

## "Планирование дискретного производства в условиях АСУ",

Шкруба В.В., Бодырев В.А., Вьюн А.Ф. Эфетова К.Ф., Лещенко В.А., Подчасова Т.П., Тур Л.П.,  
"Техника" , 1975, 296 с.(отрывок книги Главы 3 и 7)

### 3 Общая схема календарного планирования производственного участка

#### 3.1. Календарные планы работы производственного участка

Существует множество различных способов наглядного представления календарных планов работы производственного участка. Наибольшее распространение получили графические способы, предложенные Г. Л. Гантом . Каждая операция изображается отрезком, длина которого равна продолжительности ее выполнения в принятом масштабе времени. Начало и конец выполнения операции обозначаются специальными метками. Под отрезком или над ним записываются основные характеристики операции, например номера операции, детали, к которой относится рассматриваемая операция, и величина партии деталей, а для больших участков — номера рабочих мест, на которых выполняются предыдущая и последующая операции по рассматриваемой детали.

Из общего графика формируют (путем простой выборки) графики движения отдельных деталей для более четкой организации диспетчерской службы. Выбирая из общего графика перечень работ, относящихся к одной смене, получают сменные графики работы производственного участка. В последние годы широкое распространение получили специальные формы представления «технологических маршрутов» и календарных планов в виде так называемых стрелочных диаграмм или сетевых графиков. Такие формы представления чаще всего используются при сложных разработках, выполнении индивидуальных заказов особой важности, проектировании уникальных объектов в сжатые сроки и т. д. Наряду с графическими способами представления календарных планов широкое распространение получили табличные.

### 3.2. Математическая постановка задач календарного планирования

Характеристики технологической операции. Для календарного планирования технологический процесс расчленяется на технологические операции. Будем считать, что на данном производственном участке обрабатывается  $n$  партий деталей  $d_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) (партия рассматривается как единое целое). Обозначим некоторую произвольную операцию, которую необходимо выполнить над деталью  $d_i$ , через  $O_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ), где  $t_j$  — общее количество операций, которое необходимо выполнить над  $d_i$ .

Каждая операция  $O_{ij}$  однозначно определяется парой символов

$$O_{ij} = \langle l_{ij} T_{ij} \rangle \quad (2.1)$$

, где

- $l_{ij}$  — номер группы оборудования, на котором может быть выполнена операция  $O_{ij}$ ;
- $T_{ij}$  — продолжительность выполнения операции на некотором эталонном для данной группы оборудования рабочем месте.

Под технологическим маршрутом детали обычно понимают порядок прохождения деталью рабочих мест в процессе обработки или же последовательность выполняемых операций

$$M_i = \langle O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im} \rangle \quad (2.2)$$

При последовательном выполнении операций предполагается строгая упорядоченность технологического маршрута. Однако можно предположить, это часто и есть на самом деле, что порядок выполнения операций изменяется (не является строгим), т. е. упорядоченность выполнения операций частичная. Операция  $O_{ij}$  должна выполняться без перерыва с самого начала. Если обозначить через  $t_{if}$  — время начала обработки операции  $O_{ij}$ , а через  $t_{ij}$  — момент окончания обработки операции, то для эталонного станка всегда должно выполняться

$$\bar{t}_{ij} = t_{ij} + T_{ij} \quad (2.3)$$

Очевидно, что время начала обработки операции должно зависеть от времени выполнения предыдущих. В частности, для технологического маршрута, заданного в виде уравнения (1), всегда должно быть

$$t_{ij} \leq t_{ij+1} \quad (2.4)$$

В общем случае можно считать, что известен алгоритм вычисления возможного времени начала обработки операции, если известны времена выполнения предыдущих операций.

Рабочие места. Пусть весь рассматриваемый участок состоит из  $P$  рабочих мест  $R_p$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ ). Эти рабочие места объединяются в группы оборудования  $\Gamma_l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ), причем группы оборудования могут состоять только из одного станка, а каждое рабочее место может входить в разные группы оборудования. Каждое рабочее место  $R_p$  обладает некоторым коэффициентом переработки норм  $r_p$  по отношению к эталонному рабочему месту для данной группы оборудования. Поэтому реальное время выполнения операции  $O_{ij}$  на рабочем месте  $R_p$  из группы оборудования с номером  $l_{ij}$

$$T_{ij} r_p(l_{ij}) \quad (2.4)$$

а реальные характеристики выполнения операции связаны соотношением

$$\bar{t}_{ij} = t_{ij} + T_{ij}(p) \quad (2.5)$$

где

$$T_{ij}(p) = T_{ij} r_p(l_{ij}) \quad (2.6)$$

Хотя задание коэффициента переработки норм для каждого рабочего места — вопрос нелегкий, и можно спорить о достоверности такого рода нормативов, однако такими коэффициентами сплошь и рядом пользуются на практике и для расчетов. Для упрощения решения задач календарного планирования будем считать, что на каждом рабочем месте не может выполняться более одной операции одновременно. Это условие можно

сформулировать и иначе: ни для каких двух операций  $O_{i_1j_1}$  и  $O_{i_2j_2}$  выполняемых на одном и том же рабочем месте, не может выполняться неравенство

$$t_{i_1j_1} \leq t_{i_2j_1} < \bar{t}_{i_1j_1} \quad (2.7)$$

Математическая постановка задачи. Задача календарного планирования заключается в том, чтобы для производственного участка с заданными технологическими маршрутами обработки деталей построить некоторый календарный план (предположим в виде графика Ганта), удовлетворяющий сформулированным условиям. Очевидно, построение такого графика эквивалентно определению чисел  $t_{ij}$  и  $\bar{t}_{ij}$  [вернее, только чисел  $t_{ij}$  так как числа  $\bar{t}_{ij}$  после этого уже легко найти по формуле (4)] — моментов начала операций  $O_{ij}$ . Таким образом, величины  $t_{ij}$  и являются неизвестными в нашей задаче и их следует найти, исходя из приведенной формулировки задачи с учетом ограничений (3) - (5).

Совокупность чисел  $\{t_{ij}\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ), удовлетворяющих сформулированным условиям и ограничениям, будем называть в дальнейшем календарным планом работы производственного участка, или его графиком, и обозначать символом  $G$ . Графиком  $G(i)$  обработки детали  $d_i$  будем называть совокупность чисел  $\{t_{ij}\}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), (т. е. при фиксированном индексе  $i$ ).

Критерии оптимальности. Нетрудно понять, что существует бесчисленное множество графиков, удовлетворяющих сформулированным условиям и ограничениям. Например, если  $G \{t_{ij}\}$  — график, то и  $\bar{G} = \{t_{ij} + h\}$  — тоже график ( $h > 0$  произвольно). Таким образом, возникает задача о построении некоторого наилучшего графика в соответствии с выбранным критерием. Для решения задач оптимального календарного планирования необходимо задаться некоторой числовой функцией  $F$  (функцией-критерием), определенной на всех графиках  $G$  и ставящей в соответствие каждому графику  $G$  определенное число  $F(G)$ . Причем наилучшему графику должно соответствовать экстремальное значение функции  $F$ .

Общая задача состоит в том, чтобы построить график  $\bar{\sigma}$ , удовлетворяющий всем сформулированным в задаче условиям и ограничениям, на котором функция  $F(G)$  достигает своего экстремального (для определенности, пусть минимального) значения:

$$F(\bar{G}) = \min F(G). \quad (2.8)$$

Заметим, что в различных производственных условиях могут выбираться различные функции-критерии. Возьмем для простоты строгую упорядоченность операций в технологическом маршруте.

Введем следующие определения. Если по условиям задачи

$$V_i \leq t_{il}; B_p(O) \leq t_{ij} \quad (2.9)$$

то

$V_i$  — время готовности детали  $d_i$ ;

$B_p(O)$  — время готовности рабочего места  $R_p$  для всех  $O_{ij}$  с привязкой к рабочему месту  $R_p$ .

Желательно, чтобы  $\bar{t}_{im_i} \leq D_i$ , где  $D_i$  — требуемый срок завершения обработки детали  $d_i$  (в отличие от реального момента  $\bar{t}_{im_i}$ ).

Величину  $Z_i = \max_{i} (0, \bar{t}_{im_i} - D_i)$  назовем общей задержкой обработки детали  $d_i$ ,

$\Delta_{ij} = t_{ij} - \bar{t}_{ij-1}$  — пролеживанием операции  $O_{ij}$ ;

$\Delta_i = \sum_{j=1}^{m_i} \Delta_{ij}$  — общим пролеживанием детали  $d_i$ ,  $\Delta_{il} = t_{il} - v_i$ .

Загрузка рабочего места  $R_p$  в период времени, начиная с момента  $a$  до момента  $b$

$$T_p(a, b) = \sum_{ij} \bar{T}_{ij}(a, b)$$

$$(2.10)$$

где

$\bar{T}_{ij}(a, b) = \mu\{[t_{ij}, \bar{t}_{ij}] \cap [a, b]\}; \mu\{[c, d]\}$  - длина отрезка  $[c, d]$

$A \cap B$  — общая часть отрезков  $A$  и  $B$ .

С каждой операцией  $O_{ij}$  может быть также связана (монотонная, интегрируемая, неотрицательная) функция  $C_{ij}(t)$  — стоимости выполнения операции  $O_{ij}$ , определенная на интервале  $[0, T_{ij}]$ . С каждым графиком  $G(i)$  связана также некоторая функция  $C_i$  — общей стоимости обработки детали  $d_i$  определяемая не только функциями стоимости выполнения операций  $O_{ij}$ , но и зависящая от пролеживания операций  $O_{ij}$ .

Стоимость выполнения операции  $O_{ij}$

Запишем следующие функции-критерии с учетом введенных обозначений:

- задача минимизации суммарной задержки деталей

$$Z = \sum_i Z_i \quad (2.11)$$

- задача минимизации максимальной задержки деталей

$$\bar{Z} = \max_i Z_i \quad (2.12)$$

- задача минимизации суммарного пролеживания деталей и, следовательно, суммы производственных циклов деталей

$$\Delta = \sum_i \Delta_i \quad (2.13)$$

- задача минимизации общего времени завершения всей обработки деталей

$$T = \max \{ \bar{t}_{im_i} \}$$

$$(2.14)$$

- задача максимизации общей загрузки участка в период времени, начиная с момента  $a$  до момента  $b$

$$T(a, b) = \sum_p T_p(a, b)$$

(2.15)

- задача минимизации общей стоимости обработки деталей на участке

$$C = \sum_i C_i(\bar{t}_{im_i}) \quad (2.16)$$

- задача минимизации общего связывания денежных средств на участке

$$J = \sum_{ij} (D_i - \bar{t}_{ij}) \int_{t_{ij}}^{\bar{t}_{ij}} C_i dt \quad (2.17)$$

где  $D_i$ ; — время, когда деталь должна поступить в обработку на следующий участок или когда она будет реализована предприятием (поставлена другому предприятию или сбыту).

### 3.3 Методы календарного планирования. Общая характеристика.

Задачи построения календарного план-графика представляют собой специфический класс со сложными алгебраическими структурами, дискретными процессами оптимизации, весьма далекими от непрерывных процессов и функций, которые до недавнего времени в основном и изучались математикой. Точные методы, решающие общие задачи календарного планирования, появились только в самое последнее время. Однако эти точные методы, хотя и представляют значительный интерес при построении общей теории оптимальных решений, мало пригодны в производственных условиях, так как требуют больших объемов вычислений. Только в самых простых случаях относительно легко удастся получить точное решение задачи .

Математические методы решения задач календарного планирования разрабатываются на основе математической теории расписаний. В настоящее время нельзя остановиться на каком-то одном классе методов решения задач календарного планирования. Некоторые задачи можно успешно решить

классическими методами линейного программирования. Однако методы линейного программирования, использующие свойство аддитивности (продукта, времени, стоимости), плохо применимы к задачам теории расписаний; линейные модели недостаточно четко отражают динамику производственных процессов, а искусственные приемы учета в рамках линейных моделей некоторых динамических свойств исследуемого объекта ведут к неоправданному увеличению размерности задачи, что, конечно, не позволяет эти задачи решать достаточно быстро и точно.

Применяя к решению задач календарного планирования методы динамического программирования, удастся разработать эффективные схемы решения простейших задач. В последнее время разработаны и оказались эффективными общие схемы последовательного конструирования, анализа и отсеивания вариантов, аналогичные вычислительным схемам динамического программирования (но не требующие в общем случае выполнения принципа оптимальности).

Наряду с разработкой точных методов совершенствуются различные методы и подходы приближенного и эвристического решения задач календарного планирования.

Это направление заслуживает наибольшего внимания с точки зрения общей теории решения задач календарного планирования, а также полезно и для улучшения вычислительных схем точного решения задач. В частности, различные эффективные эвристические приемы поиска близких к оптимальному решений, как правило, могут быть использованы и в процессе конструирования точного решения задачи. Точно так же, более глубокое понимание процесса конструирования точного решения задачи может подсказать эффективные приемы поиска решений, близких к оптимальному.

Наиболее универсальным методом решения задачи построения календарного план-графика является имитационное моделирование с использованием некоторых правил предпочтения. Применение методов Монте-Карло в задачах календарного планирования приводит к так называе-

мым рандомизированным правилам предпочтения. Оба эти подхода, хорошо оправдавшие себя на практике, использованы в изложенном ниже алгоритме построения календарного плана работы производственного участка.

### 3.4 Алгоритм построения план-графиков

Для описания алгоритма моделирования при построении календарного план-графика рассмотрим в общих чертах схему последовательного анализа вариантов и способы улучшения этой схемы путем прогнозирования значения функции-критерия для отбрасываемых вариантов. Схема последовательного анализа вариантов основывается на двух важных моментах: возможности пошагового конструирования вариантов и использовании в процессе такого конструирования правила доминирования отрезков вариантов для сужения множества просматриваемых вариантов.

Пусть на  $k - 1$  шаге уже построено множество  $\bar{P}_{k-1}$  «перспективных» начал вариантов. Развиваем каждое начало вариантов из  $\bar{P}_{k-1}$  на один шаг согласно определенным способам пошагового конструирования. Получаем множество  $P_k$  начал вариантов. Это множество группируется в подмножества начал вариантов, приводящих в одинаковое состояние. Отбрасываются те начала, для которых найдутся доминирующие согласно установленным правилам доминирования. Полученное на этом  $k$ -м шаге множество составит множество  $P_k$  «перспективных» начал вариантов. Из  $P_k$  выбираются варианты, на которых достигается экстремальное значение заданной функции-критерия.

Построение множества начал вариантов и развитие каждого начала из  $\bar{P}_{k-1}$  на один шаг осуществляется моделированием. В рассматриваемом алгоритме оно сводится к формированию массива всех готовых к выполнению операций (с учетом технологических маршрутов обработки деталей, закрепления предыдущих операций, различных дополнительных

ограничений, накладываемых на выполнение операций) и массива моментов освобождения каждой единицы оборудования (с учетом ее индивидуальных и групповых особенностей и закрепления операций на предыдущих шагах построения). При сопоставлении моментов освобождения оборудования и моментов готовности операций к обработке строятся всевозможные варианты закрепления операций за оборудованием.

Определим правило доминирования для рассматриваемой задачи.

Два состояния  $P_k^1$  и  $P_k^2$  из множества начал вариантов  $P_k (P_k^1, P_k^2 \in P_k)$  будем считать одинаковыми, если  $\tilde{O}_{ij}$  совпадает с  $\tilde{\tilde{O}}_{ij}$  (где  $\tilde{O}_{ij}$ ,  $\tilde{\tilde{O}}_{ij}$  — множества операций, включенных в состояниях  $P_k^1$  и  $P_k^2$  соответственно) и  $L_1$  совпадает с  $L_2$  (где  $L_1$  и  $L_2$  — множества станков, загружаемых в состояниях  $P_k^1$  и  $P_k^2$  соответственно). Примем, что состояние  $P_k^1$  доминирует над состоянием  $P_k^2$ , если  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$  для всех  $l \in L_1 \sim L_2$  где  $\bar{t}_1, \bar{t}_2$  — моменты освобождения  $l$ -го станка в состояниях  $P_k^1$  и  $P_k^2$ .

Многовариантность задачи, большая размерность множества вариантов, низкий процент совпадающих состояний, получаемых на каждом шаге (закрепление на рассматриваемом шаге различных операций из числа требующих обработки на одном и том же станке приводит к получению различных состояний) — все это требует хранения и обработки очень больших объемов информации. С целью уменьшения обрабатываемых объемов информации описанную схему решения задачи можно модифицировать, развивая сначала лишь наиболее перспективные варианты и формируя для остальных вариантов значения функции-критерия, что аналогично методам «ветвей и границ».

Упрощенная, но не обеспечивающая получение строгого оптимума схема может быть получена, если вместо группировки множества  $P_k$  в подмножества, приводящие в одинаковое состояние, и отбрасывания начал вариантов, для которых найдутся доминирующие, на каждом шаге

множество  $P_k$  разбивать на подмножества сравниваемых (не обязательно приводящих в одинаковое состояние) вариантов и из каждого подмножества выбирать наилучший вариант согласно установленному критерию. Множествами сравнимых вариантов в рассматриваемой задаче служат, например, множества вариантов закрепления различных операций за одной и той же единицей оборудования; множества вариантов закрепления одной и той же операции за различными (из числа возможных) единицами оборудования и т. д.

Итак, основная идея алгоритма построения календарных план-графиков состоит в пошаговом формировании множеств  $\bar{\zeta}^p$  операций  $O_{ij}$ , закрепленных за оборудованием в результате  $p$  шагов и множеств  $\zeta^p$  операций, готовых к закреплению на шаге  $p$ . Множества  $\bar{\zeta}^p$ ,  $\zeta^p$  формируются моделированием с использованием функций предпочтения  $\omega(O_{ij}, p)$ , сопоставляемых каждой операции  $O_{ij}$  на каждом шаге  $p$ . Кроме того, на каждом шаге формируется множество  $R^p$  рабочих мест, которые могут загружаться на шаге  $p$ .

Пусть

$$\zeta_k^p = \{O_{ij} : O_{ij} \in \zeta^p, l_{ij} = k\} \quad (2.18)$$

На каждом шаге  $p$  в результате сопоставления множеств  $\zeta^p$  и  $R^p$  формируется множество  $\bar{\zeta}^p$  операций, закрепленных за оборудованием:

$$\bar{\zeta}^{(p)} = \bar{\zeta}^{p-1} \cup O'_{ij} \quad (2.19)$$

где

$$O'_{ij} \in O^p \quad (2.20)$$

$$\omega(O'_{ij}, p) = \min \omega(O_{ij}, p) \quad (2.21)$$

$$O_{ij} \in \zeta_k^p$$

$$t'_{ij} = \min t_{ij} \quad (2.22)$$

$$O_{ij} \in \zeta_k^p$$

При этом предполагается:

Построение план-графика заканчивается при  $\zeta^P=0$ .

Для решения задачи календарного планирования предлагается следующий алгоритм. Рассматриваются все операции, готовые к выполнению, и анализируются моменты завершения каждой единицей оборудования предшествующих операций.

Учитываются все возможные варианты закрепления операций за оборудованием. При сравнении нескольких вариантов предпочтение отдается наилучшему (согласно оговоренному правилу предпочтения). После закрепления за оборудованием некоторой операции определяется момент ее завершения. Готовой к выполнению оказывается следующая за закрепленной (по технологии) операция. Последовательное повторение описанного процесса приведет к закреплению каждой операции за некоторым станком, т. е. к формированию календарного план-графика. В процессе моделирования (в частности, при формировании массива операций, готовых к выполнению) учитывается достаточно много производственных ограничений: на время начала операции (запрет на закрепление операции до выполнения некоторых условий); внесение изменений в технологические маршруты; наличие нескольких возможных вариантов технологии; учет специфики загрузки отдельных рабочих мест и закрепления операций за оборудованием; запрет на загрузку оборудования в некоторые периоды времени; изменение числа и размеров партий деталей; учет сменности работы различных взаимосвязанных участков и т. д. В алгоритме построения план-графика заложена возможность реализации как последовательного, так и параллельно-последовательного способа выполнения операций технологического маршрута. При построении план-графика правила, согласно которым отдается предпочтение той или иной операции из числа одновременно претендующих на одно и то же оборудование, могут быть различными. При этом и получаемые план-графики естественно различны.

В рассматриваемом алгоритме построение правил предпочтения

обособлено, что позволяет легко изменять их и получать различные план-графики без существенных изменений алгоритма и программы решения задачи. При этом результат действия правил предпочтения может носить как строго детерминированный, так и стохастический характер.

Не перечисляя сейчас эти правила предпочтения, заметим, что когда значения функции предпочтения для сравниваемых операций очень близки, однозначный выбор одной из них не всегда оправдан. Поэтому схемы решения с помощью функций предпочтения дополняют идеями метода Монте-Карло таким образом, что выбор очередной закрепляемой операции из всего множества готовых к выполнению операций осуществляется с частотой, пропорциональной величине функции предпочтения.

Пусть  $1, 2, \dots$  — условные номера готовых к выполнению операций. Ставим в соответствие каждой операции  $O_q$  величину  $p_q > 0$ , такую, что

$$\sum_{q=1}^n p_q = 1, \text{ и некоторый ин-тервал } (x_q, y_q)$$

$$x_q = y_{q-1}; y_q = x_q + p_q; x_1 = 0 \quad (2.23)$$

Пусть имеется источник (датчик) случайных чисел, равномерно распределенных в интервале  $(0, 1)$ . Если  $\xi_0$ , (случайное число) попадает в интервал  $x_{q_0} < \xi_0 < y_{q_0}$ , то предпочтение отдается  $q_0$ . Правило, по которому каждой операции  $q$  ( $q = 1, 2, \dots, n$ ) ставится в соответствие величина  $p_q$ , формируется следующим образом. В правилах детерминированного предпочтения из всех стоящих в очереди операций  $O_{i_1 j_1}, O_{i_2 j_2}, \dots, O_{i_n j_n}$  выбирается операция с наибольшим значением функции  $\omega(i, j, l)$ . Если

функция  $\omega(i, j, l)$  — положительная, то обозначая  $\sum_{q=1}^n \omega(i_q, j_q, l)$  через  $\omega(H)$ , получаем

$$p_q = \frac{\omega(i_q, j_q, l)}{\omega(H)} \quad (2.24)$$

В этом случае из очереди выбираются операции с частотой, пропорциональной  $p_q$ , т. е. операции с большими  $p_q$  будут выбираться

более часто.

Правила такого рода называются рандомизированными правилами предпочтения. Они позволяют при фиксированной функции предпочтения получать целую серию соответствующих ей план-графиков с более эффективными результатами решения. Рандомизация правил предпочтения для вычисления на ЭВМ модифицируется.

Построенный план-график оценивается по следующим показателям. Проверяют величины накопленного пролеживания по каждой партии деталей и сравнивают их с величиной допустимого пролеживания. Если величина накопленного пролеживания превышает допустимую, выдается рекомендация о необходимости перестройки с предварительным увеличением индекса важности (правило предпочтения) рассматриваемой партии деталей. Проверяют выполнение директивных сроков выпуска деталей. В случае превышения этих сроков формируются сообщения об этом и выдаются рекомендации о перестройке план-графика с увеличением индекса важности (правило предпочтения) рассматриваемой партии деталей. Определяют процент загрузки оборудования. Если построенный план-график выходит за пределы планируемого периода и при этом загрузка оборудования невысока, выдаются рекомендации о необходимости перестройки план-графика с использованием методов статистических испытаний.

План-график работы оборудования по каждому цеху выдается по каждой смене в виде документа, в котором указывают номера станка, детали, операции и партии, время запуска партии, длительность операции, размер партии.

## 7 Внутрицеховое оперативно-календарное планирование и оперативное управление производством

### 7.1 Постановка задачи

Как отмечалось, оперативно-календарное планирование разделяется на межцеховое и внутрицеховое. При межцеховом планировании формируются производственные программы, представляющие собой план выпуска по номенклатуре и количеству в принятых планово-учетных единицах. Анализы загрузки ресурсов при межцеховом планировании ведутся укрупненно по трудоемкостям включаемых в план работ.

Существующие системы межцехового планирования различаются используемой планово-учетной единицей и методом построения производственной программы. Все планово-учетные единицы в различных системах планирования имеют различную степень агрегации: от полного состава изделия до отдельной детали. Поэтому любая производственная программа цеха, отражающая объем работ цеха в периоде планирования, должна быть выражена в единых планово-учетных единицах. Достигается это разными способами, но результирующая поддетальная программа цеху должна учитывать объем работ по номенклатуре и количеству, а также запуск и выпуск перечисленной номенклатуры в этом периоде планирования. Обычно для цеха составляется квартальный план по месяцам.

Задача построения внутрицехового оперативно-календарного плана на месяц по декадам состоит в том, чтобы распределить работы, включенные в производственную программу подразделений по декадам месяца, тем самым определяя даты запуска и выпуска отдельных деталей (деталеопераций). При этом должен соблюдаться принцип рационального использования наличных ресурсов.

Планирование технологических процессов по коротким отрезкам времени и регулирование их выполнения обычно рассматривается в едином

комплексе оперативного управления производством. Составление сменно-суточных заданий, часовых графиков, предупреждение, локализация и быстрая ликвидация аварий и перебоев, маневрирование материальными ресурсами — все это функции внутрицехового диспетчирования.

Каким бы стабильными ни были цеховые производственные программы и оперативные задания участкам, в ходе производства возникают неизбежные отклонения, изменения, требующие корректировки ранее составленных планов. Задача внутрицехового диспетчирования — обеспечить ритмичность хода производства при выполнении календарных планов, установленных на основе производственных заданий. Внутрицеховое диспетчирование организует оперативный учет выполнения плана по номенклатуре, контролирует комплектность выпуска отдельных узлов и частей изделия, соблюдение сроков запуска и выпуска отдельных деталей, степень использования ресурсов и организует полную загрузку ресурсов.

Поскольку задачи и методы внутрицехового планирования и управления не зависят от системы межцехового планирования, то в дальнейшем будем рассматривать алгоритмы задач внутрицехового планирования и управления на примере системы объемного планирования .

Рассмотрим схему построения календарного план-графика на месяц по декадам для мелкосерийного многономенклатурного предприятия. Пусть задана производственная программа цеху на квартал по месяцам. Производственная программа состоит из перечня деталей (узлов)  $D_i$  подлежащих запуску и выпуску в определенных количествах  $q_i (i=1,2,\dots,n), q_i \geq 0$

Известны следующие параметры:

- время обработки каждой детали  $i$  по операциям  $j$  технологического процесса  $T_{ij}$
- нормативные (устоявшиеся) размеры партий запуска деталей  $Q_i^H (i \leq n)$

- нормативный цикловой задел деталей 1-го наименования на начало периода планирования в цехе  $s$   $U_i^H(s)$  ;
- фактические остатки в заделах  $U_i^\Phi(s)$  ;
- фактическое наличие незавершенного производства (переходящий цикловой задел)  $U_i^{\Phi.H}(s)$  ;
- наличные фонды времени работы групп оборудования  $l$  в цехе  $s$  на участке  $k$  на период планирования при установленном режиме сменности  $\bar{F}_l^H(s, k), l=1,2,\dots,z$  ;
- наличные фонды времени рабочих в разрезе профессий  $m$  разрядов  $r$   $F_{mr}^H(s, k)$  .

Требуется распределить номенклатуру деталей  $D_i$  , закрепленных за цехом  $s$ , по периодам планирования так, чтобы достигалась максимальная загрузка ресурсов цеха (рабочие, оборудование) объемом работ, включенных в календарный план на период планирования:

Третье условие ограничивает включение в план планируемого периода детали и узлы сверх нормативного задела.

$$\sum_i T_{ij}(l)q_i \leq F_l^H(s, k) \quad (2.26)$$

$$\sum_m T_{ij}(m)q_i \leq F_m^H(s, k) \quad (2.27)$$

$$\sum_i U_i^\Phi(s) + U_i^{\Phi.H}(s) = U_i^H(s) \quad (2.28)$$

## 7.2 Построение календарного план-графика на планируемый период

Корректировка производственной программы. Так как составление объемно-календарных планов и их реализация в производстве разделяются достаточно длительным периодом времени, то в первоначально составленную производственную программу цехам на квартал по месяцам необходимо вносить коррективы. Причины, вызывающие изменения в ранее составленном объемном плане, могут быть разными. Основным источником информации

для корректировки производственных программ являются данные оперативного учета. При корректировке' учитывают выполнение плана предшествующего месяца и состояние цикловых заделов по каждой детали на начало планируемого месяца, так как иногда фактическое выполнение планов и величина цикловых заделов резко отличается от плановых.

Для корректировки программы необходимо иметь следующие данные оперативного учета по каждому цеху и каждой позиции программы на последнее число предшествующего месяца: сколько изготовлено деталей (узлов) и отклонение от плана (в штуках), сколько сдано деталей (узлов) и отклонение от плана (в штуках). «Недодел» ( $-\Delta q_i$ ) воспринимается как невыполнение плана, а «передел» ( $+\Delta q_i$ ) — как перевыполнение его .

Алгоритм корректировки производственных программ учитывает следующие виды отклонений.

1. На отклонения типа «недодел», «передел» план корректируется в соответствии с указанным в списке отклонений на дату количеством деталей, т. е.

$$q'_i = q_i + \Delta q_i \quad (2.29)$$

Иногда возникает необходимость вносить коррективы по номенклатуре на начало планируемого периода, учитывая отклонения от выполнения плана за более длительный период (например, с начала года). Тогда алгебраическая сумма отклонений в выполнении плана по позиции  $i$  добавляется к плану  $q_i$  по этой позиции:

$$q'_i = q_i + \sum_{d=1}^{n-1} \Delta q_i(d) \quad (2.30)$$

где  $n$  — планируемый месяц.

К этому виду отклонений относятся все конструкторские изменения в плане, связанные с количественным составом плана товарной продукции.

2. Отклонения, отражающие качественные конструкторские и технологические изменения, вносятся в список отклонений дважды: как «передел» и как «недодел». Как «передел» данная деталь исключается из

плана (при совпадении количества) и добавляется как «недодел» с новыми нормативами. К моменту корректировки в информационные массивы должны быть внесены все конструкторские и технологические изменения.

3. Производственная программа запуска цеха отличается от программы выпуска на величину разности между нормативным и фактическим размером переходящего циклового задела деталей в цехе на начало периода планирования.

При формировании производственных программ, состоящих из устоявшейся номенклатуры, цикловые заделы выравнивают до установленной нормы. Следует оговорить, что если «отсев» деталей неизбежен, компенсация проводится на уровне выравнивания цикловых заделов:

$$U_i^H(s) - U_i^Ф(s) = \Delta U_i(s) \quad (2.31)$$

$$D_i^3(s) = D_i^B(s) + K_i + \Delta U_i(s) \quad (2.32)$$

где  $D_i^3, D_i^B$  — программа цеха по запуску и выпуску детали  $i$  в периоде планирования;  $K_i$  — дополнительный запуск для компенсации неизбежного «отсева» в цехе.

Если предположить, что период планирования и накопления отклонений может колебаться в диапазоне от месяца до смены, то по этому алгоритму можно проводить текущую корректировку и при составлении сменно-суточных заданий.

Формирование партий запуска деталей.

Учитывая директивные сроки выпуска продукции и потребности в комплектах деталей для максимальной загрузки сборок, при построении объемно-календарного плана определяют состав работ цехов при полной загрузке ресурсов. При этом не учитываются величины нормативных и устоявшихся партий деталей. А заказ бывает не равен и не кратен величине партии. Кроме того, в производственную программу цеха на месяц могут попасть одинаковые детали, входящие в разные изделия. Поэтому на уровне оперативного планирования организуют групповой запуск деталей в обра-

ботку. Групповой запуск единичных оригинальных деталей применяется в мелкосерийном производстве для комплектования в партии одинаковых деталей из разных узлов, запускаемых в производство в одном периоде планирования. Это дает возможность использовать все преимущества серийного производства (создание заделов и т. п.).

Иногда можно выявить (опытно-статистическими методами) список деталей с устоявшимися партиями запуска в производство в данном подразделении к.

Задача формирования партий запуска состоит в уплотнении производственной программы на планируемый месяц, т. е. объединении а партий каждой позиции в одну, равную по количеству месячному запуску, или в две, если есть рекомендуемый (расчетный или устоявшийся) размер партии запуска по этой детали и он не превышает месячное количество по этой позиции.

Алгоритм задачи уплотнения применительно к первой деталепозиции построен следующим образом. Отбираются в список все первые по технологии позиции по деталям 1-го наименования, встречающиеся в производственной программе на планируемый период, и подсчитывается количество деталей изделия J

$$(Q_{ij}) = \sum_j (q_i)_j; (a=1,2,\dots,c) \quad (2.33)$$

c — количество разных изделий, в состав которых входит деталь i/

Дата запуска группы деталей i-го наименования, входящих в изделие J

$$(T_{ij})_a = \min \{t_i\}_J; t_i \neq 0 \quad (2.34)$$

1. Для первого же a, у которого

$$|(Q_{ij})_a - Q_i^H| \leq \varepsilon_i \quad (2.35)$$

по детали i формируется партия запуска  $Q_i^1 = (Q_{ij})_a$  с датой запуска  $(T_{ij})_a$ . Все оставшиеся детали / отобранного списка формируются во вторую партию запуска

$$\begin{matrix} d \neq a \\ \text{iiiii} \\ c \end{matrix} \quad (2.36)$$

с датой запуска, равной  $\min(T_{ij})_{d \neq a}$ . Величина  $\varepsilon$  зависит от устоявшегося размера партии деталей  $Q_i^H$ .

2. Если для всех  $a$  условие не выполняется, тогда

$$Q_i = \sum (Q_{ij})_a \quad (2.37)$$

При

$$Q_i - \varepsilon_i < Q_i^H \quad (2.38)$$

деталь  $i$  формируется на запуск в производство одной партией с датой запуска, равной  $\min(T_{ij})_a$

При

$$Q_i - \varepsilon_i < Q_i^H \quad (2.39)$$

деталь  $i$  формируется на запуск двумя партиями, равными  $\frac{Q_i}{2}$  и с датами запуска, равными  $(T_{ij})_a, c$ .

Установление очередности запуска деталей в обработку является наиболее ответственным этапом построения календарного план-графика. Принципы установления очередности запуска (правила приоритетов) должны быть четко определены и отвечать производственным условиям того подразделения, для которого составляется оперативно-календарный план. В зависимости от поставленных целей при распределении работ по периоду планирования существует много различных правил приоритетов, отражающих почти всегда одну, строго определенную цель, вытекающую из конкретных производственных условий. Основные функции предпочтения (правила приоритетов) и некоторые подходы к оценке их эффективности рассмотрены в гл. III.

Как показал анализ, для предприятий с мелкосерийным многономенклатурным характером производства наиболее действенными оказываются следующие правила приоритетов:

1) правило, по которому запускаются детали, выравнивающие

- комплектность узлов на складе;
- 2) правило кратчайшей операции, позволяющее сократить номенклатуру подразделения;
  - 3) правило, по которому отбираются на запуск детали, имеющие наиболее длительный цикл обработки;
  - 4) правило запуска партии деталей по плановым срокам выпуска изделия;
  - 5) правило, позволяющее поддерживать нормативный уровень цикловых заделов готовых деталей;
  - 6) динамическое правило приоритета, в котором для каждой "детали определяется коэффициент срочности

Отличается это правило тем, что расчет коэффициентов срочности, помимо расчетов на начало периода планирования, можно проводить непрерывно, в течение всего периода планирования в зависимости от создавшейся производственной ситуации. Обычно этим правилом приоритета пользуются при сменно-суточном планировании. Удобство пользования этим правилом приоритета заключается еще и в том, что при определении коэффициентов срочности можно использовать почти все правила приоритетов и даже совокупность некоторых правил .

Рассмотрим один из способов расчета коэффициентов срочности запуска. Будем исходить из того, что количество деталей, необходимых под сборку конкретного изделия, равномерно расходуется в течение всего периода сборки. Зная месячную потребность сборки в этих деталях, можно рассчитать ежедневное расходование этих деталей. Оперативный учет выполненных работ дает возможность получить достоверную информацию о выполнении плана по каждой детали ежедневно и нарастающим итогом с начала месяца. Сравнивая эти две величины, находят коэффициент срочности, выраженный в днях обеспечения непрерывной сборки данными деталями:

$$k_i^{cp} = \frac{n_i}{q_i} \quad (2.40)$$

где  $q_i$  — ежедневное расходование деталей на сборке;

$n_i$  — количество готовых деталей, выпущенных цехом с начала месяца.

Если  $k_i^{cp}$  превышает количество рабочих дней в планируемом месяце больше, чем на величину цикла изготовления устоявшейся (нормативной) партии этих деталей,

$$k_i^{cp} > \rho + Q^H C_i \quad (2.41)$$

где  $\rho$  — количество рабочих дней в планируемом месяце;

$C_i$  — нормативный цикл изготовления одной детали  $i$  в днях, то такую деталь можно исключить из запуска в этом периоде планирования и перенести в следующий.

Распределение работ в периоде планирования. Главная задача построения оперативно-календарного плана заключается в обоснованном установлении сроков выполнения отдельных работ при достижении определенных целей. При распределении работ могут быть различными цели и способы распределения. Тщательный выбор целей и способов их достижения при составлении оперативно-календарных планов очень важен, так как это отражается на эффективности распределения работ. Если при достижении определенной цели способ распределения неудачен, могут возникнуть искусственно создаваемые простои оборудования, а это в свою очередь вызывает скопление деталей в незавершенном производстве. Поэтому главное требование к срокам выполнения — обеспечение равномерной загрузки цеха: чтобы выполнение одних работ не вызывало нарушения сроков по другим. Выполнение работ в установленные сроки создает необходимое комплектное незавершенное производство.

1. Распределение работ по принципу равномерной загрузки ресурсов состоит в том, что все работы месячной программы, выраженные в каком-либо

ресурсе, равномерно распределяются по декадам планируемого месяца. Для этого определяют декадную потребность в этом ресурсе, например потребный фонд времени работы оборудования по технологическим группам

$$F_i^P(k)_a = \frac{F_i^H(k)}{3} \quad (a=1,2,3,\dots) \quad (2.42)$$

и выбирают конкретные работы, претендующие на этот ресурс. Ограничением при выборе работ служит декадная потребность рассматриваемого ресурса:

$$\sum_i Q_i(k) T_{ij}(l) \leq F_i^H(k)_a \quad (2.43)$$

2. Распределение работ по принципу максимальной загрузки ресурсов состоит в том, что под наличный декадный фонд времени какого-либо ресурса выбираются работы из месячной программы, претендующие на этот ресурс. В качестве ограничения выступает наличный фонд времени этого ресурса, рассчитанный на декаду. Например, если построение оперативно-календарного плана преследует цель максимальной загрузки рабочих в разрезе профессий и разрядов, то

$$\sum_{m,r} Q_i^H T_{ij}(m,r) \leq F_{m,r}^H(k)_a \quad (2.44)$$

При

$$F_{m,r}^H(k) > 0 \quad (2.45)$$

где  $F_{m,r}^H(k)$  — наличный фонд времени на участке  $k$  рабочих профессий  $m$  разряда  $r$  на  $a$ -ю декаду.

Оба метода построения оперативно-календарного плана различаются только принципами распределения. Исходная информация и отдельные этапы работ в этих методах совпадают.

Какие бы цели не преследовались при составлении месячных календарных планов по декадам, работы распределяются на основании дат запуска отдельных деталей и их операций. Существующие способы определения дат

запуска разнообразны в зависимости от детализации плана и от целей, поставленных при составлении плана. Рассмотрим два случая распределения месячной программы по декадам, когда определяются моменты запуска деталей и даты запуска всех операций детали. Будем исходить из того, что перечень деталей, включенных в производственную программу, строго упорядочен по какому-либо правилу приоритетов. Все детали разбиваются на деталиеоперации согласно технологии изготовления, чтобы не нарушилась упорядоченность. Отбор на запуск в производство отдельных деталиеоперации должен проводиться в строгом соответствии с установленной очередностью запуска. Тогда расчетными моментами начала запуска отдельных деталиеоперации будут начала отдельных декад.

Работы распределяются по декадам планируемого месяца с учетом ограничений

1. Определение момента запуска первой операции рассматриваемой детали начинается с определения декады, в которой возможен запуск этой детали. Если предположить, что длительность любой партии деталей укладывается в декадный период, то все последующие деталиеоперации распределяются по соответствующим ресурсам той же декады, в которой запущена первая операция. И только в случае, когда

$$\sum Q_i T_{ij}(m, r)_a \cdot 0.95 > F_{m, r}^H(k)_a$$

(2.46)

последующие деталиеоперации распределяются по ресурсам  $a+1$  декады. В результате получается перечень работ на декаду, по объему строго соответствующий наличным ресурсам декад. Возможно превышение декадных ресурсов на 5%.

Установленная очередность запуска сохраняется, так как декадные списки работ по ресурсам формируются в строгой очередности запуска деталей и технологической последовательности ее операций. Возможную перегрузку

отдельных видов ресурсов третьей декады свыше 5% следует рассматривать как остаточную трудоемкость, на величину которой корректируются наличные фонды соответствующих ресурсов первой декады последующего месяца. При таком методе распределения работ по декадам планируемого месяца необходимую ритмичность производственного процесса можно достигнуть только при сменно-суточном планировании.

2. Расчет дат запуска для всех деталей операции проводится в предположении того, что партии деталей должны быть готовы к определенным срокам. Например, если производственная программа состоит из перечня деталей, которые необходимо сделать в течение планируемого периода, сроком выпуска всех деталей является конец этого периода.

Даты запуска с учетом коэффициентов срочности определяются тем, что плановый срок запуска партий деталей в обработку зависит от фактического числа готовых деталей. К моменту расходования этих деталей на сборке через  $k_i^{cp}$  дней должна наступить очередная партия этих деталей. При определении дат запуска таким методом требуется информация о сдаче деталей по этой позиции нарастающим итогом с начала года. Зная нормативные трудоемкости детали операции и размеры партий запуска, легко определить даты запуска отдельных операций. При определении дат запуска отдельных операций нужно учитывать, кроме нормативной трудоемкости, время пребывания по кооперации в других цехах (участках) и время транспортировки (межоперационное, межучастковое и межцеховое). Эти константы для различных подразделений различны и зависят от организации производства. Если дата запуска первой операции при последовательном планировании этапов обработки попадает на предыдущий плановый период, то моментом запуска этой детали считают начало периода планирования, и эта деталь некоторое время будет находиться в дефиците. Подобные неувязки возникают при погрешностях объемного планирования, в связи с технологическими и конструкторскими изменениями и «недоделом» по этой детали в предыдущем периоде планирования. Дефицит такого рода

возможно предотвратить за счет незавершенного производства на стадии сменно-суточного планирования.

При расчете дат запуска с учетом коэффициентов срочности достигается цель, преследующая первоочередной запуск деталей с длительным циклом обработки. Так же рассчитывают моменты запуска деталей, сроки выпуска которых определены конкретными сроками этапов сборки изделий, сроками подачи их на комплектацию и т. п. Форма массива календарного плана-графика приведена в приложении.