

ГРУППОВОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ДЛЯ СЛОЖНОЙ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ

Ю.Е. Мауэргуз (Российский MES-центр)

Рассматривается составление производственного расписания для сложной поточной линии на примере линии по выпуску алюминиевых профилей. Под сложной поточной линией понимается переналаживаемая линия для большой номенклатуры продукции, которая состоит из нескольких рабочих центров, предназначенных для выполнения разнородных технологических процессов. Используется метод составления расписаний, основанный на одновременном использовании двух критериев: величины относительных затрат на переналадку и средней полезности выполнения заказов. Рассматривается влияние буферов переменной длины на работу линии. Заказы на рабочих центрах и буферах могут дробиться и объединяться. Разработан пакет прикладных программ, позволяющих вести планирование для среднего объема работ. Результатом работ программ является набор не доминируемых (не улучшаемых) вариантов, которые предлагаются пользователю для принятия окончательного решения.

Ключевые слова: групповые расписания, производственная напряженность, буферы потока, алюминиевый профиль.

Введение

Групповая обработка основана на объединении деталей (заготовок) в группы, для каждой из которых применимы однородные (групповые) технологические операции и общая (групповая) быстро переналаживаемая технологическая оснастка. Такое объединение возможно, если план производства предусматривает на любом рабочем центре выполнение некоторой операции по обработке партий деталей, входящей в одну группу. В дальнейшем, как это принято в теории расписаний, совокупность операций, необходимых для изготовления заданного количества продукта определенного вида для одного i -го заказа, будем именовать i -й работой. Если, например, на одном центре должна последовательно изготавливаться группа из нескольких партий одного и того же продукта для нескольких работ (заказов), то время переналадки между этими работами равно нулю, и вся группа таких заказов на этой операции превращается в одну партию изготовления.

Описанные в литературе групповые расписания для поточных линий, как правило, составляются в два этапа. Сначала устанавливается число и состав групп подобных работ, а также последовательность выполнения этих групп. Затем определяется порядок выполнения каждой работы внутри такой группы [1]. В некоторых случаях сначала упорядочиваются работы внутри группы, и только потом составляется расписание для групп [2]. Объединение всех работ одного вида в одну группу целесообразно при достаточно большом «окне» поставки, например, при возможности производства продукта одного вида один раз в месяц. Кроме того, такое двухэтапное расписание возможно только, если порядок выполнения работ на всех операциях линии не изменяется.

Группировочные признаки вида работ

Группирование нескольких работ для одной операции возможно, когда все работы в группе относятся к одному виду, то есть имеют одинаковые (или допустимые) значения так называемых группировочных признаков. В основу группировки могут быть положены как количественные, так и качественные группировочные признаки. Классификация работ для

производственного планирования может проводиться по одному или нескольким признакам.

Наиболее просто работы разбиваются на группы по признаку типа оснастки для установки деталей на оборудовании. Число таких возможных типов невелико, а номер соответствующего признака q обычно указывается в описании технологического процесса. При проведении операции x для новой работы другого вида (с другим типом оснастки) необходимо затратить трудоемкость S_{qx} . Аналогичная ситуация имеет место, например, при изготовлении зубчатых колес, для которых группировочным признаком является модуль зуба. В данном случае при смене вида работы необходима смена зубообрабатывающего инструмента.

Примером количественных группировочных признаков являются режимы проведения обработки: температура, длительность, используемые материалы и т. п. Кроме того, для совместного проведения работ, занимающих объем v_i , необходим достаточный физический объем оборудования v . В некоторых случаях, (например, при изменении цвета окраски), трудоемкость $S_{ох}$ переналадки на операции x зависит от порядка перехода с работы o на работу q .

В сложной поточной линии группировочные признаки на различных операциях различны. Поэтому порядок выполнения работ не остается постоянным, а сами работы постепенно накапливаются в буферах и затем перегруппируются для дальнейшей обработки.

Буфера поточной линии

В литературе рассматриваются четыре возможные варианта применения буферов в поточной линии [3]: немедленный перенос с одного рабочего центра на другой, отсутствие буфера, буфер ограниченного размера и буфер неограниченной емкости. Буферы всех типов используются для одной из трех возможных целей: развязка взаимной зависимости рабочих центров на соседних операциях, изменение порядка следования работ на операциях и хранение конечного продукта.

В синхронизированной (balanced) поточной линии буферы используются для компенсации потерь при выходе из строя отдельного центра. В не синхро-

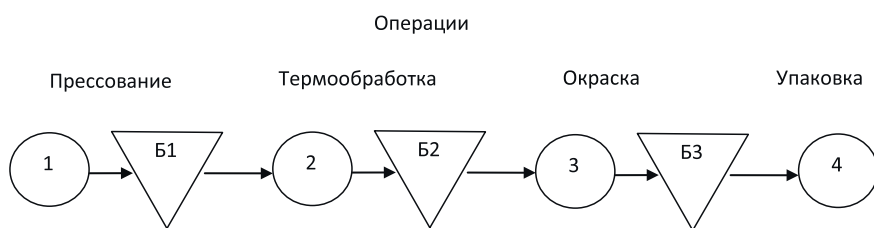


Рис. 1. Расчетная схема поточной линии

низированных (unbalanced) поточных линиях буферы являются неотъемлемыми частями линии, обеспечивающими ее плановую работу. Запас промежуточного продукта в буфере такой линии называется заделом, и определение последнего является одним из важных вопросов планирования.

Эффективность буферов существенно зависит от их расположения. В синхронизированной линии обычно рекомендуется размещение буферов в средней части технологического процесса или в нескольких местах вдоль линии, но с уменьшением емкости буферов в начале и конце линии.

При отсутствии синхронизации характер размещения буферов зависит от соотношения загрузки на отдельных операциях в линии. Наиболее сильно дисбаланс загрузки проявляется на крайних операциях. При загрузке узкого места, значительно превышающей среднюю загрузку остальных рабочих центров линии, буфер должен располагаться непосредственно рядом с узким местом [4]. Многочисленные результаты моделирования показывают, что наличие буфера влияет на производительность синхронизированной линии, как правило, даже сильнее, чем для несинхронизированной [5].

В буфере одновременно могут находиться различные работы, причем относящиеся к различным классификационным видам. Более того, некоторые работы могут находиться частично в одном буфере, частично в другом буфере, а также частично на ра-

бочем центре. Кроме того, сама емкость буфера может быть переменной, — если буфер состоит, например, из контейнеров с деталями, которые передаются с одного рабочего центра на следующий. В настоящей работе рассматривается именно такой случай.

Расчетная модель линии по выпуску алюминиевых профилей

На рис. 1 приведена схема основных операций, учитываемых при планировании.

Укрупнено линия состоит из четырех рабочих центров: пресса 1, печи 2, конвейера окраски 3 и стенов для упаковки продукции 4. После каждой из первых трех операций алюминиевые профили устанавливаются в контейнерах (буферах Б1, Б2 и Б3). Все контейнеры предполагаются одинакового размера и соответственно вмещают число профилей, определяемое размерами профилей. Контейнеры передаются с одной операции на последующую, поэтому размеры каждого буфера непрерывно изменяются. После упаковки порожние контейнеры возвращаются на операцию прессования.

В реальной поточной линии по выпуску алюминиевых профилей выполняются также некоторые другие операции (гальваническая, разогрев заготовок, разрезка прутков и т. д.), но они имеют небольшую продолжительность, сравнимую с погрешностью планирования, и поэтому могут не учитываться при предварительном составлении производственного расписания.

На каждой операции используются свои группировочные признаки. На первой операции таким признаком является вид детали (вид соответствующей пресс-формы). На второй операции группирование производится по физическому объему работ для совместной обработки. На третьей операции основ-

Заказ (№ работы)	Требуемый календарный день готовности после начала	Заказы		Номер окраски	Весовой коэффициент	Процент полного выполнения
		Вид работы (деталь)	Количество во шт.			
1	-1	3	70	1	3	50
2	0	7	50	1	3	0
3	1	4	55	2	1	0
4	1	5	50	2	1	0
5	2	6	50	2	1	0
6	2	9	50	1	1	0
7	3	8	40	2	1	0
8	3	10	80	2	1	0
9	4	5	90	3	1	0
10	4	2	70	3	1	0
11	5	1	60	2	1	0
12	5	16	70	1	1	0
13	6	15	80	2	1	0
14	7	12	60	2	1	0
15	7	1	40	3	1	0
16	7	16	50	3	1	0

Рис. 2. Фрагмент таблицы заказов

Детали: обозначение и нормы			
Обозначение	Норма количества из одной заготовки	Норма времени прессования одной детали, сек	Максимальное количество деталей в одном контейнере
1	6	85	20
2	5	50	25
3	6	50	20
4	5	76	30
5	8	81	20
6	7	69	20
7	4	53	30
8	5	69	15
9	8	80	20
10	9	68	25
11	5	50	28
12	4	70	15
13	10	74	30
14	12	50	20
15	5	50	25
16	7	60	25

Рис. 3. Номенклатура выпускаемых деталей (профилей)

Прессформы			
Обозначение	Номер детали	Нормативная стойкость в количестве	Текущий процент износа
1	1	1200	20
2	2	1000	40
3	3	1500	50
4	4	1000	50
5	5	1200	20
6	6	1000	10
7	7	1000	20
8	8	1200	50
9	9	1200	60
10	13	1000	20
11	10	1000	50
12	11	1200	30
13	12	1500	60
14	14	1300	20
15	15	1200	0
16	16	1000	10

Рис. 4. Используемые прессформы

ным признаком группирования является цвет окраски, а на четвертой операции — номер работы (заказа).

Исходные данные для расчета расписания состоят из набора заказов (рис. 2), перечня видов изготавливаемых деталей (профилей) (рис. 3),

Вид окраски	12.10.16 8:00		
	1	2	3
1	0	2	1
2	3	0	2
3	4	2	0

Рис.5. Нормы времени на переналадку окрасочного конвейера

	Состояние машин на 12.10.16 8:00			
	Рабочий центр			
	1	2	3	4
Тип рабочего центра	Пресс	Печь	Окраска	Упаковка
Настройка в начале дня на работу	9;	5;6;	3;4;	1;
Проценты работы в партии	50;	50;50;	50;100;	50;
Ожидаемый момент освобождения машины, календ. часы	8		10	15
Номера работ в буфере	6;9;8;	5;7;	2;3;	0
Проценты работ в буфере	50;50;100;	50;100;	100;50;	0

Рис.6. Исходное состояние рабочих центров

Рабочий календарь, начиная	12.10.16 8:00						
Календарный день	1	2	3	4	5	6	7
Число рабочих часов в смене	12	12	12	12	12	0	12
Число рабочих часов в смене	12	12	12	12	12	0	12

Рис.7. Фрагмент рабочего календаря

перечня используемых пресс-форм (рис. 4), норм времени на переналадку окрасочного конвейера на различные цвета (рис. 5), таблицы текущего состояния линии (рис. 6) и таблицы рабочего календаря (рис. 7).

В описываемом примере учитываются 30 работ, срок выполнения которых находится в пределах от –1 (запаздывание) до 14 дней. Для каждого заказа указывается вид необходимого профиля, число в единицах, номер окраски и процент полного выполнения заказа на момент планирования. Важность своевременного выполнения заказа может быть усилена при помощи весового коэффициента.

Поскольку предполагается, что профили всех видов прессуются из одинаковых заготовок, то для каждой детали записываются нормы числа из одной заготовки, указываются нормы времени на прессования одной единицы, а также наибольшее возможное число профиля конкретного вида, помещаемое в один контейнер.

Для профиля каждого вида в данном примере используется одна пресс-форма, для которой установлена некоторая стойкость к износу. Величина текущего износа должна учитываться и использоваться при планировании.

Время (трудоемкость) на изменение цвета окраски зависит от порядка этого изменения. Для перехода от светлой окраски к более темной время меньше, чем в противоположном случае. Самым темным является кофейный цвет, самым светлым — голубой.

В исходном для планирования состоянии на каждом рабочем центре и в каждом буфере находятся текущие работы, причем процент выполнения каждой из работ может быть различным. В данной работе предполагается, что дробление работ на части неизбежно из-за того, что печь имеет ограниченный объем и вмещает определенное чис-

ло контейнеров с деталями. Поэтому на каждой операции возможно как выполнение части одной работы (заказа) (на операциях прессования и упаковки), так и сразу нескольких работ (операции термообработки и окраски). В последнем случае работы должны быть подобраны по одному цвету.

В рассматриваемом примере предполагается, что линия работает в двухсменном круглосуточном режиме, но с перерывом на один выходной день.

На рис. 8 приведена форма ввода большого числа исходных параметров расчета, которые в данном случае являются календарно-плановыми нормативами, описывающими возможности рабочих центров. Все данные помещаются на листе таблиц MS Excel, программа расчета строится как макрос MS Excel на языке VBA.

В настоящей работе, как и во всех программах в книге [6], предлагается динамический метод группового планирования, позволяющий предложить пользователю набор из нескольких вариантов решений для окончательного выбора. При этом для оценки качества планирования используются два критерия: критерий средней полезности заказов и критерий относительных издержек на горизонте планирования.

Функции полезности при планировании

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, так как 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 [6], которая в случае многостадийного производства имеет вид:

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

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

где W_i — коэффициент приоритета; p_i — оставшаяся до окончания работы трудоемкость в часах; G — дли-

тельность планового периода в календарных часах; t — текущий момент времени; d_i — заданный момент выполнения задания в календарных часах; α — «психологический коэффициент».

При многостадийной обработке предстоящая трудоемкость всей i -й работы в часах складывается из трудоемкости на N_i отдельных невыполненных x -х операциях:

$$p_i = \sum_{x=1}^{N_i} p_{ix}. \quad (2)$$

Необходимый момент начала операции g_i в календарных часах определяется как

$$g_i = d_i - p_i + 1. \quad (3)$$

Текущая полезность i -ого заказа определяется как

$$V_i = w_i p_i / G - H_i. \quad (4)$$

Характер зависимостей (1) и (4) подробно описан в [6].

Если число заказов на горизонте планирования равно n , их общая текущая полезность равна сумме полезностей каждого, так как заказы, как правило, независимы. Тогда 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 текущей полезности меняется со временем, так как, во-первых, изменяется запас времени до планового момента выполнения, во-вторых, часть заказов оказывается выполненной, в-третьих, появляются новые заказы.

В настоящей статье для составления расписания при многостадийной обработке предлагается строить многоуровневое дерево выполнения операций, последовательно рассматривая целесообразность построения новых узлов дерева.

Пусть в момент времени C_{zl} заканчивается операция на операции z в узле дерева, находящемся на уровне l . На следующем уровне должна выполняться одна из еще не выполненных операций. Положим, что такой операцией является x -я операция для k -ой работы, которая может начаться в момент t_k . Соответственно, операция должна быть закончена в момент $t_k + p_{kx}$.

Как показано в [6], полезность всего объема работ на каждом следующем уровне дерева операций может быть вычислена по одной из рекуррентных формул, используемых при известном значении полезности на предыдущем уровне:

$$\bar{V}_{l+1,k} = \frac{1}{t_k + p_{kx}} (\bar{V}_l \times C_{zl} + \int_{C_{zl}}^{t_k + p_{kx}} V_k dt), \text{ если } t_k + p_{kx} \geq C_{zl} \quad (6)$$

и

$$\bar{V}_{l+1,k} = \bar{V}_l + \frac{1}{t_k + p_{kx}} \int_{C_{xq}}^{t_k + p_{kx}} V_k dt, \text{ если } t_k + p_{kx} < C_{zl}. \quad (7)$$

В выражениях (6, 7) величина \bar{V}_l равна средней полезности всего объема планируемых работ за время от начального момента $t = 0$ до момента окончания последней уже запланированной операции C_{zl} ; C_{xq} — момент окончания последней работы на x -й операции, выполненного ранее уровня q ; V_k — текущая (переменная) полезность всех незаконченных работ; $\bar{V}_{l+1,k}$ — средняя полезность всего объема планируемых работ за время от начального момента $t = 0$ до окончания следующей операции $t_k + p_{kx}$.

Верхний предел интеграла в формулах (6, 7) одинаков и равен моменту окончания операции, планируемой на следующем уровне построения дерева. Нижний предел интеграла в (6) и (7) отличается, так как он равен моменту завершения работы различных рабочих центров. В выражении (6) таким рабочим центром является рабочий центр z последнего построенного уровня, а в выражении (7) — это рабочий центр, на котором должна выполняться операция x следующего уровня. Очевидно, что этот рабочий центр мог быть задействован в построении дерева решения на более ранних уровнях, и, соответственно, последний уровень, на котором он участвовал в расписании, $q < l$. Порядок вычисления интегралов в (6, 7) описан в [6].

Функция полезности для каждого из выполняемых заказов с течением времени непрерывно изменяется, поскольку она зависит от текущей производственной напряженности. Напряженность заказа падает с ростом резерва времени на выполнение заказа и увеличивается с ростом его трудоемкости. Напряженность заказа всегда положительна, причем ее значение по истечении установленного срока выполнения заказа быстро растет. В отличие от напряженности, функция полезности заказа положительна только, пока резерв времени на выполнение заказа положителен; если этот резерв отрицательный — функция полезности заказа становится отрицательной.

Величина относительных прямых издержек при многостадийном производстве может определяться как сумма издержек переналадок для всех используемых рабочих центров, то есть как безразмерная функция отрицательной полезности издержек (функцией потерь) для проведения n работ на горизонте планирования:

$$U = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^{N_i} C_{ix}, \quad (8)$$

где C_{ix} — стоимость издержек, например, переналадок с операции для одной работы на операцию для другой работы; C — средняя стоимость одного дня работы персонала.

Расписания для группового планирования

Рассмотрим задачу, структурная формула которой в соответствии с известным трехэлементным способом классификации расписаний имеет вид:

$$F | pmtn, d_i, s_{oqx}, b_x | U, \bar{V}. \quad (9)$$

Коэффициент	Длительность планового периода, в днях	Количество рабочих смен	Стоимость рабочей смены	Стоимость нормо-часов	Начало работы первой смены	Момент планирования
0,1	5	2	3600	1000	8	13.10.16 8:00
Количество видов работ	Количество цветов окраски	Полный объем печи в контейнерах	Норма времени отжига, часы	Норма времени на подготовку отгрузки, часы	Ритм окрасочного конвейера, мин.	Норма полного времени окраски, мин.
16	3	5	6	1	1,5	60
Норма времени в мин. на установку заготовки	Норма времени на замену прессформы, мин.	Норма времени на загрузку печи, мин.	Норма времени на ремонт прессформы, дни	Норма времени на упаковку 1 детали, мин.	Имя первой ячейки нач. состояния печи	Имя последней ячейки нач. состояния печи
5	60	15	15	3	AC12	AF19
Имя первой ячейки списка работ	Имя последней ячейки списка работ	Имя первой ячейки времени переналадки	Имя последней ячейки времени переналадки	Имя первой ячейки календаря	Имя последней ячейки календаря	Имя первой ячейки результата расчета
A5	G34	Y5	AA7	AC24	AT27	I100
Имя первой ячейки списка деталей	Имя последней ячейки списка деталей	Имя первой ячейки времени прессовки	Имя последней ячейки времени прессовки	Количество используемых контейнеров	Максимальное количество контейнеров в буфере прессы	Максимальное количество контейнеров в буфере прессы
15	M20	R5	U20	36	20	2

Рис. 8. Форма ввода данных

Параметр первого поля F описывает поточную линию. Во втором поле параметр $pmtn$ показывает, что обработка на рабочих центрах производится партиями, в общем случае не равными размерам заказов; d_i — заданный момент выполнения i -й работы; $s_{огх}$ — трудоемкость переналадки рабочего центра на операции x с деталей o вида на детали вида q ; b_x — доступная емкость рабочего центра (или необходимого буфера) на операции x . В третьем поле записаны две целевые функции U, \bar{V} .

Для решения задачи (9) используется метод, основанный на многокритериальном «жадном» подходе [7]. В этом случае алгоритм расчета производственных расписаний может представлять дерево последовательных решений о запуске каждого рабочего центра. При этом на каждом уровне построения дерева из всех возможных таких решений отбираются те из них, для которых оба упомянутых выше критерия являются «недоминируемыми». Это значит, что отбрасываются те возможные варианты решения, для которых существуют другие решения с лучшими значениями обоих критериев. В жадном алгоритме на каждом шаге делается выбор, который кажется самым лучшим. В данном случае используется «полосовой поиск» по критериям задачи, которыми являются значения средней полезности заказов \bar{V} и затрат U .

Алгоритм решения

На каждом шаге построения дерева, начиная от исходного состояния линии, отбираются несколько вариантов возможных решений, не доминирующих друг друга, используя следующий алгоритм.

Шаг 1. Расчет функций полезности в начальный момент планирования.

Положим номер уровня $l=0$; начальная функция издержек $U_0=0$; начальная полезность заказов V_0 определяются по формуле (5); число узлов $Z_0=1$.

Внешний цикл

Шаг 2. Определение текущего состояния системы на последнем построенном уровне.

Для каждого узла z построенного дерева на уровне l фиксируется загрузка работами каждого рабочего центра и каждого буфера.

Шаг 3. Определение возможных операций на следующих уровнях.

Для каждого узла z построенного дерева на уровне l устанавливаются возможные операции и определяются значения g_i при помощи формулы (3).

Внутренний цикл

Шаг 4. Расчет параметров узла и функций полезности на следующих уровнях.

Для каждой k -й операции, которая возможна к моменту C_{kz} , и не является выполненной ранее, определяются необходимые параметры узла: номера текущих работ и проценты их выполнения на текущем рабочем центре и в текущем буфере; остающиеся номера работ и проценты их выполнения в предыдущем рабочем центре и предыдущем буфере. Рассчитываются значения критериев $U_{l+1,z,k}$ и $\bar{V}_{l+1,z,k}$ по формулам (8) и (6, 7).

Конец внутреннего цикла

Шаг 5. Определение доминируемых узлов дерева.

Если уровень $l+1$ не является последним, то для доминирования на $l+1$ -м уровне возможного узла y дерева над возможным узлом x необходимо, чтобы соблюдались неравенства

$$U_{l+1,y} \leq U_{l+1,x}, \bar{V}_{l+1,y} \geq \bar{V}_{l+1,x} \text{ и } g_{l+1,y} < g_{l+1,x}, \quad (10)$$

причем первое или второе неравенство должно быть строгим.

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

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

Шаг 6. Переход на новый уровень или окончание работы программы.

Если уровень больше последнего (выполнены все операции), то окончание работы.

Иначе увеличение номера уровня $l=l+1$ и переход на шаг 2.

Конец внешнего цикла

Основные ограничения

На каждой операции x существуют свои ограничения. Выполнение первой операции — прессования считается возможным, если число свободных контейнеров достаточно для размещения 20% от физического объема работы. Кроме того, общее число уже заполненных контейнеров в буфере прессы Б1 и контейнеров, заполняемых на операции, не должно превышать максимального значения b_1 (рис. 8). Это число обычно определяется площадью цеха, предназначенной для хранения контейнеров. При выполнении каждого заказа (работы) может изменяться

Недоминируемые варианты в результате расчета	
Вариант 1 Машина 1:	13; 10; (11; 15); (16; 12); (17; 24); (18; 29); (28; 14); (22; 19; 19); (25; 27); 21; (20; 20; 30); 26; (23; 23);
Вариант 1 Машина 2:	(6; 9); (9; 10); (10; 15; 16); (11; 12); (12; 13); (13; 14); (14; 16; 17); (18; 19); 20; (21; 22); (22; 23); (24; 25); (25; 26); (27; 28); (23; 29; 30); 30;
Вариант 1 Машина 3:	(4; 5; 5; 8; 8; 7); (6; 6); (9; 10; 10; 9; 9; 15; 15; 16); 11; (12; 12); (13; 13; 13; 14; 14); 16; (17; 18; 18; 19; 19; 20; 20; 21); (22; 22; 22; 23); 24; (25; 25; 25; 26; 27); (28; 23); 29; (30; 30);
Вариант 1 Машина 4:	2; (3; 3); 4; 7; 5; 6; 9; 8; 16; 15; 9; 10; 12; 11; 12; (13; 13); (14; 14); 16; 17; 18; (22; 22); 21; 24; 23; 25; 19; 28; 23; 26; 29; 20; 27; (30; 30);

Рис. 9. Результаты планирования

вид изготавливаемых деталей (рис. 2). В этом случае требуется переналадка прессы s_1 , трудоемкость которой в настоящей статье считается одинаковой для всех видов работ и устанавливается по норме времени на замену пресс-формы (рис. 8).

Последующая операция для любой работы считается возможной, если хотя бы часть деталей для этой работы обработана на предыдущей операции, то есть находится либо на рабочем центре, либо в его буфере.

Режимы термообработки для деталей любого вида считаются одинаковыми, и поэтому при загрузке контейнеров в печь возможна одновременная обработка нескольких частей различных работ. Загрузка в печь длится в соответствии с установленной нормой (рис. 8). Для отбора работ в печь из буфера прессы работы сортируются по датам необходимого выполнения. Так как число контейнеров в печи не может превышать ее физическую емкость b_2 , отбирается возможное число отсортированных контейнеров. При этом процент выполнения любой из загружаемых работ может быть $\leq 100\%$.

Для выполнения окраски детали (профили) вынимаются из контейнера и устанавливаются на соответствующие крепления на конвейере, число которых на длине конвейера равно b_3 . Если цвет новой работы не соответствует цвету текущему окраски деталей на конвейере, процесс их окраски должен быть закончен. Затем конвейер должен быть остановлен и перенастроен на новый вид краски. Трудоемкость переналадки конвейера на новый вид краски $s_{ог3}$ определяется в соответствии с рис. 5. Если цвет окраски новой работы совпадает с текущим цветом, загрузка новой работы может начаться непосредственно в момент освобождения первого крепления на конвейере.

Для выполнения операции упаковки необходима подготовка стелдов (укупорки) и документов для выполненной работы в соответствии с установленной нормой (рис. 8). По окончании упаковки определяется число освобождающихся контейнеров, которое затем может использоваться на первой операции.

Пример расчета расписания

На рис. 9 приведены результаты расчета производственного расписания. Число возможных вариантов для рассматриваемых сложных линий обычно очень невелико, и часто вообще равно одному варианту. Каждый рабочий центр здесь именуется машиной. Числа, разделяемые знаком «;», представляют собой работы (заказы), выполняемые на каждой машине. Отличительной чертой настоящего решения является его групповой характер, причем это свойство проявляется для каждой из машин. На рис. 9 группы, организованные по вышеописанным группировочным признакам, заключены в скобки.

В рассматриваемом примере полагается, что в момент планирования на линии выполняются работы с номерами 1...9 (рис. 6), которые находятся в различной степени готовности, но уже начаты. Например, работа 1 уже на 50% полностью закончена, а остальные 50% находятся на упаковке. Работа 6 на 50% находится в печи, а на 50% — в буфере прессы и т. д. Поэтому операция прессования должна планироваться для работ с номерами больше 9.

В данном случае на первой очереди для прессования, вообще говоря, должна находиться работа 10 со сроком полной готовности 4 календарных дня (рис. 2), однако алгоритм на первое место предлагает работу 13 со сроком 6 календарных дней. Причина такой ситуации состоит в том, что работа 13 требует для своего выполнения заметно большей трудоемкости, чем работа 10. Поскольку срок выполнения обоих работ довольно значительно отстоит от начала расписания, напряженность их выполнения невелика, и порядок в расписании на своевременность их выполнения сказывается мало. Более того, обе работы какое-то время должны находиться в бу-

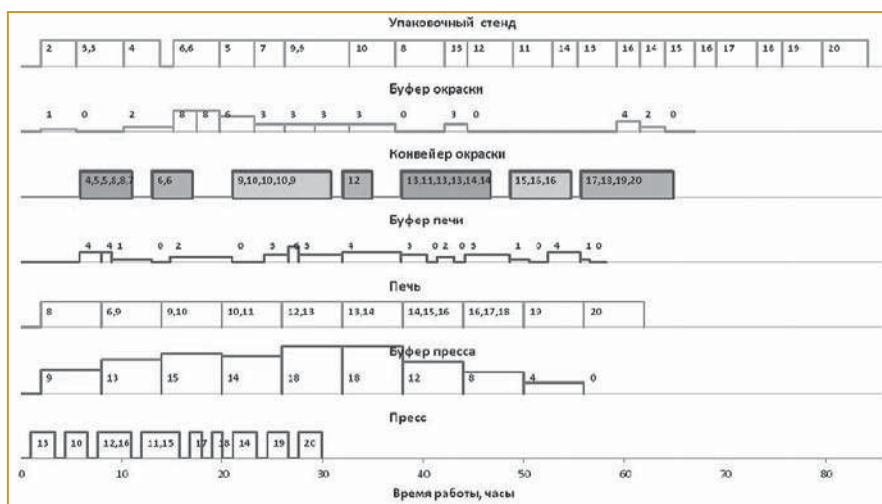


Рис. 10. Фрагмент диаграммы Ганта для 20 работ

Размер буфера окраски (рис. 10, шестая строка) сильно колеблется со временем, но < 10 контейнеров.

При упаковке (рабочий центр 4) группирование ведется для нескольких партий одной работы (например, для работы 3 или работы 14 и т. п.). В некоторых случаях, например работа 9, одна работа упаковывается в несколько партий (рис. 10, седьмая строка).

На рис. 11 приведен фрагмент графика выполнения работ на линии. В каждой группе чисел указывается момент начала работы в календарных часах, момент окончания; в скобках записывается номер операции и (через дробь) процент выполнения работы в партии.

Работа 1 вообще не планируется, так как в начале составления расписания уже должна быть выполнена последняя операция (рис. 6). Для работы 2 и 3 запланирована только операция упаковки, для работ 4, 5 и 7 — операции окраски и упаковки, для работ 6, 8 и 9 — операции, начиная со второй. Последующие работы должны пройти через все 4 операции.

Заключение

Полученное решение не является на 100% оптимальным и, вообще говоря, может быть улучшено. Причина заключается в использовании «жадного» алгоритма, не обеспечивающего «глобальную» оптимизацию. Зато решение получается достаточно удовлетворительным, быстрым и надежным — длительность программы в данном примере составляет порядка 2 мин.

В дальнейшем решение может быть улучшено в двух направлениях. В первом случае можно, отталкиваясь от полученного, искать оптимальное решение по минимуму издержек при помощи специально разработанной программы (например, на основе генетических методов). Во втором случае, можно положиться на опыт пользователя и использовать ручную корректировку расписания. Например, объединяя работу

При подготовке к сражению я всегда находил, что планы бесполезны, но планирование — обязательно.

Дуайт Эйзенхауэр

11 с группой работ 13, 14, работу 16 с работами 22 и 23, работу 22 с работой 29, можно довести коэффициент группирования при окраске до величины $K_g = 2,5$.

Описанное решение может применяться как пример базового решения для различных задач в металлургии, химическом производстве, пищевой промышленности и т. п., во всех тех случаях, где имеет место поточное многономенклатурное производство.

Список литературы

1. Neufeld J. S., Gupta J., Busher U. A comprehensive review of flowshop group scheduling literature // Journal of Computers and Operations Research. 2016. V.70. №С. P. 56-74.
2. Logendran R., Hanson E. Group scheduling in flexible flow shops // International Journal of Production Economics. 2005. V. 96. №2. P. 143-155.
3. Liu S. Q., & Kozan E. Scheduling a flow shop with combined buffer conditions // International Journal of Production Economics. 2009. V. 117. №2. P. 371-380.
4. Powell S.G., Pyke D.F. Allocation of buffers to serial production lines with bottlenecks // IIE Transactions 1996. V. 28, P. 18-29.
5. Conway R., Maxwell W., MacClain J., Thomas J. The Role of work-in-process inventory in serial production lines // Operations Research. 1988. V. 36. №2. P. 229-241.
6. Мауэргауз Ю.Е. Динамические расписания для гибких производств: 12 компьютерных программ. Москва: НСС. 2018.
7. Canon L.-C. and Jeannot, E. 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. 2011. P. 57-69.

*Мауэргауз Юрий Ефимович — канд. техн. наук, ведущий эксперт российского MES-центра.
E-mail: yu.mauergauz@mescenter.ru prizasu@yandex.ru
Контактный телефон +7 (916) 900-33-12.*

Mitsubishi Electric представила технологию диагностики на основе искусственного интеллекта

Корпорация Mitsubishi Electric объявила о разработке первой в мире технологии диагностики на основе искусственного интеллекта (ИИ) Maisart. Технология использует машинное обучение для анализа данных, получаемых от датчиков, и создания модели перехода между состояниями производственного оборудования, что позволяет быстро и точно обнаруживать сбои в работе оборудования с целью повышения производительности на фабриках и заводах.

ИИ обеспечивает точность обнаружения сбоев в работе оборудования на основе моделирования переходов между рабочими состояниями. В отличие от традиционной технологии диагностики, которая использует одни и те же условия для обнаружения аномалий независимо от текущего рабочего состояния машины, новая технология с использованием ИИ анализирует информацию, полученную от датчиков для автоматического моделирования перехода между различными рабочими состояниями оборудования.

На базе модели перехода состояний определяется набор оптимальных критериев для определения сбоев, возникающих при выполнении каждой операции. Признаки отказа оборудования могут быть обнаружены заблаговременно, то есть до фактического возникновения сбоя в работе. Это помогает сократить объем работ, связанных с техническим обслуживанием и уменьшить время производственного простоя.

Кроме того, ИИ упрощает внедрение систем обнаружения сбоев за счет новой технологии, которая упрощает и сокращает процедуру ручной настройки при внедрении систем обнаружения сбоев.

По данным компании MIC Research Institute Ltd, темпы роста рынка диагностического обслуживания в Японии составляют 41,5 % в год. Ожидается, что его объем достигнет 44,5 млрд. иен к 2024 финансовому году. Кроме того, осуществляется переход от планового обслуживания к предсказательной диагностике, что приводит к росту спроса на высокоточные технологии обнаружения сбоев. Однако режимы использования промышленного оборудования постоянно меняются, поэтому признаки возникновения сбоев в его работе также меняются в зависимости от условий применения и текущего рабочего состояния конкретного оборудования.

Новая технология диагностики на основе ИИ Mitsubishi Electric автоматически моделирует переход оборудования от одного рабочего состояния к другому с целью создания оптимальных критериев для обнаружения сбоев в любом рабочем состоянии. Подобный подход позволяет точно предсказать отказ механизмов.

[Http:// MitsubishiElectric.com](http://MitsubishiElectric.com) и MitsubishiElectric.ru