

Рубцовский индустриальный институт,  
филиал Алтайского государственного технического университета  
ул. Тракторная, 2/6, Рубцовск, 658207, Россия

E-mail: marinaV@ab.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ МНОГОСТАНОЧНИКОВ НА ПРЯМОТОЧНЫХ ЛИНИЯХ

В работе рассматривается комплексный подход к экономическому обоснованию организации производственного процесса на прерывно-поточных линиях с учетом работы многостаночников, основанный на приближении планирования производства на таких линиях к принципам организации работ на поточных линиях.

*Ключевые слова:* производственный процесс, прерывно-поточные линии, процесс планирования.

Массовый тип производства – это непрерывное изготовление ограниченной номенклатуры изделий, тщательная подготовка технологического процесса, его автоматизация. Поточное производство связано с высокой степенью непрерывности и прямоточности (т. е. по ходу технологического процесса). Оно является передовой, наиболее эффективной формой организации производственного процесса [1], ведет к снижению себестоимости продукции в 3–4 раза, чем затраты на производство такого же изделия в условиях мелкосерийных предприятий. Отсюда понятно стремление заводов серийного, крупносерийного производства в организации предметно-замкнутых участков на принципах организации работы прямоточных линий.

Поточное производство организуется на основе непрерывных поточных линий. На таких линиях длительность операций примерно одинакова (отклонение  $\pm 10\text{--}12\%$ ) и определяется ритмом линии  $r = T / N$ ,  $T$  – плановый период (например длительность смены);  $N$  – сменное задание выпуска продукции. Однако в условиях массового и крупносерийного производства активно используются и прерывные поточные линии (прямоточные линии), на которых длительность операций не равна  $r$ .

Таким образом, совершенствование производственной структуры идет по пути укрупнения участков и цехов, построения их по предметно-замкнутому принципу [1–2]. Предметная структура, при которой основные цеха и их участки строятся по признаку изготовления каждым из них каких-то деталей, узлов, изделий, важна для процессного подхода, для организации экономического управления процессами, служит основой организации массового производства.

Так как на заводах серийного, крупносерийного производства нет должных объемов производства, организация поточных линий не имеет смысла. Однако организация прерывных поточных линий вполне допустима. На таких линиях длительности операций отличаются друг от друга, поэтому возникают проблемы организационного и экономического характера: задачи согласования работ на операциях, организация работы многостаночников, уменьшения оборотных запасов.

Рассмотрим проблемы, которые возникают на прямоточной линии и подходы к их решению. Поставим задачу на графиках производства партии деталей. Обозначим через  $a_i$  длительность  $i$ -й операции в часах, минутах,  $i = 1, 2, \dots, m$ . Значение  $A_i = N \cdot a_i$  будет соответствовать длительности выполнения сменного задания на  $i$ -й операции. Пусть  $x_i$  означает время начала выполнения  $i$ -й операции относительно начала 8-часовой смены.

*Первая группа смежных операций.* В этой группе более производительная операция предшествует менее производительной. При этом если  $x_i > x_{i+1}$ , то между операциями возникает оборотный запас деталей – незавершенное производство  $z_i$  (в штуках) (рис. 1):

$$z_i = (x_i - x_{i+1}) / a_{i+1}. \quad (1)$$

Если  $x_i \leq x_{i+1}$ , то к концу смены запаса между операциями не будет.

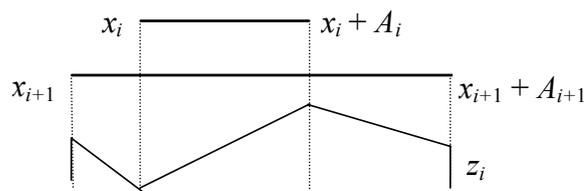


Рис. 1. Схема образования оборотных запасов для первой группы операций

Во второй группе операций менее производительная операция предшествует более производительной. При этом если  $x_i + A_i > x_{i+1} + A_{i+1}$ , то между операциями возникает оборотный запас деталей  $z_i$ :

$$z_i = (x_i + A_i - x_{i+1} - A_{i+1}) / a_i. \tag{2}$$

Если  $x_i + A_i \leq x_{i+1} + A_{i+1}$ , то к концу смены оборотного запаса между операциями не будет.

Как показано в работах [1–2], величина незавершенного производства зависит от графиков двух указанных типов, от времени начала и окончания выполнения сменного задания по смежным операциям. При этом если построенный план-график обеспечивает минимум запасов на конец смены, то достигается и минимум средних запасов [2].

При решении первой задачи уменьшения переходящих запасов, что дает высвобождение оборотных средств, возникает вторая проблема – занятость рабочих. На прямоточной линии длительность части операций может быть существенно меньше продолжительности смены. Так как рабочий получает заработную плату за фактически отработанное время, то следует составить план-график работы так, чтобы загрузка (и заработок) рабочих была высокой. В противном случае возникает проблема обеспечения прямоточной линии рабочими. При этом необходимо учитывать и изменение запасов.

Рассмотрим построение пооперационного плана-графика для прямоточной линии и возможности решения вышеуказанных проблем на следующем примере (использованы данные о прерывно-поточной линии инструментального производства) [3]. Продолжительность смены  $T = 480$  мин, сменное задание  $N = 800$  шт. Другие данные:  $a_i, A_i, c_i$  – себестоимость детали после выполнения операции  $i$ ;  $b_{ig}$  – расчетный показатель для операции  $i$ , входящей в группу  $g$  ( $g = 1, 2$ ) смежных операций (табл. 1).

Таблица 1

Данные по операциям на прямоточной линии

№ операции	$a_i$ , мин	Себестоимость изделия $c_i$ , руб.	$A_i$ , мин	$b_{ig}$ , руб./мин
1	0,35	70,3	280	200,86
2	0,203	72,2	163	245,58
3	0,294	75,0	235	255,10
4	0,233	77,2	187	171,55
5	0,45	81,4	360	180,89
6	0,32	84,4	256	143,66
7	0,5875	89,9	470	

Чтобы понять суть проблем, которые возникают при организации работ на прямоточной линии, представим график (рис. 2) ее работы, исходя из предположения, что все операции начинаются с начала смены и выполняются без перерывов, а на линии работают 7 человек. Между операциями в этом случае на начало и конец смены возникают оборотные запасы. Величина их обозначена через  $z_i$  (в штуках деталей). Общий объем деталей в запасах – 731 шт. стоимостью 54,735 тыс. руб. Это почти весь объем сменного задания.

№ операции	График выполнения операций, время окончания операций	$z_i$ , шт.
1	————— 280	335
2	————— 163	0
3	————— 235	164
4	————— 187	0
5	————— 360	232
6	————— 256	0
7	————— 470	

Рис. 2. Первый вариант графика работы прямочной линии

Из рис. 2 видно, что если изменить время начала операций, то можно существенно уменьшить уровень оборотного запаса. Такую задачу можно поставить как оптимизационную [2]. Однако на предприятиях оптимизация принятия решений на основе математического программирования еще не получила широкого распространения. Поэтому в работе [2] рассматривается алгоритм решения этой задачи исходя из ее особенностей. Операции следуют одна за другой. При этом цена детали возрастает от операции к операции. Сдвиг одной операции относительно другой (см. формулы (1) и (2)) на единицу времени (в данном случае на одну минуту) приведет к увеличению оборотных запасов. Это увеличение будет разным. Важной особенностью в данной задаче является то, что только сдвиги смежных операций относительно друг друга изменяют величину оборотных запасов. Именно это обстоятельство позволяет построить эффективную методику уменьшения уровня оборотных запасов на прямочной линии.

Для первой группы операций сдвиг их (относительно друг друга) на единицу времени в соответствии с формулой (1) приведет к увеличению оборотного запаса на следующую величину  $b_{11} = c_i / a_{i+1}$  (руб./мин). Для второй группы операций сдвиг их на единицу времени в соответствии с формулой (2) приведет к росту оборотного запаса на величину  $b_{12} = c_i / a_i$  (руб./мин) (см. табл. 1).

Как видим, наибольшую оценку имеет параметр для третьей и четвертой операций. Они относятся ко второй группе операций. Для уменьшения оборотных запасов на конец смены в целом для линии оптимальным будет график, в котором третья и четвертая операции заканчиваются почти одновременно и между ними на конец смены не будет оборотных запасов. Наибольшими сдвиги будут в тех парах операций, для которых параметры  $b_{ig}$  наименьшие. Указанные особенности работы прямочной линии позволили сформировать методику построения плана-графика выполнения операций, приводящей к минимизации уровня оборотных запасов [3].

Использование такой методики для решения поставленной задачи (рис. 2) обеспечивает получение оптимального решения (рис. 3). Решение задачи линейного программирования дает тот же результат. Уровень оборотных запасов на конец смены снижается до 464 шт. деталей стоимостью 38,255 тыс. руб. По стоимости снижение оборотных активов составляет 30 %.

Однако в обоих графиках работы линии (см. рис. 2 и 3) использование эффективного времени работы бригады составляет 58 %. Это значит, что три человека из семи не загружены почти полностью. Минимальная оплата труда (с начислениями) одного работника за простой в смену составляет 620 руб. Если не оплачивать простой, то на такой прямочной линии работать никто не будет. Выходом является организация работы многостаночников. Из рис. 3 видно, что можно поручить одному рабочему выполнять 2 и 6-ю операции, 1 и 4-ю операции. В этом случае на участке могут работать только пять человек. В работе [3] использование приближенного алгоритма организации работы многостаночников позволило сократить чис-

ло рабочих на участке до 4 человек (рис. 4). В этом случае загруженность рабочих вырастет до 101,6 % (за счет сверхурочных). При этом общее количество оборотных запасов увеличится до 1 048 деталей стоимостью 81,656 тыс. руб. Прирост оборотных активов составит 43,6 тыс. руб. Финансовые затраты на пополнение оборотных активов за счет кредита при 14 % годовых равны 6,08 тыс. руб. Экономия же заработной платы с начислениями, которую надо бы выплатить трем рабочим за простой, только за смену составит 1,86 тыс. руб., а за 240 рабочих дней – 446,4 тыс. руб. Существенный эффект налицо.

Следовательно, здесь можно сделать вывод о том, что затраты на увеличение запасов на прямоточной линии не идут ни в какое сравнение с экономией заработной платы. Главное здесь, чтобы сменное задание было выполнено, а занятость рабочих прямоточной линии приближалась к 100 %, так как за этим стоит уровень оплаты их труда. При этом резко возрастает и производительность труда.

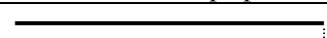
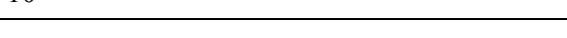
№ операции	Время начала и окончания операций в графике смены	$z_i$ , шт.
1	 280	0
2	117 	0
3	 352	0
4	165 	100
5	120 	0
6	224 	364
7	10 	0

Рис. 3. График работы прямоточной линии при минимальном уровне оборотных запасов на конец смены

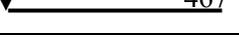
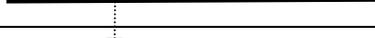
№ операции	График выполнения операций	Сверхурочные работы	$z_i$ , шт.
1	 280		334
2	 163		
3	 235		
4	 467		260
5	 43	— 43	71
6	 11	— 11	383
7			

Рис. 4. График работы линии для четверых человек

Таким образом, решение представленной здесь проблемы предлагается осуществить в два этапа. Сначала строится график работы прямоточной линии с минимизацией уровня оборотных запасов на конец смены, а затем этот график корректируется организацией работы многостаночников для более полной загрузки рабочих и оплаты их труда.

Однако если на первом этапе удалось формализовать процесс принятия решений, приводящий к оптимизации уровня запасов на прямоточной линии на конец смены, то при решении задачи организации работы многостаночников используется приближенный алгоритм. Трудность решения второй задачи заключается в том, что все значения  $A_i$  различны, возникает множество возможных решений и не все они сразу просматриваются. Только благодаря небольшой размерности представленной на рис. 4 задачи достаточно просто получено ее ре-

шение. Поэтому далее рассмотрим один из подходов к совершенствованию алгоритма решения поставленной задачи.

Воспользуемся схемой организации технологического процесса на поточных линиях, где длительности всех операций примерно выравнены технологически и равны ритму  $r$ . Как уже отмечалось, на прямоточных линиях делать это нецелесообразно. Поэтому для прямоточной линии введем понятие локального ритма, такта  $d$  длительности обработки определенного количества деталей на различных операциях. При этом ставится условие примерной кратности  $d$  всем значениям  $A_i$  и  $T$ . В идеальном случае  $d$  – это наименьшее общее кратное всем указанным параметрам. Однако на поточных линиях различие длительностей операций все-таки может достигать 10 %, поэтому и для прямоточных линий возьмем данный параметр за основу.

Определение  $d$  представим на уже рассмотренном примере. Исходные параметры  $A_i$  и  $T$  заданы в минутах: 280, 163, 235, 187, 360, 256, 470 и 480.

Первый шаг расчетов. Пусть  $d_1 = 163 = \min \{A_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . Возьмем первые два числа:  $A_1 = 280$  и  $A_2 = 163$ . Отклонение значения 280 от  $d_1$  равно 117, а от  $2d_1 = 326$  – составляет 46. Среднее минимальное отклонение равно 23 ( $46 / 2$ ). Такое отклонение не должно превышать 10 % от величины  $d_1$ , т. е. от значения 16. Как видим, данное условие не выполняется, поэтому  $d_1$  не может быть взято за локальное значение ритма.

Второй шаг расчетов. Полагаем  $d_2 = d_1 / 2 = 81$ , округляя до ближайшего целого числа. Сравниваем его с параметром  $A_1 = 280$ . Наиболее близкое к 280 является число 243, кратное 81 ( $243 = 3 \times 81$ ). Среднее отклонение  $(280 - 243) / 3 = 12,3$  больше, чем 10 % от 81. Поэтому значение 81 не может быть взято за локальный ритм линии. Рассматривать другие параметры  $A_i$  не имеет смысла.

Третий шаг расчетов. Полагаем  $d_3 = d_1 / 3 = 54$ , округляя до ближайшего целого числа. Сравниваем его с параметром  $A_1 = 280$ . Наиболее близкое к 280 является число 270, кратное 54. Среднее отклонение  $(280 - 270) / 5 = 2$  меньше, чем 10 % от 54. Здесь  $5 = 270 / 54$ . Следовательно, значение 54 может быть локальным значением ритма, но только для первых двух операций. Рассматриваем другие значения  $A_i$ . Для третьей операции продолжительность  $A_3 = 235$ . Наиболее близкое к этому значению число 216, кратное 54. Среднее отклонение  $(235 - 216) / 4 = 4,75$  меньше, чем 10 % от 54. Для четвертой операции продолжительность  $A_4 = 187$ . Наиболее близкое к этому значению число 162, кратное 54. Среднее отклонение  $(187 - 162) / 3 = 8,3$  больше, чем 10 % от 54. Следовательно, значение 54 не может быть взято за локальное значение ритма.

Четвертый шаг расчетов. Полагаем  $d_4 = d_1 / 4 = 41$ , округляя до ближайшего целого числа. Расчеты выполняются аналогично предыдущим шагам. Значение 41 выполняет условие возможных предельных средних отклонений трудоемкости выполнения части операций от локального ритма, такта прямоточной линии. Так, для первой операции такое отклонение составляет  $-2,4$  %;  $-0,6$  % для 2-й;  $-4,5$  % для 3-й;  $-0,9$  % для 4-й;  $-2,4$  % для 5-й; для 6-й –  $4,1$  %; для 7-й –  $4,2$  %. Как видим, отклонения не превышают допустимый 10 % рубеж. Продолжительность смены составляет 480 минут. Наиболее близкое число, кратное значению 41, составляет 492 минуты. Это 12 локальных ритмов, тактов  $d = d_4$ , по длительности равных 41 минуте. При этом отклонение составляет 2,5 % от продолжительности смены.

Длительность всех работ на прямоточной линии составляет 1 951 минуту. Если предположить, что будут работать четверо рабочих, то в среднем они должны отработать по 488 минут, что несколько больше смены. Поэтому продолжительность смены зафиксируем в 492 минуты, состоящей из 12 тактов по 41 минуте каждый, т. е. с учетом сверхурочных работ. Когда рабочему за время какого-то такта придется выполнить объем работ несколько больший, чем длительность ритма, то здесь следует иметь в виду, что технологические нормы  $a_i$  задаются с учетом определенного запаса. Кроме этого, всегда существует перевыполнение норм. При формировании параметра  $d$  учтено предельно возможное отклонение от норм. Разбиение смены на такты, ритмы позволяет любому рабочему, выполнив работу в текущем такте, уйти на любую другую операцию, если это целесообразно. Подобная ситуация упрощает построение плана-графика выполнения работ с учетом работы многостаночников, когда на прямоточной линии необходимо выполнить не менее 10–15 операций.

Далее представим методику построения плана-графика (рис. 5) выполнения работ по 7 операциям четырьмя рабочими, объем работ 48 чел. тактов.

№ оп.	Локальные ритмы, такты (время окончания такта, мин.); график выполнения операций на прямоточной линии												$z_i$ , шт.	
	1(41)	2(82)	3(123)	4(164)	5(205)	6(246)	7(287)	8(328)	9(369)	10(410)	11(451)	12(492)		
1	—————													0
2				—————										0
3					—————								0	
4							—————						384	
5	—————							—————						116
6	—————									—————				254
7	—————										—————			

Рис. 5. Построение плана-графика выполнения операций на прямоточной линии с учетом работы многостаночников

На основании проведенных расчетов определено, что первая операция может быть выполнена за 7 тактов, 2-я – за 4, 3-я – за 6, 4-я – за 5, 5-я – за 9, 6-я – за 6, 7-я – за 11 тактов. Общая длительность работ – 48 тактов.

Так как 7-я операция длится почти всю смену, то она и ставится в график первой, начиная с начала смены. В соответствии с приоритетами (см. табл. 1) далее ставим в график выполнение 3 и 4-й операций, 3-я операция выполняется за первые 6 тактов, а 4-я операция со 2-го такта по 6-й. Далее необходимо согласовать работу 2 и 3-й операций: 2-я операция может быть начата с начала смены, тогда переходящий запас между 2 и 3-й операциями станет нулевым. Для того чтобы переходящий запас деталей между 1 и 2-й операциями стал нулевым, необходимо 1-ю операцию начать с начала смены, а 2-ю операцию сдвинуть на три такта вправо, так как 1-я операция может быть выполнена только за 7 тактов времени. Однако с начала смены все четверо рабочих уже задействованы. Чтобы освободить 7 тактов времени можно сдвинуть вправо до конца смены 4-ю операцию, при этом по-прежнему между 3 и 4-й операциями на конец смены не будет переходящих запасов. Поэтому 1-я операция начинается с начала смены, а чтобы сохранить нулевые запасы деталей на конец смены, необходимо сдвинуть вправо на три такта и время выполнения 2 и 3-й операций.

Следующим приоритетом является согласование работ между 5 и 6-й операциями. Так как все четверо рабочих уже задействованы в графике, то выполнение оставшихся операций будут выполнять они же, но в свободное от основных работ время. Так, 5-я операция длительностью в 9 тактов может быть начата с начала смены и выполняться в течение 4-х тактов, а далее рабочий с этой операции уходит на 3-ю, где работы сдвигаются на один такт (от этого сдвига переходящие запасы не возрастут). Продолжает же 5-ю операцию рабочий, закончивший работы по 2-й операции. Между 4 и 5-й операциями возникает переходящий запас в размере 384 шт. деталей, 6-я операция начинается с начала смены, продолжается 3 такта, а далее рабочий переходит на 2-ю операцию. Продолжает работу рабочий, закончивший 3-ю операцию, но только в 11 и 12-м тактах. В 10-м такте работы по 6-й операции выполняет рабочий с 7-й операции, а затем он снова возвращается на 7-ю операцию. Между 5 и 6-й операциями возникает переходящий запас в 116 шт. деталей. Между 6 и 7-й операциями переходящий задел равен 254 шт. деталей.

Таким образом, новое решение также основано на работе только 4-х рабочих, но переходящий запас деталей уменьшается с 1 084 шт. до 754 шт. Стоимость этого запаса уменьшает-

ся с 81,656 до 60,525 тыс. руб. При этом использование локальных ритмов, тактов на прямой линии упрощает построение плана-графика выполнения операций на основе организации работы многостаночников.

### Список литературы

1. Климов А. Н., Оленев И. Д., Соколицын С. А. Организация и планирование производства на машиностроительном заводе. Л.: Машиностроение, 1979. 463 с.
2. Кузин Б. И. Организация поточного производства в условиях научно-технического прогресса машиностроения. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
3. Волкова М. В. Экономическое обоснование организации производства на прямоточных линиях // Управление инновациями: проблемы, методы и механизмы: Сб. науч. тр. / Под ред. В. В. Титова, В. Д. Марковой. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2008. С. 308–316.

*Материал поступил в редколлегию 01.03.2009*

**M. V. Volkova**

### **OPTIMIZATION OF ORGANIZATION OF JOB OF WORKERS OPERATING A NUMBER OF MACHINES SIMULTANEOUSLY ON DIRECT-FLOW LINES**

Paper deals with complex approach to economic explanation of production process. Case of discontinuous conveyer is studied. Workers operating a number of machines simultaneously are taken into account. Planning process is understood as such process on conveyer lines.

*Keywords:* production process, discontinuous conveyer, planning process.