 5   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5 |   | Вариант 3: 2, 1,3, 4, 5   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6 |   | Вариант 4: 2, 1,3,5, 4  |   |   |   |   |   |   |   |   |

Рис.3 – Результаты работы программы для данных в таблицах 1 и 2.

Каждому варианту 1 ÷ 4 последовательности соответствует своя траектория на плоскости средней полезности заказов  $\bar{V}$  и относительных затрат  $U$  (рис.4). Соединяя точки различных вариантов для одного горизонта, можно получить набор паретовских решений. В примере на рис.4 такие компромиссные кривые **a**, **b**, **c** построены для горизонтов 6, 7, 8 соответственно.

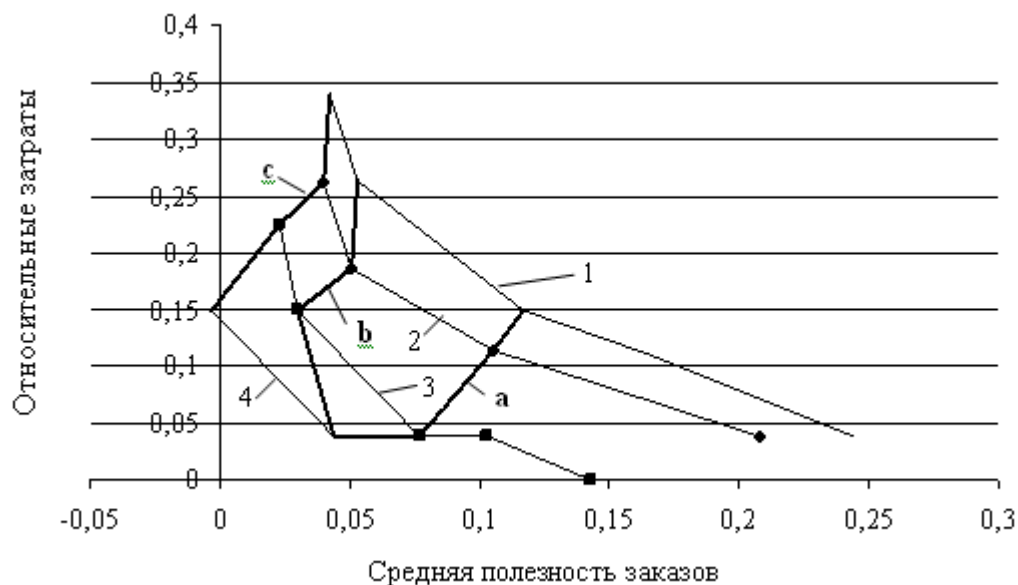


Рис.4 – Графики полезности вариантов расписания 1 ÷ 4 ;  
**a** - горизонт 6; **b**– горизонт 7; **c**– горизонт 8.

Изучение графиков на рис.3 позволяет сделать некоторые выводы о свойствах решений на плоскости  $U \bar{V}$ . Средняя полезность заказов  $\bar{V}$  на каждом следующем горизонте явно уменьшается, что вполне естественно, т.к. запаса времени для выполнения заказов уменьшается. В то же время относительные затраты  $U$  увеличиваются. Разброс точек вариантов на плоскости увеличивается с увеличением горизонта.

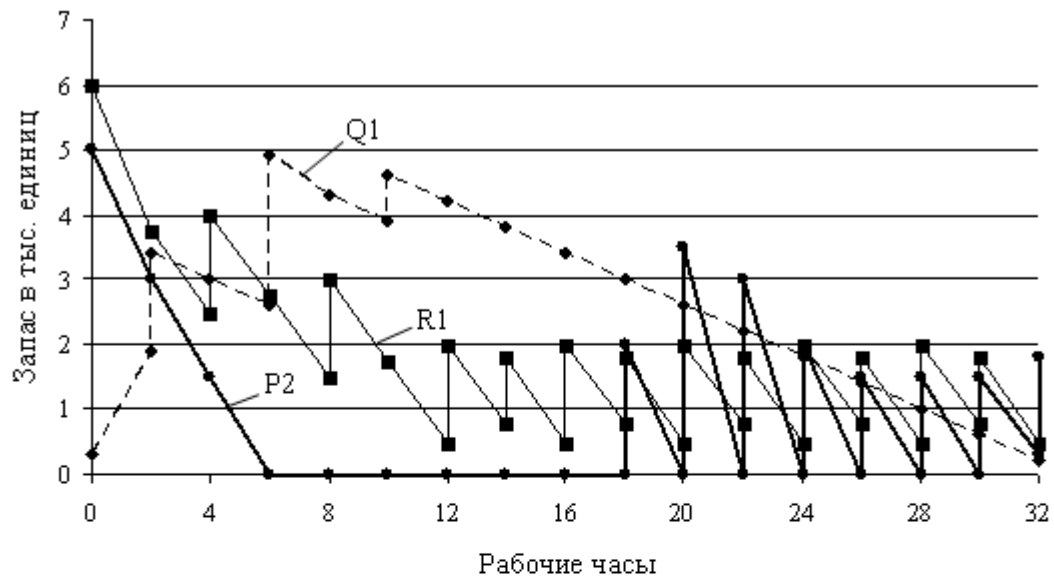
#### 4.Расписания для группового планирования параллельных машин при производственной стратегии «на склад»

При планировании для нескольких параллельных машин воспользуемся средней трудоемкостью  $i$ -ой работы, которая равна

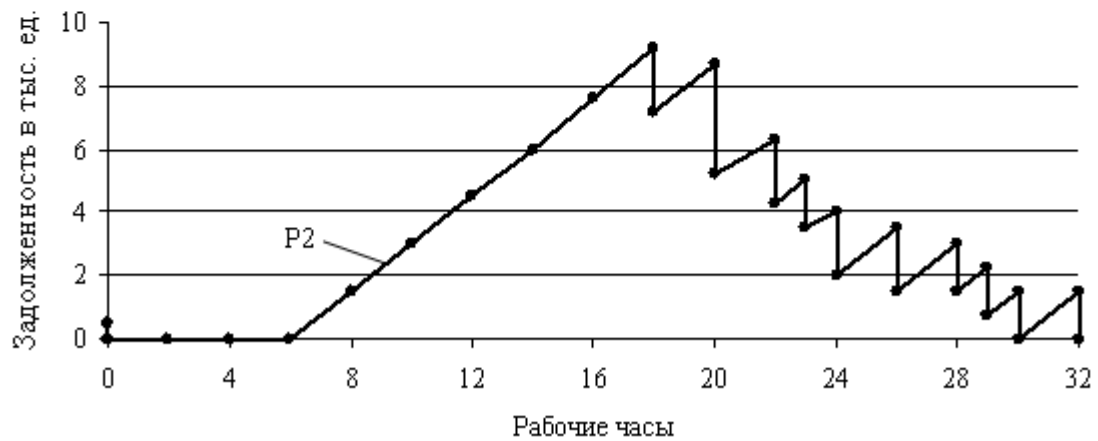
$$\bar{p}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \quad (13)$$

где  $p_{ij}$  – трудоемкость  $i$ -ой работы на  $j$ -ой машине;

При составлении расписания для производства «на склад» отдельные заказы потребителей не рассматриваются. В то же время это совершенно не означает, что их интересами можно пренебречь. При такой стратегии необходимо обеспечить, по возможности, достаточный запас каждого выпускаемого продукта в течение всего периода производства. Такой запас должен обеспечить как удовлетворение предполагаемого среднего спроса, так и небольшие отклонения спроса от средних значений. Для последнего необходимо сохранять некоторый страховой запас.



а)



б)

Рис.5 – Изменения запасов и задолженностей за время выполнения задания

Для нескольких параллельных машин рекуррентная формула (6) применяется без изменений в том случае, если работа последующего уровня  $l+1$  заканчивается позже работы предыдущего уровня  $l$ . В противном случае вместо формулы (6) используется зависимость

$$\bar{V}_{l+1,k} = \bar{V}_l + \frac{1}{C_{il}} \int_{C_{jq}}^{t_k + p_k} V_k dt, \quad (14)$$

где  $i$  - номер машины в узле дерева, из которого производится ветвление;  $j$  - номер машины, на которой планируется работа  $J_k$  в новой ветви дерева;  $C_{il}$  - момент окончания выполнения работ на машине  $i$  на уровне  $l$ ;  $C_{jq}$  - момент окончания ранее запланированной на уровне  $q$  последней работы на машине  $j$ . Алгоритм поиска решения подобен алгоритму для одиночной машины с той разницей, что в узлах определяются не только работы, но и машины.

Рассмотрим задачу планирования работы шести машин с различными техническими характеристиками, на которых производятся 6 видов продуктов. Положим, что изготовление любого продукта на каждой из машин возможно только в размерах, не меньших, чем т.н. «техническая партия». Такой партией может являться объем машины

(для процессных производств), размер упаковки для дискретных продуктов, величина транзитной нормы (например, по весу) и т.п. Длительность изготовления технической партии определяется техническими возможностями машины и зависит от вида продукта.

В процессе выполнения задания изменяются размеры запасов и задолженностей по каждому продукту. Очевидно, что хорошим является расписание с небольшими средними запасами и отсутствием задолженности. На рис.5а показаны три наиболее характерных при планировании процесса движения запасов, которые имеют место для продуктов P2, Q1 и R1. . Движение запасов продукта P1 и P3 в значительной степени аналогично процессу для продукта Q1, продукта Q2 - аналогично продукту P2.

Из графиков на рис.5а следует, что наиболее равномерным является процесс производства продукта R1, причем никаких задолженностей по этому продукту не возникает. Отметим, что по продукту R1 предусмотрен наибольший страховой запас, что существенно повлияло на такой исход планирования. При производстве продукта Q1 планом предусмотрено создание значительного запаса в начале планового периода и затем постепенный расход до величины, близкой к страховому запасу, причем задолженности в этом случае также не возникает.

Гораздо более сложная ситуация имеет место с продуктом P2. В соответствии с расписанием, первоначально имевшийся довольно значительный запас должен быть израсходован в течение шести часов; затем по этому продукту возникает и растет задолженность, показанная на рис.5б. Задолженность по этому продукту удастся свести к нулю только в самом конце периода.

## 5. Расписания для группового планирования машин при универсальном производстве

Эта задача может рассматриваться как составление расписания для нескольких групп параллельных машин различного назначения. В данном случае каждая работа состоит из набора операций, каждая из которых выполняется на одной из машин соответствующего назначения. Положим, что множество работ в производстве подразделяется на нескольких видов, причем нормы наладки на операцию  $s_{ij}$  зависят от соответствующей группы машин  $j$  и вида работы  $i$ .

В качестве примера рассмотрим составление расписания для 20 работ, каждая из которых включает от трех до пяти различных операций, производимых в любой заданной последовательности. Положим также, что количество разновидностей работ равно 6, количество групп машин равно 5. В табл.2 приведено состояние машин на момент начала выполнения расписания.

Таблица 2 – Состояние машин в момент планирования

| Номер машины | Группа машин | Отметка включения | Настройка в начале | Момент освобождения |
|--------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| 1            | 1            | 1                 | 3                  | 0                   |
| 2            | 1            | 0                 | 1                  | 3                   |
| 3            | 2            | 1                 | 4                  | 2                   |
| 4            | 2            | 0                 | 2                  | 0                   |
| 5            | 2            | 1                 | 2                  | 4                   |
| 6            | 3            | 1                 | 1                  | 0                   |
| 7            | 4            | 1                 | 4                  | 5                   |
| 8            | 4            | 1                 | 3                  | 0                   |
| 9            | 5            | 1                 | 5                  | 0                   |

Как видно из табл.2, в группе 1 имеется 2 машины, группа 2 включает 3 машины, в группе 4 есть 2 машины, в остальных группах – по одной машине. При этом машина 2 в группе 1 и машина 4 в группе 2 выключены из планирования.

Применение метода планирования, изложенного выше, приводит к двум не доминируемым вариантам расписания, один из которых показан на рис.6 как запись на листе MS Excel. Числа в последовательности для каждой машины показывают номер



работы и (через дробь) номер операции этой работы, производимой на этой машине. Числа, взятые в скобки, образуют группу работ одного вида, для которых не требуется переналадка.

|   | A   | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Машина 1: 2/1, (8/1, 6/1), 5/2, (16/1, 10/1), (3/2, 12/1), 13/1, 14/1, 18/1, 20/1, (11/2, 15/2) |   |   |   |   |   |   |
| 2 | Машина 3: 3/1, 5/1, (7/1, 15/1, 11/1, 4/4), 17/2, (18/3, 12/4), (7/3, 15/4), 20/5               |   |   |   |   |   |   |
| 3 | Машина 5: 9/1, (8/2, 6/2), 10/3, 20/3, 19/2, 13/3   |   |   |   |   |   |   |
| 4 | Машина 6: 1/4, 4/2, (2/2, 9/2), (5/3, 17/1, 17/3), (3/4, 12/2, 18/2),                           |   |   |   |   |   |   |
| 5 | (10/2, 16/2), 7/2, (19/1, 8/3), (13/2, 20/4), 10/5, 15/5  |   |   |   |   |   |   |
| 6 | Машина 7: (3/3, 12/3)   |   |   |   |   |   |   |
| 7 | Машина 8: 4/3, 6/3, (5/4, 17/4), 20/2, (15/3, 11/4), (8/4, 19/3)                                |   |   |   |   |   |   |
| 8 | Машина 9: (2/3, 9/3), 6/4, (5/5, 14/2), 3/5, 17/5, 11/3, (18/4, 12/5), (10/4, 16/3), 8/5        |   |   |   |   |   |   |

Рис.6 – Результат планирования для одного из не доминируемых вариантов

На рис.7 приведены диаграммы Ганта для машин 1 и 3. Прямоугольники на диаграммах соответствуют рабочим операциям, зазоры – холостому времени. Красные линии соответствуют операциям, не требующим переналадки, т.к их вид работ совпадает с видом предшествующих работ.

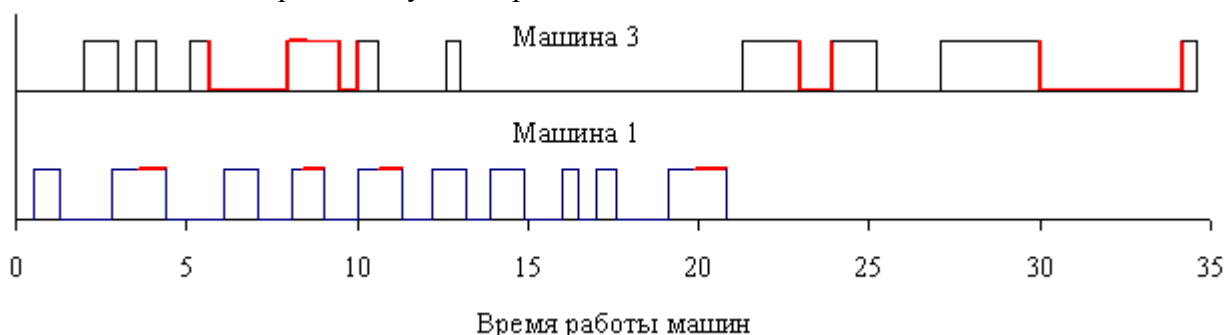


Рис.7 – Диаграммы Ганта для двух машин

## 6. Заключение

Мы рассмотрели метод динамического решения дилеммы планирования для одиночной машины, нескольких параллельных машин и универсального производства. В качестве критериев, характеризующих соотношение «стоимость/эффективность» используются относительная стоимость переналадок  $U$  и средняя полезность заказов на горизонте планирования  $\bar{V}$ . Величина средней полезности определяется в зависимости от производственной напряженности каждого из заказов  $H_i$ , меняющейся с течением времени. Для построения расписаний строится набор парето-оптимальных решений на горизонте планирования, на основании которого пользователь принимает окончательное решение.

Существенными преимуществами описанного метода планирования по сравнению с существующими является его использование при отрицательной величине запаса времени для выполнения работы. Кроме того, метод позволяет анализировать значения относительных затрат и средней полезности заказов чтобы выбрать наиболее приемлемый вариант расписания

При составлении расписания для одиночной машины описанный метод может применяться не только для последовательного выполнения работ, но и параллельно-последовательного. Количество возможных работ в таком случае определяется размерами машины и обрабатываемых партий. Расчеты показывают, что предлагаемый метод планирования работы одиночной машины работоспособен в большом диапазоне значений параметров.

Если производство является поточным, то оно может рассматриваться как частный случай универсального производства с единообразной последовательностью операций и соответствующих групп машин. Поэтому предложенный метод может успешно

применяться для поточного производства как с использованием стратегии «под заказ», так и стратегии «на склад».

В реальных условиях на процесс планирования могут накладываться различные дополнительные ограничения. Например, часто бывает необходимо учитывать текущую стоимость оснастки, ограниченные возможности хранения конкретного продукта по объему и длительности, необходимость совместной отгрузки различных продуктов и т.д. Учитывать все такие ограничения в одной программе, на наш взгляд, нецелесообразно. По-видимому, в каждом из таких случаев программа должна специально дорабатываться совместными усилиями заказчика и основного разработчика.

### Ссылки

- Ang, A.T.H., Sivakumar, A.I. and Qi, C. (2009) 'Criteria selection and analysis for single machine dynamic on-line scheduling with multiple objectives and sequence-dependent setups', *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, No. 4, pp.1223–1231.
- Azadeh, A., Keramati, A., Karimi, A. and Moghaddam, M. (2010) 'A multi-objective genetic algorithm for scheduling optimization of  $m$  job families on a single machine', *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp.417–439.
- Bozorgirad, M. A. and Logendran, R. (2012) 'Sequence-dependent group scheduling problem on unrelated-parallel machines', *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 10, pp. 9021-9030
- Canon, L.-C. and Jeannot, E. (2011) 'MO-Greedy: an extended beam-search approach for solving a multi-criteria scheduling problem on heterogeneous machines', In *the IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and PhD Forum*, Anchorage, Alaska, USA.
- Мауэрггауз Ю.Е. (1999) Информационные системы промышленного менеджмента, М.: Филин.
- Mauergauz, Y.E. (2012<sup>a</sup>) 'Objectives and constraints in advanced planning problems with regard to scale of production output and plan hierarchical level' *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp.369-393.
- Мауэрггауз Ю.Е. (2012<sup>b</sup>) Продвинутое планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок, М.: Экономика.
- Nyhuis, P. and Wiendal, H.P. (2009) *Fundamentals of Production Logistics*, Springer, Berlin.
- Sillapa-archa, T, Thaninthanadech, P. and Smitasiri, D. (2012) 'Advanced Cost-efficient Production Scheduling in Hi-tech Manufacturing Industry at Test Operation', *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 110-116, pp 3922-3929.
- Yagmahan, B. and Yenisey, M. (2010). 'A multi-objective ant colony system algorithm for flow shop scheduling problem', *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No.2, pp. 1361-1368.

Опубликовано <http://12news.ru>