

УДК 51.330.115

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА КАЛЕНДАРНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

И.М.Зыбарев

Работа продолжает и использует обозначения [1], где предложена имитационная модель календарного планирования на машиностроительных предприятиях для случаев, когда численность рабочих на участке меньше числа единиц оборудования. Там же [1] описан ряд стратегий деятельности управляющего органа на участке, которые могут быть исследованы на предложенной имитационной модели. В данной статье проводится сравнение различных правил принятия решений с помощью экспериментов на условной информации. Эта информация по II участкам была получена в основном с помощью датчика случайных чисел, т.е. носит достаточно произвольный характер. Основные характеристики участков приводятся в табл. I. Отметим, что во всех случаях технологические маршруты обработки деталей разнонаправлены и каждая операция обрабатывается на одной единице оборудования. В поставленных экспериментах предусматривается строго партионная работа, т.е. считается, что участку задается номенклатура детали-партий (d, k) , $d = 1, 2, \dots, d^*$, $k = 1, 2, \dots, n_d$, и их размеры $Y_{d,k}$. Размеры детали-партий в процессе моделирования остаются неизменными. Режим поступления заготовок на участок детерминирован и задается перед началом моделирования.

Т а б л и ц а I

участок Параметр	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Количество:											
рабочих	4	4	5	5	6	6	7	7	8	6	8
станков	5	6	7	8	8	9	9	10	10	9	10
деталей	6	8	12	12	14	14	14	15	15	14	15
Общее количество операций	26	43	73	73	84	94	94	109	127	94	127
Количество деталей, имеющих операций:											
4	4	1			2	3	3			3	
5	2	3	3	3	3	2	2	3		2	
6		4	5	5	4			3			
7			4	4	3	3	3	3	4	3	4
8					2	3	3	1	4	3	4
9						3	3	3	3	3	3
10								2	4		4

В работе анализируются результаты экспериментов по применению различных правил $\mathcal{L} \in \mathcal{L}$ оценки приоритетности элементов производства в конфликтных производственных ситуациях $S(T) = \{J_o(T), J_o(T), R_o(T)\}$, где $J_o(T)$ - свободные от работы в момент T рабочие, $J_o(T)$ - незанятое оборудование, $R_o(T)$ - операции (d, k, τ) , претендующие на включение в план-график из числа очередных [1]. Рассматриваются отдельно случаи, когда движение детали-партии в процессе обработки

- а) последовательное;
- б) параллельное;

в) последовательное с процедурой уплотнения, т.е. переход с последовательного на параллельный вид движения осуществляется, если рабочий и станок к моменту назначения на обработку операции простаивают.

Обсуждаемые в работе эксперименты условно можно разделить на две серии. В первой серии экспериментов проводилась сравнительная оценка различных правил $\mathcal{L} \in \mathcal{L}$, которые описаны в § I с

точки зрения разных параметров, характеризующих производственную деятельность участка.

Во второй серии экспериментов исследовались вопросы комбинирования различных правил \mathcal{P}_z в процессе моделирования на основе случайного механизма с обучением и без него. На основе проведенных экспериментов сравниваются различные типы обучения, которые строятся по принципу предложенных в [1] схем, и оценивается возможность и целесообразность данного подхода в практических расчетах.

§ 1. Описание правил оценки приоритетности элементов производства

Было выделено 12 детерминированных правил оценки приоритетности элементов производства, наиболее часто используемых авторами [2 - 4] при изучении задач календарного планирования в терминах "операция-станок". Во всех правилах предусматривается (числовая) оценка $b_{d,k,z}$ операций $(d, k, z) \in R_0(T)$, претендующих на начало обработки. Если операция (d, k, z) может быть выполнена на нескольких различных станках, они считаются равнозначными. Аналогичное замечание относится и к рабочим. Эти ограничения объясняются только выбором набора правил для исследования. Заметим, что при разрешении конфликтов в модели предпочтение отдается операциям с меньшими величинами оценок. Этот факт учитывается при описании правил $\mathcal{P}_z = 1, 2, \dots, 12$.

$\mathcal{P}_1 = I$: правило наименьшей длительности операции, которое в работах по календарному планированию [2,3] обозначается SIO. Если две или более операций имеют одинаковые оценки длительности, то будем отдавать предпочтение той, у которой время обработки детали-партии до полного завершения больше. Вычисление оценки записывается следующим образом:

$$b_{d,k,z} = M \cdot t_z^H \cdot y_{d,k,z}^* - \sum_{i=z}^{z_d^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^* ,$$

где $y_{d,k,z}^* = 1 + (y_{d,k,z} - 1) \cdot (\delta_z - 1)$. Здесь, как и при описании модели [1], t_z^H - нормативное время реализации единичного акта операции z ; z_d^* - номер последней операции в технологии заказа d ; δ_z - признак операции, определяющий почтучный режим

обработки ($\delta_z = 0$) и партионный ($\delta_z = 1$). Число M является постоянным для всех операций и характеризует нормировочный коэффициент, который удовлетворяет условию:

$$M > \max_{d,k} \sum_{i=z_d}^{z_d^*} t_z^H \cdot y_{d,k}^*,$$

где z_d^* — первал операции в технологии заказа d .

$\mathcal{P}_z=2$: правило наибольшей длительности операции, при котором предпочтение отдается операции с наибольшим временем обработки. При совпадении оценок для двух или более операций конфликт разрешается аналогично тому, как и при правиле $\mathcal{P}_z=1$.

Оценка по данному правилу определяется выражением

$$b_{d,k,z} = - \left\{ M \cdot t_z^H \cdot y_{d,k,z}^* + \sum_{i=z}^{z_d^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^* \right\}.$$

$\mathcal{P}_z=3$: правило, при котором предпочтение отдается операции детали-партии с большим временем, оставшимся до конца обработки. При равенстве оценок для двух или более операций преимущество имеют те, у которых меньшая длительность (наибольший остаток цикла + наибольшая длительность операции). Оценка равна:

$$b_{d,k,z} = - M \cdot \sum_{i=z}^{z_d^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^* + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*.$$

$\mathcal{P}_z=4$: правило, при котором предпочтение отдается операции с меньшим временем, оставшимся до конца обработки + наименьшая длительность операции. Вычисление оценки по этому правилу производится в соответствии с выражением

$$b_{d,k,z} = M \cdot \sum_{i=z}^{z_d^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^* + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*.$$

$\mathcal{P}_z=5$: правило наибольшей длительности цикла обработки детали-партии + наименьшая длительность операции, для которого оценка определяется выражением

$$b_{d,k,z} = - M \cdot \sum_{i=z_d}^{z_d^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^* + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*.$$

$\mathcal{P}_z=6$: правило наименьшей длительности цикла обработки детали-партии + наименьшая длительность операции. Оценка равна

$$b_{d,k,z} = M \cdot \sum_{i=z_d}^{z_d^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^* + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*.$$

Как следует из вышеизложенного, в основе рассмотренных правил $\mathcal{K}_i=1, 2, \dots, 6$ лежит время обработки отдельных операций, группы или всего производственного цикла. В последующих двух правилах важное значение приобретает количество операций в технологии обработки детали-партии, а правила $\mathcal{K}_i=9, 10$ строятся на основе характеристики текущего состояния (d, k): $t_{d,k,z}^z$ - срока готовности (d, k) на очередной операции к началу обработки.

$\mathcal{K}_i=7$: правило наименьшего числа оставшихся невыполненными операций + наименьшая длительность операции, по которому вычисление оценки производится в соответствии с выражением

$$b_{d,k,z} = M \cdot (z_d^* - z + 1) + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*$$

$\mathcal{K}_i=8$: правило наибольшего числа оставшихся невыполненными операций детали-партии + наименьшая длительность операции, если операции имеют равные оценки. Величина оценки вычисляется так:

$$b_{d,k,z} = -M \cdot (z_d^* - z + 1) + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*$$

$\mathcal{K}_i=9$: правило "первым пришел - первым обслужен" + наименьшая длительность операции, значение оценки для которого определяется следующим образом:

$$b_{d,k,z} = M \cdot t_{d,k,z}^z + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*$$

$\mathcal{K}_i=10$: правило "последним пришел - первым обслужен" + наименьшая длительность операции, для которого величина оценки определяется выражением

$$b_{d,k,z} = -M \cdot t_{d,k,z}^z + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*$$

В качестве последних двух взяты правила, которые предложены В.А.Петровым [4] и являются обобщением известных правил Джонсона, дающих оптимальное решение для случая обработки деталей на двух станках. Чтобы записать выражения для вычисления оценок $b_{d,k,z}$ в соответствии с этими правилами, определим сначала параметры $\lambda_d, P_{d,1}, P_{d,2}$. Для задач с разнонаправленными маршрутами обработки эти параметры вводятся следующим образом. Рассмотрим состояние производства в момент $T > T_0$ (T_0 - начало моделирования); для этого состояния отмеченные парамет-

ры определяются выражениями

$$P_{d,1}(T) = \max\{T, t_{d,k,z}^e\} + t_z^H \cdot y_{d,k,z}^*,$$

$$P_{d,2}(T) = \sum_{i=z+1}^{z^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^*,$$

$$\lambda_d(T) = P_{d,2}(T) - P_{d,1}(T),$$

где (d, k, z) - очередная на выполнение операция z детали-партии (d, k) . Для начального состояния T_0 значения параметров $P_{d,1}(T_0)$ и $P_{d,2}(T_0)$ вычисляются следующим образом:

$$P_{d,1}(T_0) = \sum_{i=1}^m t_i^H \cdot y_{d,k,i}^*,$$

$$P_{d,2}(T_0) = \sum_{i=m^*}^{z^*} t_i^H \cdot y_{d,k,i}^*,$$

где для четного числа операций в технологии d значения $m = (z_d^* - z_d^* + 1)/2$ и $m^* = m + 1$, а для нечетного - $m = (z_d^* - z_d^* + 2)/2$ и $m^* = m$. Теперь, когда параметры λ_d , $P_{d,1}$ и $P_{d,2}$ определены, можно сформулировать последние два правила $\pi_i =$
= I1, I2.

$\pi_i =$ I1: оценка приоритетности операции по этому правилу вычисляется в соответствии с выражением

$$b_{d,k,z} = M \cdot [\max\{T, t_{d,k,z}^e\} - \lambda_d(T) + \\ + \Delta \cdot P_{d,1}(T) - (1-\Delta) \cdot (M - P_{d,2}(T))],$$

где

$$\Delta = \begin{cases} 0, & \text{если } \lambda_d(T) < 0, \\ 1, & \text{если } \lambda_d(T) \geq 0. \end{cases}$$

$\pi_i =$ I2: оценка $b_{d,k,z}$ по данному правилу вычисляется в соответствии с выражением

$$b_{d,k,z} = M \cdot [\Delta \cdot P_{d,1}(T) + (1-\Delta) \cdot P_{d,2}(T)] + \lambda_d(T),$$

здесь Δ определяется, как и в правиле $\pi_i =$ I1.

Ясно, что эти правила не исчерпывают всего их множества. Более полный перечень их можно найти, например, в [3]. Отметим,

что при необходимости этот набор правил в модели легко можно пополнить.

§ 2. Влияние правил оценки приоритетности на эффективность план-графика производства

Укажем прежде всего перечень параметров, которые наиболее часто используются в качестве критериев оптимальности в задачах календарного планирования:

1) $T(G)$ – общая длительность обработки заданной номенклатуры детали-партий;

2) $T_{M, \mu}$ – длительность наибольшего производственного цикла обработки детали-партии из заданной номенклатуры;

3) $T_{cp, \mu}$ – средняя длительность обработки детали-партий заданной номенклатуры;

4) $T_{пр, p}$ – суммарное время простоев рабочих $i \in \mathcal{J}$, где простои рабочего i берутся на интервале $[0, T^i]$, а T^i – время завершения выполнения последней из закрепленных за ним работ. Аналогичным образом определяется параметр $T_{пр, об}$, характеризующий простои оборудования.

Эксперименты проводились с каждым из 12 правил для каждого из трех видов движения (последовательного, последовательно с уплотнением, параллельного) на основе информации по одиннадцати участкам. Для каждого эксперимента фиксировались значения параметров $T(G)$, $T_{M, \mu}$, $T_{cp, \mu}$, $T_{пр, p}$ и $T_{пр, об}$. Значения параметра $T(G)$ в экспериментах с каждым из видов движения приводятся в табл. 2–4. Аналогичные результаты получены и по остальным параметрам, но из-за их большого объема в работе не приводятся.

Чтобы сравнить правила $\mathcal{K}_2=1, 2, \dots, 12$ по отношению к вышеопределенным параметрам, полученные результаты экспериментов по каждому участку были пронормированы, так как при сравнении для нас важны не абсолютные значения параметров, а их соотношения. Нормирование осуществлялось следующим образом:

$$\bar{x}^{\mathcal{K}_2, n} = x^{\mathcal{K}_2, n} / \sum_{i=1}^{12} x^{i, n},$$

где $x^{\mathcal{K}_2, n}$ – параметры $T^{\mathcal{K}_2, n}(G)$, $T_{M, \mu}^{\mathcal{K}_2, n}$, $T_{cp, \mu}^{\mathcal{K}_2, n}$, $T_{пр, p}^{\mathcal{K}_2, n}$ или $T_{пр, об}^{\mathcal{K}_2, n}$, а $\bar{x}^{\mathcal{K}_2, n}$ – соответствующая им пронормированная оценка,

Таблица 2

Участок Правильно	Участок											
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	
I	12,3	155,0	170,8	200,8	196,2	99,2	86,7	145,8	165,0	99,2	190,8	
2	12,0	149,2	163,3	203,3	164,2	109,2	98,3	177,5	153,3	105,3	175,8	
3	9,8	143,3	165,8	193,3	159,2	95,0	84,2	130,0	161,7	93,3	175,0	
4	12,0	169,2	166,7	203,3	174,2	115,8	102,5	171,7	190,8	102,5	182,5	
5	10,3	132,5	147,5	178,3	145,0	88,9	75,0	134,2	135,8	89,2	157,5	
6	12,0	174,2	174,2	220,8	193,3	98,3	106,7	178,3	186,7	103,3	199,2	
7	10,5	144,2	171,7	216,7	186,7	107,5	97,5	163,3	185,0	126,7	215,0	
8	10,7	130,8	147,5	180,0	150,0	88,3	73,3	128,3	135,0	91,7	154,2	
9	9,8	139,2	158,3	195,0	159,2	103,3	96,7	146,7	167,5	104,2	171,7	
10	10,5	139,2	155,8	195,0	175,8	95,0	105,8	160,8	190,0	105,8	232,5	
II	9,8	133,3	152,5	186,7	147,5	88,3	74,2	125,8	132,5	96,7	157,5	
12	9,8	130,8	141,7	180,8	139,2	89,2	75,8	133,3	132,5	87,5	164,2	

Таблица 4

Участок Древляно	Участок											
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	
I	9,7	122,0	141,3	183,2	133,5	81,7	80,5	138,2	142,7	88,5	152,0	
2	10,0	132,7	139,3	179,3	159,3	90,2	85,0	155,0	136,5	89,9	178,8	
3	9,0	132,3	151,5	180,3	158,8	85,5	72,7	137,3	143,3	92,0	153,3	
4	10,5	135,8	142,5	192,8	160,8	86,7	83,7	148,2	141,8	97,0	166,0	
5	9,5	122,5	137,8	178,3	143,0	86,3	75,0	121,7	127,8	91,0	157,5	
6	10,5	128,7	146,7	185,2	183,3	82,8	87,8	149,7	162,7	89,7	173,2	
7	9,7	137,5	148,2	183,2	171,5	84,8	86,2	145,8	148,5	85,5	187,5	
8	9,3	132,5	142,2	179,5	137,7	82,8	74,2	121,7	128,5	89,2	158,3	
9	10,0	134,5	154,7	179,5	142,2	88,0	82,7	136,7	149,5	92,8	155,5	
10	11,3	124,2	138,8	188,7	140,7	86,0	87,2	151,3	147,7	88,8	164,8	
II	9,3	130,8	138,3	181,8	137,7	79,7	75,8	123,3	125,8	88,5	164,3	
12	9,3	123,3	150,8	182,7	136,0	80,2	75,0	121,2	129,5	86,7	164,2	

Таблица 4

Узесток Драйло	Узесток											
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	
I	9,7	122,0	141,3	183,2	133,5	81,7	80,5	138,2	142,7	88,5	152,0	
2	10,0	132,7	139,3	179,3	159,3	90,2	85,0	155,0	136,5	89,9	178,8	
3	9,0	132,3	151,5	180,3	158,8	85,5	72,7	137,3	143,3	92,0	153,3	
4	10,5	135,8	142,5	192,8	160,8	86,7	83,7	148,2	141,8	97,0	166,0	
5	9,5	122,5	137,8	178,3	143,0	86,3	75,0	121,7	127,8	91,0	157,5	
6	10,5	128,7	146,7	185,2	183,3	82,8	87,8	149,7	162,7	89,7	173,2	
7	9,7	137,5	148,2	183,2	171,5	84,8	86,2	145,8	148,5	85,5	187,5	
8	9,3	132,5	142,2	179,5	137,7	82,8	74,2	121,7	128,5	89,2	158,3	
9	10,0	134,5	154,7	179,5	142,2	88,0	82,7	136,7	149,5	92,8	155,5	
10	11,3	124,2	138,8	188,7	140,7	86,0	87,2	151,3	147,7	88,8	164,8	
II	9,3	130,8	138,3	181,8	137,7	79,7	75,8	123,3	125,8	88,5	164,3	
12	9,3	123,3	150,8	182,7	136,0	80,2	75,0	121,2	129,5	86,7	164,2	

Т а б л и ц а 5

Правило	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вариант*	Общая длительность графика											
1	0,946	0,964	0,881	1,009	0,819	1,013	1,028	0,819	0,914	0,977	0,822	0,810
2	0,913	0,952	0,894	0,769	0,866	0,967	0,977	0,867	0,910	0,928	0,877	0,878
3	0,891	0,946	0,910	0,955	0,876	0,956	0,974	0,876	0,930	0,940	0,873	0,874
	Время простоев рабочих											
1	0,926	1,138	0,794	1,275	0,603	1,361	1,283	0,533	0,886	1,133	0,537	0,532
2	0,951	1,227	0,791	1,217	0,643	1,237	1,263	0,579	0,935	1,025	0,549	0,583
3	0,759	1,186	0,982	1,255	0,589	1,310	1,407	0,508	1,033	1,064	0,469	0,437
	Время простоев оборудования											
1	0,905	1,022	0,881	1,097	0,759	1,112	1,131	0,715	0,893	1,046	0,719	0,710
2	0,887	1,053	0,912	1,058	0,775	1,049	1,100	0,741	0,899	1,006	0,757	0,764
3	0,849	1,058	0,922	1,046	0,771	1,092	1,138	0,719	0,930	1,023	0,724	0,710
	Длительность максимального цикла обработки деталей-партий											
1	0,941	0,958	0,885	0,924	0,878	0,917	0,888	0,889	0,988	0,953	0,897	0,881
2	0,907	0,936	0,880	0,893	0,918	0,869	0,880	0,924	0,983	0,905	0,957	0,947
3	0,923	0,954	0,857	0,886	0,930	0,817	0,866	0,947	0,912	0,898	0,956	0,958
	Средняя длительность цикла обработки деталей-партий											
1	0,872	0,925	0,941	0,775	1,031	0,758	0,754	1,016	1,030	0,849	1,019	1,025
2	0,871	0,890	0,936	0,764	1,051	0,758	0,747	1,041	1,055	0,820	1,048	1,067
3	0,872	0,922	0,823	0,707	1,1130	0,643	0,674	1,122	1,160	0,720	1,107	1,137

*) Варианты видов движения: 1-последовательный, 2-последовательный с уплотнением, 3-параллельный.

Таблица 6

Участок Вариант	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
	Общая длительность графика										
I	9,8	130,8	141,7	178,3	139,2	88,3	73,3	125,8	132,5	87,5	154,2
2	8,2	122,7	139,2	177,5	138,3	82,5	72,5	121,7	126,7	89,2	151,0
3	9,0	122,0	137,8	179,3	133,5	79,7	72,7	121,2	125,8	85,5	152,0
	Время простоев рабочих										
I	8,8	20,8	46,7	120,0	62,5	40,8	65,0	86,7	92,5	67,5	227,5
2	5,2	13,3	25,8	103,5	47,5	19,2	55,0	50,8	55,0	57,5	181,2
3	9,0	18,7	16,8	80,7	47,0	14,7	49,5	49,2	33,5	30,8	187,3
	Время простоев оборудования										
I	15,7	219,2	260,8	560,8	290,8	260,8	196,7	404,2	324,2	285,0	470,0
2	11,7	199,3	242,5	533,5	274,2	235,8	182,5	335,0	265,8	260,0	418,7
3	12,5	194,7	226,8	536,7	258,8	209,5	162,3	343,5	237,2	243,0	431,3
	Длительность максимального цикла обработки детали-партий										
I	7,0	93,3	103,3	136,7	130,0	78,3	71,7	123,3	132,5	76,7	149,2
2	6,0	89,2	103,3	134,2	125,0	65,8	69,2	113,3	121,7	70,8	134,3
3	6,3	66,2	83,5	80,3	85,2	50,0	68,3	100,7	120,7	67,8	133,3
	Средняя длительность цикла обработки детали-партий										
I	4,9	73,0	75,4	83,2	79,0	46,4	45,9	71,6	97,2	48,2	103,4
2	4,3	66,8	67,9	82,2	71,6	40,6	39,0	63,7	84,1	43,1	91,5
3	4,4	51,2	54,4	52,6	54,4	29,0	32,4	49,8	64,8	32,0	77,5

* См. сноску к табл. 5.

В предположении равноправности участков в экспериментах общая оценка \bar{x}^{K_i} для правила $K_i=1,2,\dots,12$ подсчитывается по формуле

$$\bar{x}^{K_i} = \sum_{n=1}^{11} \bar{x}^{K_i, n}$$

Сравнение оценок \bar{x}^{K_i} для $K_i=1,2,\dots,12$ показывает, какое правило дает более эффективное решение по отношению к данному параметру $x: T(G), T_{m, \mu}$ и т.д. Обработанные таким образом результаты экспериментов приводятся в табл. 5. Правило считается лучшим, если его оценка \bar{x}^{K_i} меньше по значению.

Перейдем к качественному анализу результатов экспериментов. С этой целью разобьем множество правил $K_i=1,2,\dots,12$ по результатам экспериментов относительно каждого из параметров на три группы. В первую группу войдут те правила, которые показали четыре лучших результата. Во вторую группу включаются правила, получившие следующие четыре по величине оценки, т.е. занявшие с 5 по 8 места. Оставшиеся правила образуют третью группу. Другими словами, правила, которые дают хорошие решения относительно данного параметра, войдут в первую группу, удовлетворительные решения - во вторую и плохие - в третью.

Анализ данных табл. 5 показывает, что для параметров $T(G)$, $T_{np, p}$ и $T_{np, ob}$ эффективными являются одни и те же правила. Следовательно, можно сделать вывод о существенной зависимости между данными тремя параметрами.

В результате относительно параметров $T(G)$, $T_{np, p}$ и $T_{np, ob}$ правила разбились на группы так:

- 1) первая группа правил для всех видов движения деталей-партий включает $K_i=5, 8, 11, 12$;
- 2) для последовательного вида движения во вторую группу вошли правила $K_i=1, 2, 3, 9$; в оставшихся двух вариантах: $K_i=1, 3, 9, 10$;
- 3) третья группа для последовательного вида движения состоит из $K_i=4, 6, 7, 10$, для двух других - из $K_i=2, 4, 6, 7$.

По отношению к параметру $T_{m, \mu}$ разбиение правил на группы оказалось следующим:

- 1) первая группа определяется такими подмножествами правил: $\langle 3, 5, 7, 12 \rangle$ - для последовательного вида движения; для последовательного вида движения с уплотнением и параллельного -

$\langle 3,4,6,7 \rangle$;

2) вторая группа состоит из правил $\langle 4,6,8,II \rangle$, $\langle 1,5,8,IO \rangle$ и $\langle 1,5,9,IO \rangle$ соответственно видам движения детали-партий;

3) для третьей группы подмножества правил соответственно видам движения определены так: $\langle 1,2,9,IO \rangle$, $\langle 2,9,II,IO \rangle$ и $\langle 2,8,II,IO \rangle$.

Влияние правил на среднюю продолжительность производственных циклов обработки детали-партий для всех видов движения более однообразно и дает противоположное разбиение по сравнению с разбиением относительно параметров $T(G)$, $T_{np,p}$ и $T_{np,об}$. Здесь для обоих вариантов последовательного вида движения подмножества правил $\langle 4,6,7,IO \rangle$, $\langle 1,2,3,8 \rangle$ и $\langle 5,9,II,IO \rangle$ определяют соответственно первую, вторую и третью группы. В случае параллельного вида движения разбиения отличаются перестановкой правил $\mathcal{K}_2=8$ и $\mathcal{K}_2=II$.

Таким образом, из данной классификации правил относительно исследуемых параметров можно сделать следующие выводы. Во-первых, стремление к минимизации общей длительности план-графика обработки заданной номенклатуры детали-партий ведет к увеличению их средней продолжительности, что в свою очередь влечет за собой рост незавершенного производства на участке. Этот вывод подтверждает правильность сомнений В.Головинского, высказанных в приложении к книге [5] , относительно взаимоотношения критерия Джонсона ($\min T(G)$) с показателями, характеризующими эффективность производства, и целесообразности его использования в реальной практике. Во-вторых, наиболее часто встречаемое в литературе и нередко используемое на практике правило наименьшей длительности операции для нашего класса задач дало удовлетворительные результаты в отношении всех исследуемых параметров. Очевидно, именно этим свойством: давать одинаково хорошие (одинаково плохие) оценки план-графиков производства по всем параметрам, можно объяснить его популярность. Аналогичными свойствами обладает правило $\mathcal{K}_2=3$, а также близко к нему находится и правило $\mathcal{K}_2=8$.

Сравним средние значения параметров и значения лучших экспериментов для каждой из групп правил. Анализ средних оценок правил относительно параметра $T(G)$ дает следующие результаты: улучшение решения с правилами первой группы по отношению ко

второй составляет 4-12%, а по отношению к третьей - 10-20%. Использование правил первой группы по отношению ко второй дает снижение простоев рабочих на 36-40%, а по отношению к третьей - около 70%. Для параметра $T_{m,ц}$ оценки для различных групп правил различаются соответственно на 3 и 8%. Средние оценки групп правил для параметра $T_{ср,ц}$ для каждого из видов движения существенно отличаются. Так, при последовательном виде движения детали-партий разница между результатами использования правил первой и второй группы составляет 16%, а между первой и третьей - 26%. Для последовательного вида движения с уплотнением и параллельного эти различия составляют: 28 и 31%, 27 и 48% соответственно.

Сравнение лучших оценок правил каждой из трех групп показывает, что их различие существенно зависит от вида движения детали-партий. Так, для параметра $T(G)$ при последовательном виде движения разница между лучшей оценкой первой группы правил и второй составляет 8%, а первой и третьей - 23%. Эти отличия для параллельного и последовательного вида движения с уплотнением составляют соответственно 2 и 8%, 3 и 10%. Различия лучших оценок для правил первой и второй групп относительно $T_{пр,р}$ составляют: а) 28% - для последовательного вида движения, б) 29% - для параллельного, в) 26% - для последовательного с уплотнением. Аналогичные различия между оценками для первой и третьей групп правил соответственно составляют: а) 66%, б) 68% и в) 73%. Для параметра $T_{m,ц}$ эти различия незначительны и во всех видах движения составляют 2-4% и 7-9% соответственно.

Разница в лучших оценках для правил трех групп по отношению к средней длительности циклов обработки детали-партий $T'_{ср,ц}$, как и для средних оценок, зависит от вида движения. При последовательном виде движения разница - 13 и 29%, для параллельного - 20 и 51%, последовательного с уплотнением - 14 и 33%.

Подводя итоги проведенного анализа правил $\mathcal{R}_i = 1, 2, \dots, 12$, можно сделать вывод, что использование различных правил дает существенные различия в значениях оценочных параметров. Кроме того, заметно влияние видов движения детали-партий на характеристики производства. В связи с этим проанализируем более под-

робно, каким образом соотносятся результаты экспериментов при различных видах движения детали-партий.

Приведенные в табл. 2-4 значения параметра $T(G)$ говорят о том, что применение процедуры уплотнения план-графика за счет перехода с последовательного на параллельный вид движения в случаях ожидания рабочим и станком очередной операции дает улучшение практически во всех экспериментах. Более качественные план-графики с точки зрения параметра $T(G)$ получены в 83% экспериментов, в то время как число экспериментов с худшими результатами составило 9,8%. Причем нужно отметить, что ухудшение не превышает 2%. Аналогичный факт отмечается и относительно параллельного вида движения. Здесь улучшение значения параметра $T(G)$ произошло в 90% экспериментов, а худшие результаты получены в 7% экспериментов. Если сравнивать результаты экспериментов с параллельным видом движения и последовательным с процедурой уплотнения, то можно отметить незначительное преимущество варианта с параллельным видом движения. Анализ результатов экспериментов для остальных параметров, выделенных для исследования, дает аналогичные выводы.

В табл. 6 приводятся лучшие значения исследуемых параметров для каждого из участков, полученные на всем множестве правил $\mathcal{X}_2=1,2,\dots,12$ с каждым из видов движения. Анализ данных этой таблицы показывает, что применение процедуры уплотнения при последовательном виде движения позволяет улучшить результат в отношении параметра $T(G)$ в среднем на 3-4%, $T_{np,p} - 30\%$, $T_{m,u} - 8\%$, $T_{cp,u} - 8,5\%$.

В экспериментах с параллельным видом движения по отношению к последовательному качество план-графиков в смысле параметра $T(G)$ возрастает на 4,2%, $T_{np,p} - 36\%$, $T_{m,u} - 20\%$, $T_{cp,u} - 30\%$. Из чего следует, что наиболее эффективным с точки зрения исследуемых параметров является вариант с параллельным видом движения, несколько уступает ему последовательный вид с процедурой уплотнения. Здесь необходимо заметить, что использование параллельного вида движения детали-партий предусматривает высокую степень организации производства на участке. Этот фактор необходим, так как при данном варианте возрастает степень зависимости между работой отдельных рабочих и станков.

§ 3. Комбинирование правил оценки приоритетности элементов производства в процессе календарного планирования

В предыдущем параграфе анализировались результаты экспериментов, в которых на протяжении всего периода моделирования план-графика используется одно правило, выбранное из исследуемого набора \mathcal{K} . Возникает вопрос: к каким результатам приведет применение различных правил в процессе моделирования одного план-графика? Данный подход для задач календарного планирования, в которых объект управления описывается на уровне "операций" и "станков", рассматривался в работах [2, с.260-291; 6]. В [1] нами было показано, как реализуются экспериментальные исследования на имитационной модели комбинирования различных правил на базе случайного механизма выбора для более широкого класса задач. Там же были рассмотрены принципиальные схемы механизмов обучения на основе случайного выбора, в соответствии с которыми разработано три типа обучения и проведены эксперименты.

Прежде чем перейти к анализу экспериментов, конкретизируем типы обучения. Обучение первого типа реализовано на основе первой схемы, где вероятность ρ_i^e выбора правила $\pi_i \in \mathcal{K}$ в ситуации $S(T_e)$ не зависит от того, какое правило было использовано в предшествующий момент T_{e-1} . В основе второго типа обучения лежит вторая схема, где для каждого момента $T_e \in \langle T_0, T_1, \dots, T_N \rangle$ определена матрица $P^e = (\rho_{i,j}^e)$, в которой $\rho_{i,j}^e$ задает вероятность выбора правила π_j в момент T_e при условии применения правила π_i в ситуации $S(T_{e-1})$. Во всех экспериментах качество план-графиков оценивается по значению параметра $T(G)$, который и является параметром обучения. При проведении экспериментов выбор параметра $T(G)$ принципиально-го характера не носит. Переоценка вероятностей выбора правил производилась по результатам очередной реализации эксперимента на основе двух эталонов (лучших значений параметров): а) начально заданного эталона $T(G^0)$ и б) текущего эталона $T(G^e)$. В качестве G^0 брался план-график с лучшим значением

$T(G)$, выбранным из экспериментов с выделенными правилами $\mathcal{X}_i \in \mathcal{X}$. Текущий эталон G_k^{β} является лучшим из план-графиков, которые получены за предшествующие $(k-1)$ реализации эксперимента. При получении худшего, чем у эталона G^{β} , результата вероятности выбора правил \mathcal{X}_i в ситуациях $S(T_e)$ уменьшаются на величину $\alpha \cdot \rho_i^e$ (или $\alpha \cdot \rho_{j,i}^e$ для второго типа обучения), где $\alpha = \text{const} \in (0, 1)$. Если $T(G^{\beta}) \geq T(G_k) \geq T(G_k^{\beta})$, то вероятности увеличиваются на эту же величину $\alpha \cdot \rho_i^e$ ($\alpha \cdot \rho_{j,i}^e$). Для $T(G_k) < T(G_k^{\beta})$ вероятности дополнительно увеличиваются на величину $\alpha_0 \cdot \rho_i^e$ ($\alpha_0 \cdot \rho_{j,i}^e$), которая является "поощрением" за улучшение текущего эталона G_k^{β} , $G_{k+1}^{\beta} = G_k$.

Процесс обучения третьего типа аналогичен второму с тем отличием, что для оценки k -й реализации эксперимента используется только текущий эталон G_k^{β} . Переоценка вероятностей выбора правил осуществляется следующим образом: $\rho_{j,i}^e = (1 + \beta) \cdot \rho_{j,i}^e$, где $\beta = (T(G_k^{\beta}) - T(G_k)) / T(G_k^{\beta})$. Более подробно данные алгоритмы обучения описаны в [1].

Эксперименты проводились на подмножестве из четырех правил $\mathcal{X} = \{1, 2, 3, 5\}$ для участка 2 с последовательным видом движения детали-партий. Для параметра $T(G)$ в экспериментах с фиксированной стратегией (§ 2) правила $\mathcal{X} = \{1, 2\}$ показали для данного участка неудовлетворительные результаты, $\mathcal{X} = \{3\}$ - средние, $\mathcal{X} = \{5\}$ - хорошие (см. табл. 2). В качестве эталона G^{β} во всех экспериментах использовался план-график, который получен для $\mathcal{X} = \{5\}$ со значением $T(G_k^{\beta}) = 132,5$. Было проведено две серии экспериментов. В первой серии оценивались и сравнивались между собой математические ожидания $MT^m(G)$ лучших решений в двадцати реализациях эксперимента.

Для удобства обозначим через $T_k^{m,n}(G)$ длительность план-графика, который получен в k -й реализации n -го эксперимента m -го типа обучения ($m=0$ при равновероятном выборе правил). Под отдельным экспериментом здесь понимается двадцатикратное моделирование план-графика. Тогда лучшее решение определяется через $T_k^{m,n}(G) = \min_k T_k^{m,n}(G)$, а средняя величина длительности план-графика m -го типа обучения ($m=0, 1, 2,$

3) в N экспериментах равна:

$$\bar{T}^m(G) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N T^{m,n}(G).$$

Число независимых экспериментов N , которое с вероятностью $\rho = (1 - \alpha)$ гарантирует попадание значения $MT^m(G)$ в доверительный интервал $(\bar{T}^m(G) \pm \mathcal{L}_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}})$, определяется [7] из выражения

$$N = \frac{\mathcal{L}_{\alpha/2} \cdot \sigma^2}{d^2}.$$

Здесь σ^2 - стандартное отклонение величины $T(G)$, d - длина доверительного интервала и $\mathcal{L}_{\alpha/2}$ - процентиль нормального распределения.

Для каждого типа обучения $m=0,1,2,3$ проводилось по сотне экспериментов, в результате которых были получены следующие значения параметров: $\bar{T}^0(G)=125,4$; $\bar{T}^1(G)=125,9$; $\bar{T}^2(G)=125,8$ и $\bar{T}^3(G)=125,4$. Разброс значений $T^{m,n}(G)$ в экспериментах $m=0,1,2,3$ характеризуется следующими значениями: $\sigma_0^2=6,4$; $\sigma_1^2=4,3$; $\sigma_2^2=5,6$ и $\sigma_3^2=6,3$, которые позволяют характеризовать с вероятностью $\rho=0,95$ попадание $MT^m(G)$ в доверительный интервал $(\bar{T}^m(G) \pm 0,8)$, т.е. $d=0,8$.

Данный факт говорит о том, что для малого числа реализаций процессы обучения практически не сказываются. Однако можно отметить, что вероятность улучшения параметров план-графика при комбинировании различных правил принятия решений достаточно велика даже в двадцати реализациях. Вместе с тем, ожидаемое улучшение по сравнению с самым хорошим из результатов для каждого из правил в отдельности составляет незначительную долю и равняется 5-6 %. Заметим, что переход на параллельный вид движения детали-партий дает приблизительно такой же результат (см. табл. 2).

Для более детального анализа процессов обучения была проведена вторая серия экспериментов. Число реализаций в каждом эксперименте было увеличено до 150. Во всех четырех экспериментах, т.е. с равновероятным выбором и тремя типами обучения, начальные условия выбирались равными. Результаты экспериментов для равновероятного выбора правил без обучения представлены в виде графика на рис. 1, а для обучения первого, второго и третьего типов - на рис. 2,3,4 соответственно. Для сравнительного

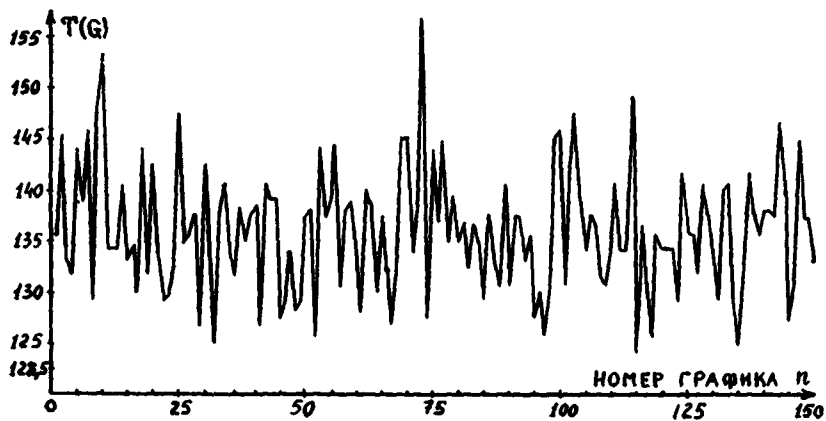


Рис. 1

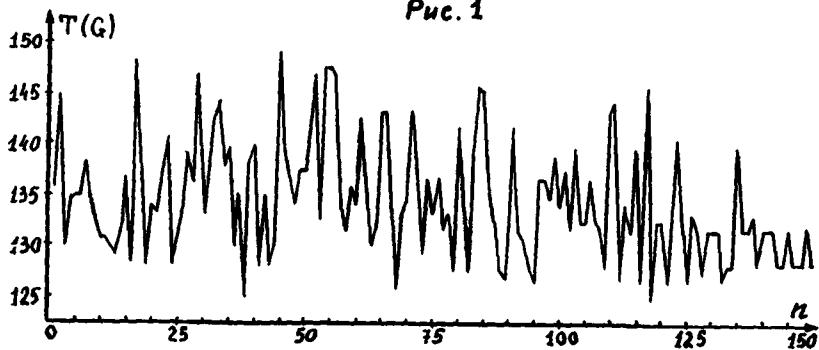


Рис. 2

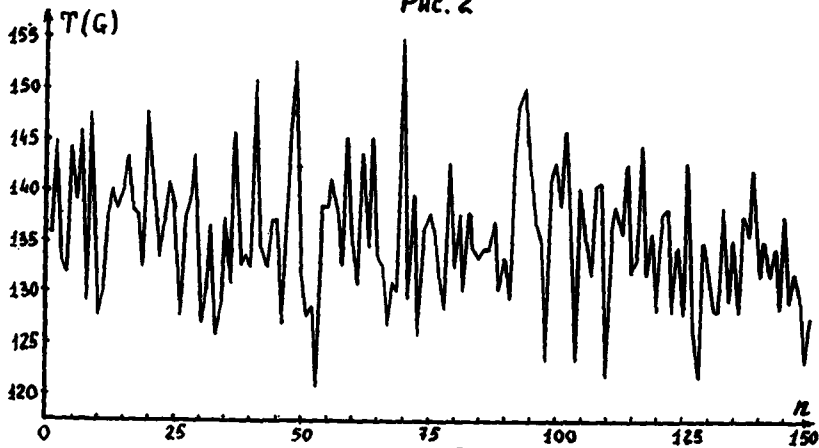


Рис. 3

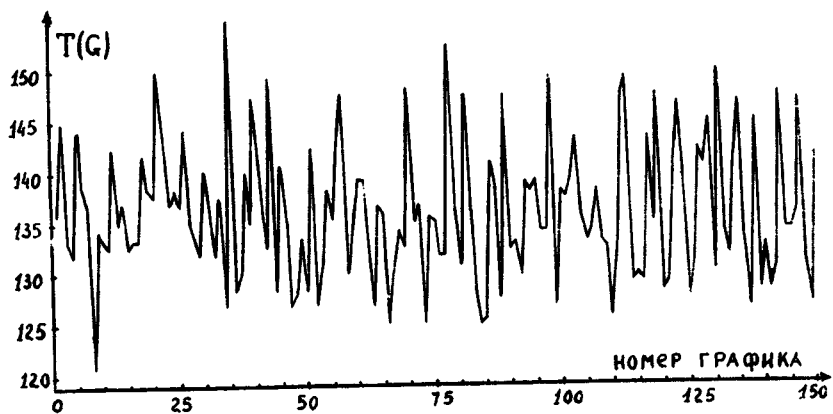


Рис. 4

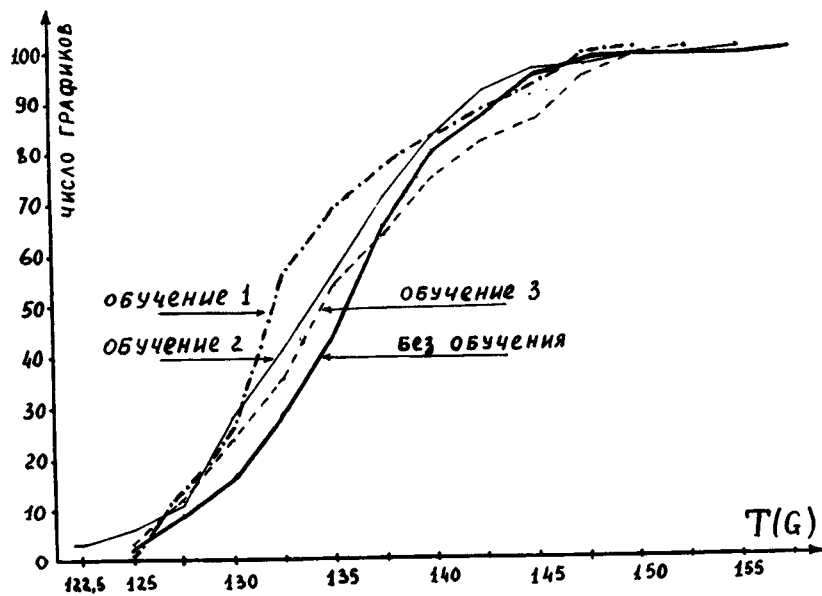


Рис. 5

анализа результатов экспериментов на рис. 5 представлены графики, которые характеризуют количество вариантов план-графиков, полученных в каждом из экспериментов, со значениями параметра $T(G) \leq T^*$ для последних 100 реализаций.

Анализ результатов экспериментов показывает, что комбинация правил позволяют получать план-графики с лучшими значениями $T(G)$, чем отдельно для каждого из правил. Разница между лучшим значением $T(G)$ для экспериментов с комбинированием правил по сравнению с лучшим из решений для правил в отдельности составляет от 5 до 8%. Причем для равновероятного выбора правил без обучения в 41 случае из 150 получены лучшие решения, чем у эталона G^* . Вместе с тем можно отметить, что только в одном случае получен план-график со значением $T(G) > 155$, где $T(G) = 155$ - значение оценки для худшего варианта с правилами $\mathcal{K}_i = 1, 2, 3, 5$ для $\mathcal{K}_i = 1$. В этом эксперименте большая часть результатов лежит в интервале $(132,5; 143,3)$ и составляет 59%, где $T(G) = 143,3$ - оценка план-графика, которая получена для правила $\mathcal{K}_i = 3$ и является второй по величине среди оценок исследуемых правил.

При сравнении экспериментов с обучением и равновероятным выбором правил получаем, что обучения первого и второго типов имеют значительные преимущества, а третий тип мало чем отличается от него. Так, для эксперимента с первым типом обучения не получено ни одного графика со значением параметра $T(G) > 149,2$ и всего в 17 реализациях с $T(G) > 143,3$. Лучшие значения $T(G)$, чем у эталона, т.е. $T(G) \leq 132,5$, получены для 41% реализаций. Результаты эксперимента со вторым типом обучения, которые изображены на рис. 3, говорят о более медленном, по сравнению с первым типом, процессе обучения. Однако если обратить внимание на реализации эксперимента с номерами более 100-го, то отмечается более целенаправленное обучение. Число реализаций эксперимента со значением $T(G) < 132,5$ составляет 33,3%, а большая часть реализаций ($\approx 51\%$) характеризуется значениями параметра $T(G)$ из интервала $[132,5; 142,5)$.

Анализ значений параметра $T(G)$ в реализациях эксперимента с номерами от 1 до 50, от 51 до 100 и от 101 до 150 показывает следующее. Для равновероятного выбора правил число реализаций со значениями $T(G) < 132,5$ для указанных трех интервалов номеров соответственно равно 14, 14 и 13. Для обучения

первого и второго типов эти характеристики составляют соответственно: а) 15, 14 и 32 реализации: б) 12, 15 и 23. Для третьего типа обучения данные параметры, как и указывалось выше, мало отличаются от равновероятного выбора и равны соответственно 11, 16 и 16 реализациям. Таким образом, можно сделать вывод о заметном влиянии процессов обучения на результаты экспериментов для первых двух типов уже во второй полусотне реализаций. Наглядно данные вывода можно проследить на рис. 5, где изображены графики экспериментов в последних 100 реализациях.

Результаты анализа второй серии экспериментов подтверждают выводы первой серии и показывают, что хотя обучение на базе случайного механизма возможно, скорость его невелика. При практических расчетах этот фактор играет большую роль. Вместе с тем проведенные эксперименты показывают, что комбинирование хорошего правила даже с правилами, дающими невысокие результаты, приводят к улучшению качества план-графика.

Подводя общие итоги экспериментов, можно сделать вывод о целесообразности и необходимости более глубокого изучения детерминированных правил принятия решений в процессах календарного планирования, так как гарантия получения достаточно хороших результатов при их использовании возрастает при сравнительно невысоких затратах. Методы комбинирования правил в процессе моделирования на основе случайного механизма выбора как с обучением, так и без него представляют в большей степени интерес с методологических позиций. Данный подход целесообразнее использовать при исследовании и подборе правил для вновь выделяемых классов задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. ЗЫБАРЗВ Ю.М. Имитационная модель для решения задач календарного планирования машиностроительного производства. - Настоящий сб., с. 5-35.
2. ТАНАЕВ В.С., ШКУРБА В.В. Введение в теорию расписаний. М., "Наука", 1975.
3. КОНВЕЙ Р.В., МАКСВЕЛЛ В.Л., МИЛЛЕР Л.В. Теория расписаний. М., "Наука", 1975.
4. ПЕТРОВ В.А. Групповое производство и автоматизированное опе-

- ративное управление. Л., "Машиностроение", 1975.
5. Календарное планирование. М., "Прогресс", 1966.
6. АРОНОВИЧ А.Б. О выборе оптимальных комбинаций локальных правил календарного планирования. - "Экономика и мат. методы", 1970, № 4, с. 548-558.
7. НЕЙЛОР Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М., "Мир", 1975.

Поступила в ред.-изд. отд.
23.XI.1977 г.