

МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА

ТЕТЕРИН Г. П., ДАЦИН Я. Е.

(Москва, Ростов)

Основная задача организации производства в цехе (кузнечном, пресовом, сварочном и т. п.) машиностроительного завода — обеспечить потребности других цехов, в том числе и сборочного, в изделиях заданной номенклатуры при максимальных экономической эффективности, качестве и безопасности работ. Показателем эффективности обычно служит коэффициент использования машинного времени оборудования в цехе.

Дискретный производственный процесс (ДПП) представляет собой конечное множество отдельных процессов, протекающих параллельно на N производственных участках цеха, а их ДПП складывается из конечного множества производственных процессов на каждом рабочем месте участка. ДПП на нем — это последовательная смена состояний рабочего места, имеет стохастический характер с непрерывным временем и дискретным конечным множеством состояний. Приведем перечень состояний рабочих мест прессового цеха: 1) работа в нормальном режиме, 2) работа в одностороннем режиме (для автолиний); простои, связанные с: 3) ожиданием наладчика, 4) его работой, 5) ожиданием механика, 6) его работой, 7) ожиданием энергетика, 8) его работой, 9) ожиданием инструментальщика, 10) его работой, 11) ожиданием крана, 12) его работой, 13) ожиданием переналадки штампа, 14) переналадкой штампа, 15) отсутствием заготовок, 16) профилактическим ремонтом, 17) прочие простои.

Имея оценки распределения фонда машинного времени по состояниям, можно судить об эффективности организации ДПП в целом и обеспечивающих его процессов.

Под стратегией организации производства понимают способ использования ресурсов (рабочей силы, оборудования, инструмента), который будет выражен совокупностью организационных структур расстановки рабочих и оборудования, а также операционной структурой (составом и последовательностью выполнения отдельных операций производственного и технологического процессов).

Обозначим стратегию l на участке i

$$S_i^{(l)}(A_i^{(u)}, M_i^{(v)}, \eta_i^{(w)}), \quad i=1, \dots, N, \quad l=0, 1, \dots, \quad (1)$$

где $A_i^{(u)}$, $M_i^{(v)}$, $\eta_i^{(w)}$ — соответственно u -я, v -я, w -я альтернативы органи-

зационных структур расстановки рабочих, оборудования и операционной структуры; $u, v, w=0, 1, \dots, N$ — число производственных участков в цехе. Обозначим через

$$S_i^{(0)}(A_i^{(0)}, M_i^{(0)}, \eta_i^{(0)}) \quad (2)$$

стратегию существующей организации производства на участке i .

Для характеристики ДПП на рабочем месте j производственного участка i в смене k введем систему показателей, которые объединим в вектор

$$Y_{ijk} = (y_{ijk}^{(r)})_{r=1}^n, \quad 0 \leq y_{ijk}^{(r)} \leq 480, \quad \sum_{r=1}^n y_{ijk}^{(r)} = 480, \quad (3)$$

$$i=1, \dots, N, j=1, \dots, m_i, k=1, \dots, g, r=1, \dots, n,$$

где $y_{ijk}^{(r)}$ — время пребывания рабочего места j производственного участка i в состоянии r за смену k ; n — число состояний рабочих мест; m_i — число неразличимых (взаимозаменяемых) рабочих мест на производственном участке i ; g — число рабочих смен, учитываемых при обследовании организации производства или при моделировании ее различных состояний; 480 — время рабочей смены, мин. Для описания ДПП производственного участка i в смене k введем систему показателей, которые также объединим в вектор

$$Y_{ik} = (y_{ik}^{(r)})_{r=1}^n, \quad y_{ik}^{(r)} = \sum_{j=1}^{m_i} y_{ijk}^{(r)}, \quad 0 \leq y_{ik}^{(r)} \leq 480m_i, \quad \sum_{r=1}^n y_{ik}^{(r)} = 480m_i, \quad (4)$$

$$i=1, \dots, N, k=1, \dots, g, r=1, \dots, n,$$

где $y_{ik}^{(r)}$ — время пребывания всех рабочих мест производственного участка i в состоянии r за смену k . Для характеристики стратегии организации производства на участке i используем вектор, каждая компонента которого — математическое ожидание соответствующих компонент векторов Y_{ik}

$$\hat{Y}_i = (\hat{y}_i^{(r)})_{r=1}^n, \quad (5)$$

$$\hat{y}_i^{(r)} = \frac{100\%}{480gm_i} \sum_{k=1}^g y_{ik}^{(r)}, \quad 0 \leq \hat{y}_i^{(r)} \leq 100\%, \quad \sum_{r=1}^n \hat{y}_i^{(r)} = 100\%,$$

$$i=1, \dots, N, r=1, \dots, n, k=1, \dots, g,$$

где $\hat{y}_i^{(r)}$ — средняя (за g смен) доля времени, %, нахождения всех рабочих мест производственного участка i в состоянии r за смену. При этом $\hat{y}_i^{(r)}$ образуют систему показателей, характеризующих ДПП путем оценивания долей времени пребывания его в различных состояниях.

Необходимо синтезировать оптимальные организационные структуры, предполагая неизменными производственную программу и организационную среду [4] цеха, т. е. организационные структуры, дисциплину и куль-

туру труда, число, последовательность и длительность отказов оборудования и т. п., а также систему управляющих и возмущающих воздействий на производственный процесс в цехе (на участке). Неизменность организационной среды цеха (с учетом ее стохастичности) означает, в частности, что методы определения производственных заданий рабочим местам, производительность рабочих и оборудования, снабжение, дисциплина обслуживания и т. п. проявляются в ДПП в виде закономерностей, характеризующихся параметрами цепи Маркова [2]. Состояние организационной среды цеха (производственного участка) отражается в реализациях ДПП за смену, поэтому будем описывать эти состояния векторами (4).

С учетом стохастичности организационной среды множество ее возможных состояний имеет мощность континуума. По реализациям ДПП в отдельные смены (они определяются по данным обследования или путем моделирования) можно судить о различных ее состояниях и их распределении, причем о последнем тем точнее, чем за большее число смен имеется информация. Дескриптивная стохастическая модель [3] ДПП основана на цепях Маркова и методе статистического моделирования Монте-Карло [4–7].

Характеристика стратегий (1) и (2) по системе показателей (5) исходит из закона больших чисел, при этом используются выборочные средние (компоненты вектора (5)) для оценки соответствующих генеральных средних. Как показали расчеты, выборочная среднеарифметическая каждой из оцениваемых величин будет с достоверностью 0,954 отклоняться от соответствующей генеральной средней не более, чем на 10% при использовании исходных данных за 12–15 смен и на 5% — при моделировании 100–200 смен [8]. Приходится ограничиться несколько заниженной точностью обследования из-за сравнительно высоких трудозатрат при сборе исходной информации.

Пусть первые компоненты векторов (3)–(5) выражают коэффициент использования машинного времени. В развиваемом подходе этот коэффициент применяется либо в качестве критерия эффективности стратегии для того или иного состояния организационной среды, либо как ограничение, определяющее объем выпускаемой продукции [9–11].

Рассмотрим постановку задачи выбора стратегии оптимальной операционной структуры на производственном участке i : найти $S_i^*(\eta_i^*)$ при $A_i^{(0)} = \text{const}$, $M_i^{(0)} = \text{const}$. Рабочие места на участке предполагаем одинаковыми (взаимозаменяемыми), число состояний каждого из них конечно и равно 17, переходы из одного состояния в другое случайны с заданными и вероятностями, время пребывания в каждом состоянии также случайно и распределено по экспоненциальному закону. Производственный процесс на каждом рабочем месте будем считать независимым от процессов на других местах (последнее допущение позволяет конструировать математическую модель ДПП производственного участка i как объединение не-зависимых производственных процессов на m_i одинаковых рабочих местах).

В соответствии со схемой, приведенной в [12], общую задачу выбора стратегии $S_i^*(\eta_i^*)$ можно классифицировать как одноцелевую задачу принятия решения в условиях неопределенности. Чтобы ее решить, производится стохастическое прогнозирование недостающей информации с помощью математического ожидания [13] (применяется принцип оптимизации в среднем, предполагающий в данном случае переход от значения коэффициента использования машинного времени за смену к его осредненной статистической характеристике за несколько смен).

В [6, 7] показано, что ДПП на каждом рабочем месте может быть описан простой однородной цепью Маркова с непрерывным временем, которая задается по схеме [2]: а) стохастическим вектором исходного состояния

$$P^{(i)}(0) = (p_r^{(i)}(0))_{r=1}^n, \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^n p_r^{(i)}(0) = 1, \quad i=1, \dots, N, \quad (7)$$

где $p_r^{(i)}(0)$ — вероятность состояния r в начале смены; б) стохастической матрицей переходов (при моделировании позволяет определять состояния рабочего места в производственном процессе), единой для всех шагов и смен (ДПП предполагается стационарным [7])

$$\pi^{(i)} = \|p_{jk}^{(i)}\|, \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^n p_{jk}^{(i)} = 1, \quad (9)$$

где $p_{jk}^{(i)}$ — вероятность перехода из состояния j в k ; в) вектором, единым для всех шагов и смен, каждая компонента которого — параметр показательно распределенного времени нахождения рабочего места в одном из состояний

$$\Lambda^{(i)} = (\lambda_r^{(i)})_{r=1}^n, \quad (10)$$

$$\lambda_r^{(i)} \geq 0, \quad i=1, \dots, N.$$

Возможна идентификация параметров цепи Маркова на основе статистической обработки наблюдений ДПП.

Дескриптивную стохастическую модель ДПП представим в виде

$$\hat{Y}_i = (\hat{y}_i^{(1)}, \dots, \hat{y}_i^{(n)}) = \theta(P^{(i)}(0), \pi^{(i)}, \Lambda^{(i)}, t), \quad (11)$$

где t — время; θ — некоторый оператор.

Пусть в соответствии с (5) существующая на производственном участке стратегия организации $S_i^{(0)}(\eta_i^{(0)})$ характеризуется определенным по результатам обследования вектором $\hat{Y}_i^{(\Phi)} = (\hat{y}_i^{(\Phi r)})_{r=1}^n$. Для простоты полагаем $\hat{Y}_i^{(\Phi)} = \hat{Y}_i$, где $\hat{Y}_i$ — вектор, вычисляемый по результатам моделирования на основе эмпирически найденных параметров цепи Маркова. Согласно принципу оптимизации в среднем эффективность альтернативной стратегии $S_i^{(i)}(\eta_i^{(i)})$ будем оценивать значением первой компоненты вектора (5).

Сформулируем задачу синтеза стратегии оптимальной операционной структуры: найти с помощью модели (11) операционную структуру η_i^* с таким составом и последовательностью операций, что первая компонента соответствующего вектора (5) достигает максимума с учетом неизменности организационной среды (и, в частности, расстановок рабочих и оборудо-

Распределение фонда машинного времени по состояниям рабочих мест при разных стратегиях организации производства

Стратегия	Работа, %		Простои (%), связанные с														прочие
	в нормальном режиме	в аварийном режиме	ожидания наладчиков	работой наладчиков	ожидания механиков	работой механиков	ожидания энергетиков	работой энергетиков	ожидания работников	работой работников	ожидания инструментальщиков	работой инструментальщиков	ожидания повешенных	перенаследкой штатных	отсутствием штатных	профилактическим ремонтом	
$\hat{Y}_i$	$\hat{y}_i^{(1)}$	$\hat{y}_i^{(2)}$	$\hat{y}_i^{(3)}$	$\hat{y}_i^{(4)}$	$\hat{y}_i^{(5)}$	$\hat{y}_i^{(6)}$	$\hat{y}_i^{(7)}$	$\hat{y}_i^{(8)}$	$\hat{y}_i^{(9)}$	$\hat{y}_i^{(10)}$	$\hat{y}_i^{(11)}$	$\hat{y}_i^{(12)}$	$\hat{y}_i^{(13)}$	$\hat{y}_i^{(14)}$	$\hat{y}_i^{(15)}$	$\hat{y}_i^{(16)}$	$\hat{y}_i^{(17)}$
$S_1^{(0)}$	21,65 22,6	3,3 2,98	3,37 2,93	6,43 7,83	1,3 0,83	1,7 1,19	0,47 0,45	2,4 1,82	0 0	1,4 2	5,55 5,4	2,86 3,2	11,34 10,6	5,9 4,3	4,93 5,85	9,7 10,7	16,9 17,2
$S_1^{(1)}$	25,2	2,64	3,04	7,29	0,81	1,24	0,42	1,79	0	2,2	6,2	3,47	10,8	4,3	5,76	9,5	14,6
$S_1^{(2)}$	31,2	4,14	3,96	10,8	1,01	1,73	0,65	2,44	0	2,82	7,47	4,38	13,6	5,4	7,48	0	2,66
$S_1^{(3)}$	27,6	3,44	3,46	9,4	1,04	1,65	0,57	2,2	0	3,3	6,8	3,88	0	0	6,5	9,5	20,5
$S_1^{(4)}$	38,6	5,1	4,67	13,1	1,27	2,18	0,78	3,1	0	4,2	9,1	5,4	0	0	8,9	0	3,47
$S_1^{(5)}$	23,7	0	3	8,2	0,87	1,29	0,48	1,95	0	2,24	5,69	3,4	10,9	4,39	6,1	9,6	18,1
$S_1^{(6)}$	24,5	3,19	3,1	8,5	0,84	1,3	0,45	1,99	0	2,5	5,99	3,48	11,1	4,5	0	10,0	18,5

Примечания. 1) Показатели верхней строки получены по данным обследования за 17 смен, остальные строки — в результате моделирования 800 смен ДПП 15 автоматических линий; 2) за счет округлений суммы показателей несколько отличаются от 100%; 3) основными факторами, определяющими прочие простои, являются избыточное число оборудования и невыходы на работу.

дования), а также неформализуемых ограничений (в связи с этим задача решается в человеко-машинном режиме).

Наибольшие трудности в решении задачи оптимизации связаны с необходимостью модифицировать параметры цепи Маркова в зависимости от той или иной альтернативной стратегии операционной структуры особенно из-за взаимосвязи отдельных параметров цепи Маркова согласно (7) и (9).

Наиболее просто модифицировать параметры вектора (10), поскольку его компоненты независимы между собой. В результате отдельные из них либо изымаются, либо их приравнивают нулю, или же их число увеличивается. Сложнее с вектором начальных состояний и матрицей переходов, где в силу требований (7) и (9) всякая модификация параметров должна сопровождаться перераспределением их значений, а для этого в каждом отдельном случае нужны специальные исследования. Когда же найдено правило модификации параметров цепи Маркова, необходимо каждой альтернативной стратегии операционной структуры поставить в соответствие параметры цепи Маркова и провести моделирование с вычислением вектора (5), по значению первой компоненты которого делается заключение о перспективности альтернативы, а следовательно, и предусматриваемых ею организационно-технических мероприятий по изменению операционной структуры.

Адекватность сконструированной модели дискретному производственному процессу [7] позволяет прогнозировать с высокой достоверностью и точностью влияние изменений в организации производства на общую эффективность ДПП.

Рассмотрим прогнозирование эффективности операций на примере участка автоматических линий ($i=1$) прессового цеха.

Характеристика стратегий представлена в таблице, где приведены также результаты решения задач, рассматриваемых ниже.

Задача 1. Для стратегии $S_1^{(0)}$ вероятность нахождения автоматической линии в начале смены в состоянии «работа в нормальном режиме» $p_1^{(1)}(0) = 0,071$, а в состоянии «прочие простои» — $p_{17}^{(1)}(0) = 0,41$ (см. стохастический вектор начальных состояний (6)). Естественно предположить, что с повышением уровня организации производства ситуация изменится: вероятность нахождения автоматической линии в начале смены в состоянии «работа в нормальном режиме» возрастает, а в состоянии «прочие простои» — соответственно уменьшится. Сформулируем задачу следующим образом: охарактеризовать стратегию организации производства $S_1^{(1)}$, определяемую новыми (например, $p_1^{(1)}(0) = 0,41$; $p_{17}^{(1)}(0) = 0,071$) значениями 1-й и 17-й компонент стохастического вектора начальных состояний (6). Как следует из таблицы, реализация стратегии $S_1^{(1)}$ обеспечит повышение коэффициента использования машинного времени (а следовательно, и объема произведенной продукции) на

$$\frac{25,2 - 22,6}{22,6} 100 = 11,5\%.$$

При этом стратегию $S_1^{(0)}$ оценивали значением коэффициента использования машинного времени, полученным по результатам моделирования, а не обследования с тем, чтобы уменьшить погрешность прогноза.

Задача 2. Охарактеризовать стратегию $S_1^{(2)}$, предусматривающую ликвидацию «простоя, связанного с профилактическим ремонтом» (состоя-

ние 16) и уменьшение «прочего простоя» (состояние 17). Ликвидация «простоя, связанного с профилактическим ремонтом», означает, что этот ремонт будет проводиться в нерабочие смены (в описываемом прессовом цехе время нахождения в состоянии 16 всегда равно 480 мин, в силу чего в это состояние рабочие места попадают только в начале смены и находятся в нем всю смену).

Для решения задачи приравняем нулю вероятность нахождения рабочего места в начале смены в состоянии 16, одновременно на основе опроса экспертов проводим перераспределение между вероятностями других состояний вектора (6), чтобы выполнялось условие (7). Функция распределения времени нахождения рабочего места в состоянии 17 представляет экспоненту с математическим ожиданием, равным 43 мин. Пусть на основе опроса экспертов планируемые организационно-технические мероприятия обеспечат снижение среднего времени нахождения рабочего места в состоянии 17 с 43 до 5 мин. Реализация стратегии $S_1^{(2)}$ обеспечит повышение объема произведенной продукции на

$$\frac{31,2-22,6}{22,6} 100=38,05\%.$$

Задача 3. Какова эффективность стратегии $S_1^{(3)}$, предполагающей проведение перенастроек штампов в нерабочие смены? По стратегии $S_1^{(0)}$ такая перенастройка осуществляется в течение рабочей смены по мере возникновения дефицита на отдельные детали. В среднем за сутки на каждом рабочем месте происходит одна перенастройка [6], в процессе которой рабочее место последовательно находится в двух состояниях: 13 — «простой, связанный с ожиданием перенастройки штампа», 14 — «простой, связанный с проведением перенастройки штампа». Время пребывания в каждом из этих состояний — случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону. При реализации стратегии $S_1^{(3)}$ рабочие места на производственном участке на протяжении рабочих смен не будут переходить в состояния 13 и 14.

Пусть необходимо дать осторожную (пессимистическую) оценку стратегии $S_1^{(3)}$, т. е. без учета перспектив интенсификации ДПП, которые приводят к определенным изменениям в организационной среде цеха. Для этого предположим, что ДПП на рабочих местах протекает так же, как и при исходной стратегии $S_1^{(0)}$, только время пребывания рабочих мест в состояниях 13 и 14 равно нулю (имеется в виду, что если рабочие места и попадают в эти состояния при моделировании, то мгновенно выходят из них). Для получения оценки эффективности стратегии $S_1^{(3)}$ достаточно приравнять нулю $\lambda_{13}^{(1)}$ и $\lambda_{14}^{(1)}$ и, оставив неизменными остальные параметры цепи Маркова, провести моделирование.

Как видно из таблицы, реализация стратегии $S_1^{(3)}$ обеспечит повышение объема выпускаемой продукции на

$$\frac{27,6-22,6}{22,6} 100=22,1\%.$$

Задача 4. Каковы показатели стратегии $S_1^{(4)}$, определяемой суммой организационно-технических мероприятий, предусматриваемых стратегиями $S_1^{(2)}$ и $S_1^{(3)}$? Для решения параметры цепи Маркова модифициру-

ются так, как это принято в задачах 2 и 3. Стратегия $S_1^{(4)}$ приведет (см. таблицу) к росту объема произведенной продукции на

$$\frac{38,6-22,6}{22,6} 100=70,79\%.$$

Задача 5. Каковы показатели стратегии $S_1^{(5)}$, ведущей к ликвидации работы в одиночном режиме (состояние 2)? Приравняем нулю параметр функции распределения времени нахождения рабочего места в состоянии 2. Эффективность стратегии $S_1^{(5)}$ определяется (см. таблицу) величиной дополнительного прироста продукции на

$$\frac{23,7-22,6}{22,6} 100=4,8\%.$$

Задача 6. Найти показатели стратегии $S_1^{(6)}$, ликвидирующей простои из-за отсутствия заготовок (состояние 15). Этого можно достичь, например, установкой накопителей для заготовок. Для решения задачи $\lambda_{15}^{(1)}$ приравняем нулю. Стратегия $S_1^{(6)}$ обеспечит (см. таблицу) прирост объема произведенной продукции на

$$\frac{24,5-22,6}{22,6} 100=8,8\%.$$

Таким образом, без натурных экспериментов с учетом стохастичности организационной среды цеха с помощью 17 показателей охарактеризованы и оценены отдельные стратегии, предусматривающие внедрение в цехе ряда организационно-технических мероприятий. Точность показателей не ниже 5% гарантируется с вероятностью 0,954.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клиланд Д., Кинг В. Системный анализ и целевое управление. М.: Сов. радио, 1974.
2. Корольюк В. С., Турбин А. Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1976.
3. Тетерин Г. П., Полушин П. И. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1979.
4. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978.
5. Кофман А., Крюков Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения. М.: Мир, 1965.
6. Тетерин Г. П., Дацин Я. Е. Математическое моделирование работы прессового цеха.— Кузнечно-штамповочное производство, 1977, № 1.
7. Тетерин Г. П., Дацин Я. Е. Автоматизация проектирования расстановки рабочих в цехах с дискретным характером производства.— В кн. Автоматизация процессов проектирования. Вып. 3. Минск: Ин-т техн. кибернетики АН БССР, 1978.
8. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977.
9. Дацин Я. Е., Тетерин Г. П. Системное проектирование расстановки рабочих в прессовом цехе.— Кузнечно-штамповочное производство, 1978, № 5.
10. Дацин Я. Е., Тетерин Г. П. Автоматизация проектирования организационных структур штамповочного производства.— Механизация и автоматизация производства, 1978, № 9.
11. Дацин Я. Е., Тетерин Г. П. Автоматизированное проектирование организации штучного производства.— В кн. Вычислительная техника в машиностроении. Вып. 1. Минск: Ин-т техн. кибернетики АН БССР, 1979.
12. Теория прогнозирования и принятия решений. М.: Высшая школа, 1977.
13. Поляков Л. М. О принятии решения в условиях неопределенности и риска.— Изв. вузов. Энергетика, 1975, № 7.

Поступила в редакцию
31 V 1979