УДК 658.588.8:658.3.012.2

Экспертная модель планирования трудовых ресурсов ремонтных служб

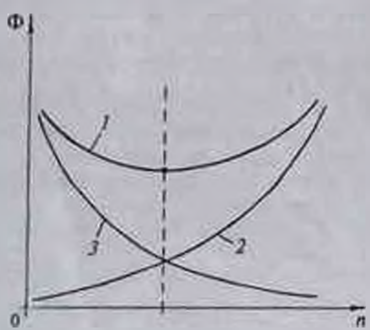
© Г. В. Сопилкин и Е. В. Ошовская
Донецкий государственный технический университет

С переходом на рыночные отношения металлургические предприятия стран СНГ реорганизуют ремонтные службы, сокращая объем услуг специализированных предприятий и стремясь к минимизации суммарных затрат на ТО и Р и производственных потерь от простоев оборудования (рисунок).

Цель данной работы — построение экспертной экономико-математической модели планирования трудовых ресурсов для выполнения ТО и Р оборудования в объемах годовых планов-графиков.

Постановка задачи. Для совокупности объектов (машин, агрегатов) цеха, образующих множество A, с годовым объемом ремонтно-профилактических работ V и затратами на их ремонт и содержание необходимо: 1) рассчитать оптимальную численность ремонтного персонала служб цеха при минимизации затрат на ТО и Р и потерь производства; 2) определить оптимальный численный состав специализированных ремонтных бригад при условии минимизации сроков выполнения работ; 3) предложить решения по использованию трудовых ресурсов, обеспечивающих своевременное выполнение ремонтных работ.

Каждому объекту оборудования X_i ставим в соответствие величину убытка C_i в единицу времени от несвоевременного ТО и Р объекта X_i. Пусть $P_i(t)$ — закон запросов на ТО и Р объекта X_i, а $Q_i(k)$ — среднее время его обслуживания.



Представление функций затрат: *1* — функция затрат на ремонт и содержание оборудования; *2* — функция затрат на заработную плату; *3* — функция потерь производства от простоя

За функцию цели примем функцию затрат на ТО и Р оборудования, которая имеет вид:

$$\Phi(n, t) = nzt + \sum_{i=1}^{N} C_i P_i(t)\,[t + Q_i(k)], \qquad (1)$$

где n — общее число рабочих; k — число рабочих, обслуживающих i-объект; z — заработная плата одного рабочего за единицу времени; t — время; N — количество объектов оборудования.

Как показал анализ, нет смысла рассматривать зависимость функции (1) от времени t, так как в реальных задачах эта величина обычно задана (рабочая смена, месяц, год). Поэтому функция (1) на фиксированном интервале времени $[0; \Delta T]$ имеет вид:

$$\Phi(n, \Delta T) = nz\Delta T + \sum_{i=1}^{N} C_i P_i(\Delta T)\,[\Delta T + Q_i(k)]. \qquad (2)$$

Необходимо определить, при каких значениях функция (2) имеет единственный минимум при любом ΔT.

Функцию $\Phi(n, \Delta T)$ можно рассматривать как сумму двух функций:

$$\Phi(n, \Delta T) = З(n, \Delta T) + П(n, \Delta T), \qquad (3)$$

где $З(n, \Delta T)$ — затраты на заработную плату рабочих-ремонтников; $П(n, \Delta T)$ — потери предприятия от несвоевременного ТО и Р оборудования. В общем случае $З(n, \Delta T)$ можно представить как $З(n, \Delta T) = Z^{*} n\, \Delta T$, где Z^{*} — средние затраты на одного рабочего в единицу времени. Функция $З(n, \Delta T)$ является линейной и строго возрастающей. Следовательно, $З(n, \Delta T)$ не ограничена сверху, т.е. $\lim_{n \to \infty} З(n, \Delta T) = \infty$. Очевидно, что при $n = 0$ $З(n, \Delta T) = 0$.

Проанализируем теперь функцию $П(n, \Delta T)$. Ясно, что функция при отсутствии рабочих ($n = 0$) достигает максимального значения. С увеличением количества обслуживающего персонала значение функции $П(n, \Delta T)$ не возрастает, т.е. потери предприятия от несвоевременного обслуживания оборудования уменьшаются или не изменяются. Очевидчто потери предприятия от простоя оборудования не могут быть меньше нуля. Значит, функция ограничена снизу нулем, т.е. $\lim П(n, \Delta T) = 0$. В реальных задачах $П(n, \Delta T)$ является функцией от целого аргумента n. Следовательно, можно попытаться определить оптимальное количество рабочих $n_{опт}$, при котором функция $Ф(n, \Delta T)$ при заданном ΔT имеет минимум.

Для отыскания минимума функции (2) предлагается комбинированный алгоритм, использующий метод сужающихся окрестностей и имитационное моделирование. Алгоритм рассчитан на задачи больших размерностей и применим для моделей с любыми законами запросов на обслуживание, к которым относится система ТО и Р металлургического оборудования [1]. С другой стороны, система ТО и Р оборудования является системой массового обслуживания: заявки на обслуживание поступают нерегулярно, а время обслуживания (ремонта) на одном рабочем месте колеблется в значительных пределах. [illegible] происходит несколько отказов одновременно, то задача решается в два этапа: 1) определение параметров системы; расчет количества отказов и установление очередности их устранения; 2) расчет оптимальных норм обслуживания и численного состава ремонтного персонала.

Состояние системы ТО и Р оборудования определяется числом заявок на ремонт, обладающих приоритетом (i) и не обладающих им (j). Заявка с приоритетом немедленно принимается к обслуживанию персоналом, если даже он занят обслуживанием заявки без приоритета. После того как приоритетная заявка будет выполнена и других таких заявок не поступит, возобновляется прерванное обслуживание заявки, не обладающей приоритетом. Таким образом, система может находиться в одном из следующих состояний: 1) $i = 0$; $j = 0$; 2) $i = 0$, $j \neq 0$, из заявок j одна выполняется, а $j - 1$ ожидают очереди; 3) $i \neq 0$; $j = 0$, одна из заявок i выполняется, а $i - 1$ ожидают очереди; 4) $i \neq 0$; $j \neq 0$, в порядке очередности вначале выполняются заявки с приоритетом; 5) при $t = 0$ $P_{00}(0) = 1$, $P_{ij}(\infty) = 0$, где $P_{ij}(t)$ — вероятность состояния системы.

Принимаем $\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} P_{ij}(t) = 1$; λ_1 и μ_1 — интенсивность потоков поступления и восстановления заявок i; λ_2 и μ_2 — интенсивность потоков поступления и восстановления заявок j; $a_1 = \lambda_1/\mu_1$, $a_2 = \lambda_2/\mu_2$, где a_1 — среднее число заявок с приоритетом, поступающих в систему за среднее время обслуживания одной такой заявки; a_2 — то же, для заявок без приоритета.

Вероятное состояние системы представляем дифференциальными уравнениями. Для интегрирования системы дифференциальных уравнений принимаем $t \to \infty$, или $t = 0$, $P_{00}(0) = 1$ и $P_{ij}(\infty) = 0$, а $\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} P_{ij}(t) = 1$.

Задача сводится к отысканию вероятностей P_{ij}. Используя метод производящих функций, определяем число приоритетных заявок, находящихся в очереди:

$$L_1 = \frac{a_1^2}{1 - a_1}; \tag{4}$$

время пребывания в очереди заявки, обладающей приоритетом:

$$t_{ож_1} = \frac{1}{\mu_1} \frac{a_1}{1 - a_1}; \tag{5}$$

число не приоритетных заявок, находящихся в системе:

$$L_2 = \frac{a_2}{1 - a}\left[1 + \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{a_1}{1 - a_1}\right], \tag{6}$$

где $a = a_1 + a_2$;

время пребывания заявки, не обладающей приоритетом в системе:

$$t_{c_2} = t_{ож_2} + \frac{1}{\mu_2}; \tag{7}$$

численный состав ремонтного персонала:

$$n = \frac{a_1}{1 - a_1} + \frac{a_2}{1 - a_1 - a_2}\left[1 + \frac{\mu_2 a_1}{\mu_1 (1 - a_1)}\right]. \tag{8}$$

Выражения (4) — (8) дают возможность рассчитать оптимальные нормы обслуживания (ремонта) оборудования и численный состав ремонтного персонала с учетом технического состояния конкретных объектов и оборудования цеха в целом, т.е. технически обоснованные нормы.

Теперь можно провести анализ принятия решения о численном составе ремонтного персонала, используя выражения (3) и (8). Численным составом определяются сроки выполнения ТО и Р. Например, для выполнения текущих и капитальных ремонтов прокатного стана с 200 объектами ремонта привлекаются от 8 до 12 ремонтных бригад, значительные средства механизации.

Обозначим: РБ — ремонтные бригады, включающие цеховые службы и подразделения ОГМ и других служб предприятия; СБ — специализированные бригады, входящие в состав подрядных (например, "Домнаремонт") организаций. Нерациональное [illegible] использование СБ приводит к резкому повышению затрат на ремонтные работы. Поэтому необходимо при фиксированном количестве ремонтируемых [illegible] составить график работ [illegible] ремонтных бригад [illegible] ким образом, чтобы длительность ремонта была минимальной при максимальном количестве специализированных бригад.

Расчет объемов и трудоемкости ремонтно-профилактических работ представлен в работах [2, 3]. Численный состав ремонтного персонала определяется из выражений (1) и (3), число специализированных бригад ограничено возможностями предприятия. Поэтому задача оптимизации продолжительности ремонтов сводится к рациональному использованию специализированных бригад и бригад ремонтников.

Исходные данные:

$$R = \{t_{11}, \tau_{11}, \ldots, t_{ij}, \tau_{ij}, \ldots, t_{nl}, \tau_{nl}\},$$

где t_{ij} — продолжительность работы СБ на этапе j ремонта i машины, τ_{ij} — продолжительность ремонта РБ на этапе j ремонта машины i после работы СБ на этой машине; l_i — число этапов ремонта машины i.

Под этапом подразумевается совокупность выполняемых РБ и СБ операций между двумя последовательными использованиями СБ на этой машине. Операцией считаем последовательную работу СБ и РБ на определенном этапе ремонта машины.

Обозначим m — количество одновременно ремонтируемых машин, n — количество машин, которые необходимо отремонтировать, k — количество СБ.

Введем неизвестные: $T_{p_{ij}}$ — время начала работы СБ s или p на этапе j ремонта машины i (если бригада s не участвует в этапе j ремонта машины i, то $T_{p_{ij}}$ полагаем равным 0).

Тогда функция цели будет иметь вид

$$\Phi = \max\left(T_{ij} + t_{ij} + \tau_{ij}\right) \to \min.$$

Соответственно

$$T_{s_{ij}} + t_{ij} + \tau_{ij} \le \Phi_{\min}, \quad i = \overline{1, n}, \; s = \overline{1, k}, \qquad (9)$$

где Φ — время окончания ремонта.

Ограничения, накладываемые на модель, можно записать в следующем виде:

$$T_{p_{ij}} + t_{ij} + \tau_{ij} \le \{T_{p(i+1)j}\},$$

$$i = \overline{1, n}, \; j = \overline{1, l_i - 1}; \; s, p = \overline{1, k}, \qquad (10)$$

$$T_{s_{ij}} \cdot T_{p_{ij}} < 0, \; i = \overline{1, n}, \; j = \overline{1, l_i}, \; s, p = \overline{1, k}, \; s \ne p. \qquad (11)$$

Ограничения (10) показывают, как соотносится время начала последующего и предыдущего этапа ремонта машины, а ограничение (11) означает, что одна СБ в каждый момент времени участвует в ремонте только одной машины.

Кроме того, принимается предположение о наличии неограниченного ремонтного персонала на одном рабочем месте одной и той же СБ. Для оптимизации функции (9) рекомендуется использовать эвристический метод [4].

При оптимизации сроков выполнения работ ТО и Р оборудования по выражению (9) в начале решения задачи задаемся минимальным количеством СБ, равным 1. Если $\Phi \le D$, то задача решена, при $\Phi > D$ поиск оптимального решения сводится к экспертному анализу фактических и директивных сроков выполнения ремонтных работ, за счет перераспределения дополнительных трудовых ресурсов специализированными бригадами, сокращением объема работ, за счет их уточнения средствами диагностики и др. Задача оптимизации состава СБ сводится к следующему. Имеется совокупность вариантов определения сроков выполнения работ с использованием РБ и СБ, образующих множество B. В данном случае рассматриваем ряд показателей $X_1, X_2, \ldots, X_m$, влияющих на сроки выполнения ремонтных работ с учетом трудовых ресурсов. Ранжируем показатели на основании экспертных оценок (таблица). Тогда решение задачи сводится к выбору из множества B подмножества $B \subset C$ вариантов, обеспечивающих выполнение ремонтных работ в директивные сроки, определяемые при формировании годовых планов [2, 3].

Задача реализуется следующим образом.

Определяем показатели (признаки):

X_1 — потери производства от простоев оборудования, X_2 — объем ремонтно-профилактических работ, X_3 — затраты на ремонт и содержание оборудования; X_4 — численный состав РБ цеха и цехов ОГМ, X_5 — численный состав СБ, X_6 — директивные сроки выполнения ТО и Р оборудования (D).

Рассчитываем функции выбора (по каждому показателю принимаем среднее значение):

$$(X_0)_j = \sum_{i=1}^{n} X_{ji} / N, \qquad (12)$$

где $(X_0)_j$ — функция выбора по показателю j, X_{ji} — значение показателя j по варианту i, N — общее число показателей.

Экспертная матрица ранжирования

Показатели	Машины										$\sum a_j$	a_j
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
X_1	6	1	6	6	6	6	4	5	6	6	52	5,2
X_2	4	5	4	5	5	3	5	6	4	5	46	4,6
X_3	2	2	2	3	3	2	1	1	1	2	19	1,9
X_4	1	4	3	2	2	4	3	3	3	3	28	2,8
X_5	3	3	1	1	1	1	2	2	2	1	17	1,7
X_6	5	6	5	4	4	5	6	4	5	4	48	4,8

Проводим предварительный отсев вариантов по [illegible] правилу:

если $X_N > (X_0)_j$, то вариант требует последующего [illegible], если $X_N < (X_0)_j$, то вариант не требует рассмотрения.

В нашем случае исключаются из дальнейшего рассмотрения варианты с показателями X_1 и X_6, у [illegible] $X_1 < (X_0)_j$.

Для вариантов и показателей, удовлетворяющих неравенству $X_N > (X_0)_j$, рассчитываем коэффициент весомости:

$$a_j = X_N / (X_0)_j. \tag{13}$$

По результатам опроса экспертов определяем сумму рангов:

$$r_j = \sum_{i=1}^{n} r_{ij}. \tag{14}$$

Рассчитываем степень согласованности мнений экспертов при помощи коэффициента конкордации, который указывает на отсутствие равных рангов в ранжировке каждого эксперта и определяется:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^{m} [r_i - {}^1/_2 N (m+1)]^2}{N^2 (m^3 - m)}, \tag{15}$$

где m — число показателей; N — число экспертов; r_i — сумма рангов показателей, полученных от одного эксперта. В качестве коэффициента значимости показателей принимаем значение среднего ранга:

$$K_i = r_{i_{ср}} = \sum_{i=1}^{m} r_i / m. \tag{16}$$

Для определения коэффициента значимости используем опрос экспертов. Десять экспертов ранжировали показатели по важности. Результаты их работы приведены в таблице. Рассчитываем коэффициент конкордации. Суммы рангов в соответствии с (14) равны $r_1 = 52$, $r_2 = 46$, $r_3 = 19$, $r_4 = 28$, $r_5 = 17$, $r_6 = 48$. Из (16) находим $r_{i_{ср}} = 35$. Подставляя найденное значение в (15), получим $W = 0{,}690$.

Выбирая вероятность ошибок $P_{ош}$, предполагаем, что величина W имеет χ^2 распределение со степенью свободы $(m - 1)$. Зная $P_{ош}$ по специальным таблицам [5] находим табличное значение коэффициента конкордации $W_т$. При $W \geq W_т$ считаем ранжировку статистически значимой. Полученная ранжировка является случайной, $P_{ош} = 0{,}01$. Вычисленное значение $N(m - 1) W = 10 \cdot 5 \cdot 0{,}69 = 34{,}5$ больше табличного. Следовательно, полученная ранжировка статистически значима. Если ранжировка статисти[illegible] незначима, изменить состав экспертов и [illegible] повторную экспертизу по оценке показателей. Составляем обобщенную характеристику вариантов на основании полученных коэффициентов значимости и весомости показателей по каждому варианту и [illegible] в виде

$$\beta_i = a_1 K_1 + a_2 K_2 + \ldots + a_j K_j. \tag{17}$$

Среднеэталонную характеристику варианта оцениваем следующим выражением

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \beta_i}{\sum_{i=1}^{N_j} \sum_{j=1}^{n} a_{ij}}, \tag{18}$$

где N_j — число вариантов, отобранных предварительно.

Принимаем решение по каждому варианту: если $\beta_i > \beta_0$, то вариант требует принятия решений по изменению показателей, в частности, можно изменить состав СБ таким образом, чтобы $\Phi \leq D$, при $\beta_i \leq \beta_0$ решений не требуется.

Например, при выполнении текущих ремонтов рольгангов стана 950/900 Донецкого металлургического завода оптимальные сроки окончания работ (т.е. $\Phi \leq D$) достигнуты при использовании трех специализированных бригад. Ранее для выполнения этих ремонтов использовали 5 – 6 бригад.

Заключение

Использование экспертной модели принятия решений по техническому обслуживанию механического оборудования позволяет сократить количество аварийных простоев и сроки ремонтов за счет рационального распределения трудовых ресурсов.

Библиографический список

1. *Соломкин Г. В., Седуш В. Я., Арбенин Ч. А., Серых А. Е.* Оптимизация норм обслуживания оборудования // Управление и организация труда в газовой промышленности: Сб. [illegible] 1983. Вып. 5. С. 17 – 21.
2. *Соломкин Г. В., Седуш В. Я., Арбенин М. Л. и др.* Оптимизация годовых графиков текущих ремонтов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. № 1. С. 151 – 154.
3. *Соломкин Г. В., Седуш В. Я., Мартынов Ю. М. и др.* Алгоритм оптимизации графиков профилактических работ [illegible] Металлургическая и горнорудная промышленность. 19[illegible] № 1. С. 63 – 64.
4. *Соломкин Г. В., Седуш В. Я., Серых А. Е. и др.* О рациональном использовании кранов при ремонте металлургического оборудования // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. [illegible] С. 129 – 132.
5. *Шор Я. Б.* Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М.: Советское радио, 1962. С. 55[illegible]