

МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРЕГАТНО-СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ  
САМОЛЕТОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В ОПЕРАТИВНОМ ПЛАНИРОВАНИИ

ОАО «АВИАСТАР»

Разнообразие форм и методов оптимизации, наличие различных видов производств при создании авиационной техники заставили нас свести задачу планирования производственных процессов в оперативном планировании к частному случаю изготовления агрегатов летательного аппарата, собираемых в стационарных (неподвижных) сборочных приспособлениях.

Данная работа проводилась в ЗАО «АВИАСТАР-СП» в условиях действующего производства.

Постановка задачи содержала ряд пунктов:

1) из некоторого множества последовательностей запуска агрегатов в производство с минимальным циклом изготовления выбрать последовательность, при которой время простоев стапеля минимально  
(функция-критерий - минимальный цикл изготовления агрегата, локальный критерий - минимальное время простоя стапеля);

2) из некоторого множества последовательностей запуска агрегатов в производство с минимальным временем простоев оборудования выбрать последовательность, при которой время цикла изготовления агрегатов минимально (функция-критерий - минимальное время простоев стапелей, локальный критерий - минимальный цикл изготовления секций);

3) произвести экономический анализ выбранных последовательностей запуска агрегатов в производство по себестоимости изготовления продукции и выбрать лучший вариант;

4) составить по этому варианту недельные оптимизированные планы-графики работы линии изготовления агрегатов (на месяц, квартал, год, на 1 самолет, в зависимости от условий работы линий);

5) разработать тактические действия по оперативному регулированию хода производственного процесса при отклонениях от выбранного плана-графика.

Для решения поставленной задачи следует ввести ряд начальных условий, которые, с одной стороны, упростят математическое решение задачи, с другой - сделают ее близкой к реальным производственным условиям. К таким условиям относим следующие:

1) на одном стапеле одновременно не может изготавливаться более одного агрегата;

2) операции, необходимые для производства агрегатов, выполняются в линейной последовательности, и никакой из агрегатов дважды на одном стапеле не обрабатывается;

3) начальная операция не прерывается до ее завершения в конечный интервал времени;

4) каждый агрегат должен быть изготовлен на одном и более рабочих местах;

5) переход агрегатов на следующее рабочее осуществляется после полного завершения операций и при наличии свободного следующего рабочего места;

6) время, необходимое для транспортировки агрегатов между рабочими местами, должно быть включено во время изготовления агрегата;

7) все агрегаты, изготавливаемые на поточной линии, предварительно известны;

8) на линии во время работы не существует непредусмотренных простоев;

9) последовательность изготовления агрегатов на каждом рабочем месте одна и та же.

После отыскания оптимальной очередности запуска агрегатов в производство составляется график изготовления агрегатов и расписание работы стапелей поточных линий, которые характеризуются следующими показателями:

1) длительностью производственного цикла изготовления каждого агрегата;

2) временем простоев стапеля;

- 3) длительностью совокупного производственного цикла изготовления всех агрегатов;
- 4) себестоимостью изготовления агрегатов.

Сформулированную задачу математически можно записать следующим образом.

Дана матрица циклов изготовления агрегатов по всем позициям поточной линии:

$$T = (T_{ij}); i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

где  $T_{ij}$  - продолжительность (цикл) изготовления агрегата  $i$ -го наименования на  $j$ -м рабочем месте, все  $T_{ij} \geq 0$  (табл.1).

Агрегаты ( $i = \overline{1, n}$ ) запускаются на поточную линию в любой последовательности. При разных последовательностях запуска получаются разные длительности циклов изготовления агрегатов  $T_{ца}$ . Пусть агрегат  $i$ -го наименования ( $i = \overline{1, n}$ ) запускается в какой-то выбранной  $k$ -ой последовательности ( $k = \overline{1, n}$ ). При изготовлении любой агрегат переходит с рабочего места на рабочее место (позицию) при условии свободного следующего рабочего места (позиции) и завершения изготовления на данной позиции. Момент перехода (освобождения)  $i_k$  - го агрегата с  $j$ -ой позиции на  $(j+1)$ -ю позицию обозначим через  $T_{ik,j}$ .

Таблица 1

Матрица циклов изготовления, ч

Наименование агрегатов	Номера позиций						
	1	2	...	j	...	m-1	m
1	$T_{11}$	$T_{12}$	...	$T_{1j}$	...	$T_{1, m-1}$	$T_{1m}$
2	$T_{21}$	$T_{22}$	...	$T_{2j}$	...	$T_{2, m-1}$	$T_{2m}$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	...	.	...	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
i	$T_{i1}$	$T_{i2}$	...	$T_{ij}$	...	$T_{i, m-1}$	$T_{im}$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	...	.	...	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
n-1	$T_{n-1, 1}$	$T_{n-1, 2}$	...	$T_{n-1, j}$	...	$T_{n-1, m-1}$	$T_{n-1, m}$
n	$T_{n1}$	$T_{n2}$	...	$T_{nj}$	...	$T_{n, m-1}$	$T_{nm}$

Тогда для  $i$ -го агрегата, который поступает на первую позицию, момент времени начала ее изготовления ( $T_{i_{k,1}}$ ) совпадает с моментом времени освобождения первой позиции предыдущим агрегатом

$i_{k-1}$ -й ( $T_{i_{k-1,1}}$ ). Момент времени перехода  $i_k$ -го агрегата на следующую (вторую позицию) определяется либо временем завершения его изготовления ( $T_{i_{k-1,1}} + T_{i_{k,1}}$ ), либо моментом времени освобождения предыдущего  $i_{k-1}$ -го агрегата второй позиции ( $T_{i_{k-1,2}}$ ).

$$\begin{aligned} T_{i_{k-1,2}} &= \max\{T_{i_{k-1,1}} + T_{i_{k,1}}; T_{i_{k-1,2}}\} = \\ &= T_{i_{k-1,1}} + T_{i_{k,1}} + (T_{i_{k-1,2}} - T_{i_{k-1,1}} - T_{i_{k,1}}) \end{aligned} \quad (2)$$

Для  $k=1$  время перехода с  $j$ -й позиции на  $(j+1)$ -ю позицию:

$$T_{i_1,j} = \sum_{s=1}^j T_{i_1,s} \quad (3)$$

При переходе  $i_k$ -м агрегатом ( $k=2, n$ ) с  $j$ -й позиции на  $(j+1)$ -ю позицию момент времени перехода  $T_{i_k, j}$ , определяется либо временем завершения его изготовления на  $j$ -й позиции ( $T_{i_k, j-1} + T_{i_k, j}$ ), либо моментом времени освобождения предыдущим агрегатом  $(j+1)$ -й позиции ( $T_{i_{k+1}, j+1}$ ).

$$T_{i_k, j} = \max\{T_{i_k, j-1} + T_{i_k, j}; T_{i_{k-1}, j+1}\} = T_{i_k, j-1} + T_{i_k, j} + (T_{i_{k-1}, j+1} - T_{i_k, j-1} - T_{i_k, j}) \quad (4)$$

при  $j = 2, m-1; k \geq 2$ .

Начало изготовления  $i_k$ -го агрегата на последней позиции совпадает с моментом перехода ее с  $(m-1)$ -й позиции на  $m$ -ю позицию ( $T_{i_k, m-1}$ ). Момент времени освобождения  $m$ -й позиции  $i_k$ -м агрегатом ( $T_{i_k, m}$ ) записывается как

$$T_{i_k, m} = T_{i_k, m-1} + T_{i_k, m} \quad \text{при } j=m; k \geq 2. \quad (5)$$

Тогда длительность совокупного производственного цикла изготовления всех ( $n$ ) агрегатов равна моменту времени освобождения последней позиции ( $m$ -й) последним агрегатом ( $i_n$ ):

$$T_{ц.а} = T_{i_n, m}. \quad (6)$$

Длительность совокупного производственного цикла изготовления всех агрегатов, представленная формулой (6), может быть представлена иначе:

$$T_{ц.а} = T_{ц.и} + \sum_{k=2}^n T_{i_k, m} + \sum_{k=1}^n T_{пр i_k, m}, \quad (7)$$

где  $T_{ц.и}$  - длительность цикла изготовления агрегатов, которая запускается в данной последовательности первой, ч;

$\sum_{k=2}^n T_{i_k, m}$  - суммарная длительность изготовления всех оставшихся агрегатов  $(n-1)$  на

последней,  $m$ -й позиции, ч,

$\sum_{k=1}^n T_{пр i_k, m}$  - суммарное время простоев оборудования на последней,  $m$ -й позиции при

изготовлении всех агрегатов, ч.

Выражение для суммарного определения суммарного времени простоев стapeлей и оборудования по всем  $m$  позициям при изготовлении всех  $n$  агрегатов будут иметь вид:

$$T_{пр} = \sum_{j=1}^m T_{i_n, j} - ST - \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{s=1}^j T_{и, s}, \quad (8)$$

где  $ST$  - время фактической работы стapeлей и оборудования на всех позициях при изготовлении  $n$  агрегатов (сумма времени циклов по исходной матрице табл.1).

Анализ формулы (8) позволяет сделать вывод, что при одинаковом цикле изготовления партии агрегатов время простоев стapeлей и оборудования будет меньше, если сначала запускать в производство агрегаты, у которых максимальное время изготовления на первой позиции, а последними запускать агрегаты, у которых максимальное время изготовления на последних позициях.

Исходя из вышесказанного, можно рассчитать минимально возможное время (или нижнюю границу) окончания изготовления всех агрегатов :

- на первой позиции ( $j=1$ ):

$$\Gamma_{i_k,1} = \max \left\{ \begin{array}{l} T_{i_k,1} + \sum_{s=k+1}^n T_{i_s,1}; \\ T_{i_k,2} + \sum_{s=k+1}^n T_{i_s,2} - \max_{sf \ k} T_{i_s,2}; \end{array} \right. \quad (9)$$

- на  $j$ -й позиции ( $2 \leq j \leq m$ ):

$$\Gamma_{i_k,j} = \max \left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{i_k,j-1} + \min_{sf \ k} T_{i_s,j}; \\ T_{i_k,j} + \sum_{s=k+1}^n T_{i_s,j}; \\ T_{i_k,j+1} + \sum_{s=k+1}^n T_{i_s,j+1} - \max_{sf \ k} T_{i_s,j+1}; \end{array} \right. \quad (10)$$

- на последней позиции ( $j=m$ ):

$$\Gamma_{i_k,m} = \max \left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{i_k,m-1} + \min_{sf \ k} T_{i_s,m}; \\ T_{i_k,m} + \sum_{s=k+1}^n T_{i_s,m}; \end{array} \right.$$

где  $\Gamma_{i_k,m-1}$  - нижняя граница окончания работ на  $(m-1)$ -й позиции, которое рассчитывается по рекуррентным формулам ( ) и ( ).

Очевидно, что

$$T_{i_n,j} \geq \Gamma_{i_k,j}; \quad (11)$$

Исходя из условий задачи, должны быть оптимизированы выражения:

$$T_{ц.а} = T_{i_n,m} \geq \Gamma_{i_k,m}; \quad (12)$$

$$T_{np} \geq \sum_{j=1}^m \Gamma_{i_k,j} - ST - \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{s=1}^j T_{i_l,s}. \quad (13)$$

Таким образом, необходимо:

1) найти такую последовательность запуска изделий в производство, чтобы выполнялось условие (14):

$$T_{ц.а} \rightarrow \min \text{ с } T_{np} \rightarrow \min; \quad (14)$$

2) найти такую последовательность запуска агрегатов в производство, чтобы выполнялось условие (15):

$$T_{np} \rightarrow \min \text{ с } T_{ц.а} \rightarrow \min; \quad (15)$$

3) выбрать из этих последовательностей запуска агрегатов в производство вариант, который в данной ситуации наиболее оправдан с экономической точки зрения.

В такой формулировке решается лишь часть поставленной задачи. Оперативное регулирование является логическим продолжением решаемой задачи и будет основываться на предложенной последовательности запуска агрегатов в производство по получаемым планам-графикам.

Так как длительность совокупного производственного цикла изготовления всех агрегатов велика, то при решении задачи приближенными методами отклонения от оптимальных циклов и времени простоев станочных и оборудования составят значительные величины. Поэтому для поставленной задачи необходимо найти точное решение. Метод ветвей и границ в настоящее время является наиболее эффективным способом получения точного решения для задач календарного планирования и, что особенно важно, хорошо приспособлен для машинной реализации. В настоящей работе точное решение поставленной задачи находится с помощью метода ветвей и границ.

### *Литература*

1. Литтл Дж., Мурти И., Суини Д., Кэрл К. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере. Экономика и математические методы. 1985. - Вып.1. - С. 94-107.