

МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Г. Ш. КАПЛАН

(Ленинград)

Как правило, производственные системы включают в себя целый ряд однотипных производственных элементов, количество которых принимает дискретные числовые значения m (1, 2, ..., m), определяемые технологическим процессом производства. Поскольку надежность функционирования в процессе труда любого производственного элемента не может превышать единицы ($p < 1$), возникает ситуация, когда функционирование данных элементов не в состоянии обеспечить требуемую в соответствии с технологией эффективность производства. Происходит снижение эффективности или производительности производственной системы против технологического расчета.

Одним из основных методов, позволяющих избежать отрицательных последствий этого процесса, является резервирование производственных

* Под производственной системой понимается любая система, в которой осуществляется процесс труда и производится какой-либо продукт труда. Материальные элементы (средства труда, предмет труда) и сами люди (рабочие, инженеры и т. д.) являются обязательными производственными элементами таких систем. В качестве производственных систем выступают отдельные рабочие места, производственные участки, поточные линии, цехи, заводы и т. п.

Каждый из производственных элементов характеризуется критериями надежности функционирования в процессе труда. Одним из основных критериев является вероятность беспростойного (безотказного) функционирования производственного элемента в течение времени наблюдения за ним p . Она определяется статистически как отношение времени работы производственного элемента к общему наблюдаемому номинальному фонду рабочего времени, включающему все простои. Вероятность же беспростойного функционирования в процессе труда производственной системы определяется произведением вероятностей беспростойного функционирования в процессе труда ее основных производственных элементов, или (укрупненно) произведением вероятности беспростойного функционирования в процессе труда материальных элементов производственной системы на вероятность беспростойной работы рабочих, обслуживающих производственную систему:

$$P_{\text{пр. системы}} = P_{\text{матер.эл.}} \cdot P_{\text{рабочих.}}$$

Получаемая вероятность является основным критерием надежности функционирования производственной системы в процессе труда.

Производительность производственной системы, достигаемая рабочими при условии абсолютной надежности функционирования производственных элементов в процессе труда ($p = 1$), называется дифференциальной (теоретической) производительностью производственной системы.

Реальная же производительность производственной системы, достигаемая рабочими с учетом снижения надежности функционирования производственных элементов в процессе труда, называется интегральной производительностью производственной системы.

Если обозначить интегральную производительность через Q' , а дифференциальную производительность через Q'' , то:

$$Q' = Q'' \cdot P_{\text{пр. системы.}}$$

элементов. Оно состоит в том, что вместо m элементов, требуемых по технологии производства, мы обеспечиваем одновременное или же с замещением функционирование n производственных элементов, где разница $(n - m)$ есть излишнее количество элементов, гарантирующее нам возмещение потерь эффективности или производительности производственной системы.

В этой ситуации чрезвычайно важное значение имеет вопрос правильного, объективного определения количества $(n - m)$ резервных элементов и самой методики резервирования. Дело в том, что научной методики возмещения потерь вследствие снижения надежности функционирования производственных элементов в процессе труда в настоящее время в промышленности не существует.

Рассмотрим это на примере рабочих кадров, являющихся основным элементом любой производственной системы. Целодневная надежность функционирования рабочих в процессе труда по промышленности СССР, определенная по данным использования номинального фонда рабочего времени в днях, находится в пределах 0,86—0,88 [1, стр. 123]. В литейном производстве, отличающемся более тяжелыми условиями труда, чем в среднем по промышленности, эта цифра варьирует от 0,82 до 0,86. Чисто умозрительно в большинстве учебных пособий и в инструктивных материалах по труду (см. например, [2, стр. 150, 162]) рекомендуется обеспечивать возмещение фактических потерь надежности функционирования рабочих в процессе труда в пределах разности $1 - (0,86 - 0,88)$, т. е. 12—14% от численности, требуемой по технологическому расчету, причем максимально. В большинстве же случаев эта цифра планируется еще в меньших размерах — с чисто волевым обоснованием размера уменьшения, когда желаемая целодневная надежность функционирования рабочих кадров в процессе труда субъективно выдается и принимается в технико-экономических расчетах за действительную. При этом утверждается, что определенная таким образом численность рабочих кадров полностью гарантирует достижение требуемой в соответствии с технологическим процессом производства эффективности, производительности производственной системы (рабочего места, цеха, завода). В действительности же при этом полностью игнорируется вероятностный смысл надежности функционирования рабочего и надежности функционирования производственной системы в процессе труда, в результате чего подавляющее число производственных систем в промышленности работает с эффективностью ниже проектно-технологических наметок. Это находит свое выражение в соответствующем снижении производительности рабочих мест, участков, цехов, заводов из-за недостаточной численности рабочих кадров, в больших потерях выпуска нужной народнохозяйственной продукции.

Ниже излагается объективный метод вероятностного резервирования рабочих, учитывающий вероятностную специфику целодневной надежности функционирования их в процессе труда и дающий возможность существенно повысить производительность производственных систем (рабочих мест, участков, поточных линий, цехов, заводов). Рассмотрим его на примере работы бригады формовщиков механизированной формовки. В этой производственной системе оптимальное количество рабочих m в соответствии с технологическим процессом составляет 5 человек. Целодневная надежность функционирования в процессе труда рабочего-формовщика p равна 0,85. Поскольку целодневный выход каждого рабочего есть событие случайное и является результатом одинакового воздействия на каждого рабочего болезней, травм, очередных отпусков, прогулов, выполнения государственных и общественных обязанностей, декретных отпусков, командировок, тех или иных семейных и личных обстоя-

тельств, постольку вероятности невыхода каждого рабочего p независимы друг от друга, а при работе в одинаковых рабочих условиях — и равны.

Это означает, что вероятность выхода любого рабочего на работу p равна 0,85, а вероятность того, что он совершит невыход по какой-либо причине q , составляет 0,15 (см. табл. 1). Следовательно, с точки зрения

Таблица 1

Методика вероятностного определения количественного состава и надежности функционирования в процессе труда системы взаимозаменяемых элементов методом резервирования
($p = 0,8500$, $m = 5$)

n	i	$C_n^i \cdot p^i \cdot q^{n-i}$	P_i	$P_{i \geq m}$	P_j	Q_j''	P_{mn}
1	0	1.0,15	0,1500				
1	1	1.0,85	0,8500				
2	0	1.0,15.0,15	0,0225				
1	1	2.0,85.0,15	0,2550				
2	2	1.0,85.0,85	0,7225				
3	0	1.0,15.0,15.0,15	0,0034				
1	1	3.0,85.0,15.0,15	0,0574				
2	2	3.0,85.0,85.0,15	0,3251				
3	3	1.0,85.0,85.0,85	0,6141				
4	0	1.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0005				
1	1	4.0,85.0,15.0,15.0,15	0,0115				
2	2	6.0,85.0,85.0,15.0,15	0,0975				
3	3	4.0,85.0,85.0,85.0,15	0,3685				
4	4	1.0,85.0,85.0,85.0,85	0,5220				
5	0	1.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0001				
1	1	5.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0021		0,0021	12	
2	2	10.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15	0,0244		0,0244	24	
3	3	10.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15	0,1382		0,1382	36	0,8500
4	4	5.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15	0,3915		0,3915	47	
5	5	1.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85	0,4437	0,4437	0,4437	60	
6	0	1.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0000				
1	1	6.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0004		0,0004	12	
2	2	15.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0054		0,0054	24	
3	3	20.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15	0,0415		0,0415	36	0,9350
4	4	15.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15	0,1762		0,1762	47	
5	5	6.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15	0,3993	0,7765	0,7765	60	
6	6	1.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85	0,3772				
7	0	1.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0000				
1	1	7.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0000		0,0000	12	
2	2	21.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0011		0,0011	24	
3	3	35.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0108		0,0108	36	0,9850
4	4	35.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15	0,0618		0,0618	47	
5	5	21.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15	0,2097	0,9263	0,9263		
6	6	7.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15	0,3960				
7	7	1.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85	0,3206				
8	0	1.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0000				
1	1	8.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0000		0,0000	12	
2	2	28.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0002		0,0002	24	
3	3	56.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0024		0,0024	36	1,0000
4	4	70.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15.0,15	0,0183		0,0183	47	
5	5	56.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15.0,15	0,0842	0,9790	0,9790	60	
6	6	28.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15.0,15	0,2376				
7	7	8.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,15	0,3847				
8	8	1.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85.0,85	0,2725				

целодневной надежности функционирования в процессе труда каждый рабочий может быть в двух состояниях, которые мы в общем случае обозначим через i . Для системы (бригады) из двух рабочих ($n = 2$) существуют три состояния ($i = 3$), причем в состояние выхода на работу только одного рабочего бригада может прийти двумя различными спосо-

бами. Вероятность нахождения системы (бригады) из двух рабочих в состоянии, когда оба рабочих не вышли на работу, равна произведению вероятностей их целодневных невыходов q , или 0,0225. Вероятность выхода обоих рабочих одновременно равна соответственно произведению вероятностей их целодневной надежности функционирования p , или 0,7225. Вероятность же выхода только одного рабочего из двух равна произведению вероятности целодневной надежности функционирования p на вероятность невыхода q , а поскольку бригада может прийти в это состояние двумя различными способами, то это произведение надо удвоить. Окончательная вероятность последнего состояния системы (бригады) из двух рабочих равна 0,2550.

В общем случае мы замечаем, что на основании принятых допущений о независимости и равновероятности целодневных невыходов каждого из рабочих (а это соответствует производственно-трудоу действительности) определение вероятности i -го состояния системы (бригады) из n человек осуществляется на основании частной теоремы о повторении опытов по соответствующему биномиальному распределению [3, стр. 60]. Если обозначить в общем случае вероятность нахождения системы (бригады) из n рабочих в i -м состоянии через P_i , то:

$$P_i = C_n^i \cdot p^i \cdot q^{n-i}. \quad (1)$$

Поскольку все состояния системы (бригады) образуют полную сумму событий,

$$\sum_{i=0}^n P_i = 1.$$

В соответствии со сказанным выше система (бригада) из $n = m = 5$ человек по числу наличия на рабочем месте механизированной формовки рабочих-формовщиков может случайным образом прийти в шесть различных возможных состояний: 1) $i = 0$; 2) $i = 1$; 3) $i = 2$; 4) $i = 3$; 5) $i = 4$; 6) $i = 5$. Соответствующие вероятности этих событий, определенные по формуле (1), приведены в табл. 1.

Поскольку рабочее место механизированной формовки будет работать с максимальной производительностью только при одновременном наличии полного состава бригады ($m = 5$), постольку случайные целодневные невыходы рабочих-формовщиков будут, естественно, снижать эффективность функционирования или производительность рабочего места. Если обозначить соответствующие каждому из состояний бригады дифференциальные (теоретические, расчетные) производительности через Q_j'' , то в нашем случае они соответственно составят*:

$Q_0'' = 0$ форм/час	$Q_3'' = 36$ форм/час
$Q_1'' = 12$ »	$Q_4'' = 47$ »
$Q_2'' = 24$ »	$Q_5'' = 60$ »

Из табл. 1 видно, что при отсутствии резерва рабочих бригада формовщиков будет функционировать в соответствии с оптимальным вариантом (выдавая ежечасно на литейный конвейер 60 форм) только 44,37% номинально возможного фонда времени. Остальное время в результате случайных целодневных невыходов рабочих-формовщиков функционирование рабочего места механизированной формовки будет происходить с пониженной производительностью.

* Приводимый в статье цифровой пример отражает конкретный технологический расчет производительности рабочего места механизированной формовки на основе модернизированных формовочных машин 2М265 и 254М.

Состояния, при которых происходит понижение производительности рабочего места ниже максимально возможного уровня (60 форм/час), характеризуют собою явления простоя в процессе труда, возникающие вследствие случайных невыходов отдельных рабочих бригады. Один из основных методов устранения этих явлений — резервирование.

Выделим в бригаду одного резервного рабочего и перейдем к рассмотрению системы (бригады) из $n = m + 1 = 6$ человек. Соответствующие вероятности P_i состояний этой системы отражены в табл. 1 при $n = 6$ (по строкам). В этом случае вероятность того, что бригада будет функционировать на рабочем месте без понижения выпуска литейных форм ниже максимально возможного уровня (60 форм/час), равна сумме вероятностей состояний, когда на рабочем месте механизированной формовки будет функционировать система (бригада) из 5 человек и из 6 человек. Как видно из табл. 1, это приводит уже к 77,65% времени работы с максимально возможной производительностью 60 форм/час.

Соответственно, при резервировании в системе (бригаде) двух и трех рабочих-формовщиков это время доводится до 92,63% и 97,90%, т. е. практически до единицы. Следовательно, если обозначить вероятность функционирования резервированной системы (бригады) с максимально возможной производительностью по технологическому процессу через $P_{i \geq m}$, то она определяется в общем виде как:

$$P_{i \geq m} = \sum_{i=m}^n P_i, \quad (2)$$

т. е. суммированием вероятностей состояний системы n , превышающих или равных m .

Существенно при этом добавить, что резервирование в бригаде формовщиков одного или более рабочих не меняет самого технологического процесса механизированной формовки. Поэтому в любом случае на рабочем месте может функционировать не более 5 рабочих. Резервные же рабочие работают по принципу замещения выбывающих случайным образом и в случайное время кого-либо из пятерки обслуживающих производственную систему рабочих. Поэтому основная система m , всегда равная 5 рабочим, будет во всех случаях принимать только шесть состояний в соответствии с возможными дифференциальными производительностями Q_j . Следовательно, j и отражает в общем виде возможные рабочие состояния резервируемой системы (бригады) формовщиков ($j = 1, 2, \dots, m$).

Как видно из табл. 1, по мере резервирования в системе $m(n - m)$ производственных элементов (в данном случае — рабочих-формовщиков) происходит перераспределение вероятностей этих основных рабочих состояний резервируемой системы m , поскольку удельный вес времени нормального функционирования $P_{i \geq m}$ неуклонно возрастает.

Это перераспределение осуществляется (см. табл. 1) в соответствии с правилом:

$$P_j = P_i \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, (m - 1), \quad (3)$$

$$P_j = \sum_{i=m}^n P_i \quad \text{при } j = m, \quad (4)$$

где P_j — вероятности j -го состояния системы m при резервировании в ней $(n - m)$ элементов.

Но полученные в результате резервирования новые вероятности состояний резервируемой системы m (бригады формовщиков) P_j есть не что иное, как вновь складывающиеся удельные веса времени функционирования производственной системы с указанными выше соответствующими дифференциальными производительностями Q_j'' , поскольку технологический процесс механизированной формовки остается прежним.

Отсюда мы можем определить надежность функционирования в процессе труда системы (бригады) в каждом из вариантов по n как отношение суммы произведений вероятностей j -х состояний системы на соответствующие им дифференциальные производительности к максимально возможной, оптимальной производительности системы Q_m'' в соответствии с технологическим процессом (когда на рабочем месте функционируют все пять рабочих-формовщиков).

Если обозначить ее через P_{mn} , то:

$$P_{mn} = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot Q_j''}{Q_m''} \quad (5)$$

В нашем примере резервирование в системе (бригаде) одного рабочего повышает надежность функционирования ее в процессе труда с 0,8500 до 0,9350, двух рабочих — до 0,9850. При резервировании трех рабочих мы получаем практически надежность функционирования в процессе труда, равную 1, т. е. мы не будем сталкиваться со случаями, когда на рабочем месте будет менее 5 рабочих-формовщиков, и рабочее место сможет в течение всего времени работать с максимально возможной производительностью 60 форм/час.

Итак, получено четыре варианта состава бригады с соответствующими значениями надежности функционирования ее в процессе труда: $m = 0,8500$; $m + 1 = 0,9350$; $m + 2 = 0,9850$; $m + 3 = 1,0000$.

Выбор окончательного варианта определяется в соответствии с расчетом экономической эффективности дополнительного резервирования в системе *, приведенным в табл. 2.

Увеличение выпуска литейных форм рабочими местами механизированной формовки вызывает пропорциональный рост выпуска отливок по литейному цеху. Вследствие этого оказалось необходимым по строкам 7, 8, 9 и 10 табл. 2 скорректировать численность рабочих цеха из-за пропорционального выпуску роста изменяемой части численности рабочих цеха.

Как видно из табл. 2, экономически самым эффективным является вариант $(m + 2)$, обеспечивший, совместно с некоторыми другими мероприятиями по повышению надежности функционирования в процессе труда материальных элементов рабочих мест механизированной формовки, увеличение выпуска литейных форм, а равно и отливок по цеху почти на 35% при одновременном повышении производительности труда рабочих по цеху почти на 10%.

Таким образом, чисто умозрительное резервирование в пределах потерь (в данном случае $100 - 85 = 15\%$) потребовало бы включения только одного человека на две бригады рабочих-формовщиков, что, в лучшем случае, дало бы вариант с надежностью функционирования бригады в процессе труда, не превышающей 0,9000. Это увеличило бы выпуск отли-

* Расчет производится в соответствии с примечанием на стр. 70. По строке 2 в табл. 2 в вариантах $(m + 1)$, $(m + 2)$ и $(m + 3)$ учтено проводимое одновременно с резервированием рабочих-формовщиков повышение надежности функционирования в процессе труда материальных элементов производственной системы.

Таблица 2

Расчет экономической эффективности резервирования бригад рабочих-формовщиков в целом по литейному цеху

№ п/п.	Элементы расчета	Варианты			
		m	$m+1$	$m+2$	$m+3$
1	Надежность функционирования в процессе труда бригады формовщиков	0,8500	0,9350	0,9850	1,0000
2	Надежность функционирования в процессе труда материальных элементов рабочего места механизированной формовки	0,7348	0,8538	0,8538	0,8538
3	Надежность функционирования в процессе труда производственной системы «рабочее место механизированной формовки»	0,6246	0,7983	0,8405	0,8538
4	Максимально возможная дифференциальная производительность рабочего места механизированной формовки (литейных форм в час)	60	60	60	60
5	Интегральная производительность рабочего места механизированной формовки (литейных форм в час)	37,5	48	50,5	51
6	Увеличение выпуска литейных форм, %	100	127	134,6	136,6
7	Рост численности бригады формовщиков, %	100	120	140	140
8	Удельный вес формовщиков в численности рабочих цеха	0,145	0,145	0,145	0,145
9	Удельный вес прочей изменяемой численности рабочих цеха	0,500	0,500	0,500	0,500
10	Общее увеличение численности рабочих цеха, %	100	116,9	123,1	127
11	Рост производительности труда одного рабочего по цеху, %	100	108,5	109,5	107,5

вок по цеху только на 20—22%, т. е. по сравнению с любым из вариантов, рассчитываемых по предлагаемой методике, этот вариант был бы менее эффективен.

Предлагаемая методика пригодна не только для резервирования рабочих, но и для любых материальных элементов производственной системы, например формовочных и стержневых машин, литейных ковшей и пневмоподъемников и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Народное хозяйство СССР в 1963 г. Статистический ежегодник. М., «Статистика», 1965.
2. С. Х. Гурьянов, И. А. Поляков, К. С. Ремизов. Справочник экономиста по труду. М., «Экономика», 1962.
3. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.

Поступила в редакцию
16 XI 1965

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТРАТ В МАШИНОСТРОЕНИИ

М. И. МИНЦ

(Львов)

Важное значение в машиностроении из-за длительности производственного цикла имеет измерение затрат в незавершенном производстве. Изучение опыта работы экономических служб машиностроительных предприятий показывает, что оценка незавершенного производства сопряжена с огромными затратами рабочего времени инженерно-технических работников и служащих. Только одни работники планово-экономических служб тратят на это не менее 25% рабочего времени, что составляет в масштабе всей отрасли свыше 30 млн. человеко-часов в год. Применение электронно-вычислительных машин позволило бы высвободить большое количество квалифицированного труда от выполнения повторяющихся утомительных операций и использовать его более рациональным образом. Однако этот крупный резерв повышения эффективности труда в управлении до настоящего времени еще не реализован. Этому препятствует нерешенность ряда вопросов методического характера.

Определение наличия затрат в незавершенном производстве связано с использованием большого количества исходной информации. Эта информация включает сведения двух видов: во-первых, данные о нормативных затратах на изготовление деталей и сборочных соединений (в денежном выражении) и, во-вторых, данные об их фактическом наличии на различных участках производства. Основная трудность обработки такой информации состоит в том, что сведения обоих видов являются не постоянными, а переменными. Непрерывное изменение исходной информации обуславливает большие затраты труда при ее вводе в ЭВМ, что намного снижает эффективность их применения.

Важным шагом вперед по пути механизации расчетов незавершенного производства в машиностроении могло бы стать преобразование хотя бы части исходной информации из переменной в постоянную. По нашему мнению, такой информацией могут стать стабильные нормативные калькуляции, разрабатываемые на определенную дату. Для приведения затрат в незавершенном производстве, измеренных с помощью стабильных нормативных калькуляций, к действительному (текущему) уровню можно использовать соответствующие коэффициенты пересчета, исчисленные в целом по отдельным изделиям.

Решение вопроса о приемлемости оценки незавершенного производства машиностроительных предприятий с помощью стабильных нормативных калькуляций требует выяснения точности такой оценки. Для этой цели необходимо располагать сотнями или даже тысячами результатов проверочных сравнительных расчетов. Между тем при осуществлении таких расчетов в заводских условиях для получения только одного результата приходится на продолжительный период загружать многих ра-