В.М. Беленький[1], Ю.В. Прус[2]
([1]МГУТУ им. К.Г. Разумовского, [2]Академия ГПС МЧС России;
e-mail: av35740@akado.ru)

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА

Представлен алгоритм оптимизации профилактических мероприятий, который используется в подсистеме принятия решений автоматизированной системы управления охраной труда на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: охрана труда, профилактические мероприятия, система управления, алгоритм оптимизации.

V.M. Belenkiy, Yu.V. Prus

PROPHYLACTIC EVENTS OPTIMIZATION ALGORITHM IN AN OCCUPATION SAFETY CONTROL SYSTEM

We present the optimization algorithm of prophylactic events which is used in making decisions subsystem of computer-aided occupation safety control system at industrial enterprises.

Key words: labor safety, prophylactic events, control system, optimization algorithm.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 15 марта 2014 г.

В системе автоматизированного управления охраной труда блок принятия решений выполняет функцию поиска наиболее приемлемых профилактических мероприятий, с точки зрения их стоимости и эффективности. Реализация такой функции использует критерий оптимальности [1]:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I} y_{ik} - \sum_{l=1}^{L} \varphi_l \sum_{k=1}^{k}\sum_{i=1}^{I}(\rho_{lk} Q_{ik}) \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где Q_{ik} – оздоровительный эффект при проведении мероприятия U_l, выраженный в снижении показателя по i-й форме риска;

y_{ik} – показатель i-й формы риска для k-й группы работающих;

$$\varphi = \begin{cases} 1, \text{ если мероприятие } U_l \text{ включено в оптимальный план;} \\ 0, \text{ если мероприятие } U_l \text{ не включено в оптимальный план;} \end{cases}$$

$\rho_{\ell k}$ – элемент матрицы связей;

ℓ – индекс мероприятия;

k – индекс группы работающих;

$\rho_{\ell k} = 1$, если мероприятие U_ℓ намечено для k-й группы работающих;

$\rho_{\ell k} = 0$, если мероприятие U_ℓ не намечено для k-й группы работающих.

Тогда $Y_\Sigma = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I} y_{ik}$ будем считать суммарным показателем начального риска на исследуемом производственном объекте, имеющем место без проведения каких-либо профилактических мероприятий.

При этом ***ограничения на ресурсы*** для планируемых мероприятий представим таким образом:

$$\sum_{l=1}^{L} \varphi_l \, d_l \le D, \qquad (2)$$

где d_l – стоимость мероприятия U_l;

D – общая величина ресурсов, выделяемых на все планируемые мероприятия.

Так как величина $\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{I} \rho_{lk} Q_{ik}$ характеризует ***суммарное снижение риска*** при проведении мероприятия U_ℓ, обозначим эту величину через ψ_l.

Тогда критерий (1) принимает вид:

$$\sum_{k=1}^{\mathrm{K}} \sum_{i=1}^{I} y_{ik} - \sum_{l=1}^{L} \varphi_l \, \psi_l \to \min. \qquad (3)$$

При формировании оптимального плана мероприятий в общем случае имеет смысл ввести дополнительное ограничение:

$$y_{ik} - \sum_{l=1}^{L} \varphi_l \rho_{lk} \, q_{il} \ge y_{imin}, \quad k = \overline{1, K}, \; i = \overline{1, I}\,, \qquad (4)$$

которое означает, что снижение риска в результате проведения комплекса мероприятий $(\overline{1, L})$ для k-й группы работающих должно превышать некоторый минимально возможный уровень, например прогнозируемый показатель по i-й форме болезни. Ограничение (4) позволит обеспечить равномерность проведения профилактических мероприятий при различной их эффективности и нормальной плотности распределения показателей профессионального риска.

Рассмотрим поэтапный процесс построения алгоритма оптимизации профилактических мероприятий.

В ряде случаев следует составить ***календарный план мероприятий*** по охране труда. Необходимость разработки календарного плана может быть вызвана большим числом мероприятий, предназначенных для одной группы работающих, сложностью процесса реализации этих мероприятий, а также общностью служб охраны труда, занятых в этом процессе.

Оптимальный комплекс мероприятий для k-й группы работающих, который необходимо выполнить за плановый период (0, *T*), обозначим $\{U_l^*\}$. Тогда мероприятия перечня, получаемого при календарном планировании, обозначим $U_r; r = \overline{1, R}$. При реализации каждого мероприятия используются несколько видов ресурсов H_m; $m = \overline{1, M}$. Здесь под видами ресурсов подразумеваются группы исполнителей мероприятий (монтажники, электрики, сантехники и т.д.). Мощность каждого вида ресурса P_m считаем независимой от времени:

$$P_m(t) = \mathrm{const}. \qquad (5)$$

Каждое мероприятие характеризуется интенсивностью использования m-го вида ресурса, являющейся функцией времени $F_{rm}(\tau)$.

Здесь

$$\tau_r = t - t_r^{\text{н}},$$

где τ_r – время выполнения мероприятия U_r;

t – текущее время;

$t_r^{н}$ момент начала работ по реализации мероприятия U_r.

При этом U_r не может начинаться раньше некоторого срока $t_{pr}^{н}$, связанного с открытием финансирования, проведением вспомогательных работ, поставкой оборудования и других организационно-технических особенностей производства.

Отсюда:

$$t_r^{н} \geq t_{pr}^{н}. \quad (6)$$

Предполагается, что мероприятие U_r выполняется без перерывов в течение времени τ_r, которое определяется по соответствующим нормативам или по опыту выполнения подобных работ.

Построение оптимального плана выполнения мероприятий по перечню $\{U_r\}$ заключается в определении сроков начала работ по мероприятиям $\{t_r^{*н}\}$, удовлетворяющих выбранному критерию оптимальности (1).

В качестве такого критерия можно также выбрать максимум оздоровительного эффекта, получаемого в плановом периоде за счет реализации $(\overline{1,R})$ мероприятий, направленных на снижение показателей риска по $\overline{1,I}$ формам заболеваний:

$$\sum_{r=1}^{R} \sum_{i=1}^{I} Q_{ri}(T, t_r^H, \tau_r) \Rightarrow \max. \quad (7)$$

Кроме условия (4), искомый план должен удовлетворять ограничениям

$$\sum_{r=1}^{R} F_{rm}(\tau) \leq P_m; \tau = 1,2, \ldots, \mathrm{T};\ m = \overline{1, \mathrm{M}}. \quad (8)$$

Построение алгоритма оптимального планирования

Задача (7), (8) может быть решена при использовании эвристических алгоритмов календарного планирования, основанных на правилах предпочтения [2, 3].

Рассмотрим алгоритм решения задачи нахождения последовательности мероприятий $\{\varphi_l^*\}$, минимизирующей выражение (3) при ограничениях (2) и (4).

Для построения искомого алгоритма используем решение "Задачи о ранце" [4]. С этой целью заменим в выражении (3) величину Ψ_l на Ψ_l', где

$$\Psi_l' = \sum_{k=1}^{k} \sum_{i=1}^{I} (\rho_{lk} \mathrm{Q}_{il}). \quad (9)$$

Тогда поставленная задача имеет вид:

определить последовательность $\{\varphi_1^*\}$, для которой

$$\sum_{l=1}^{L} \varphi_l^* \Psi_l' \Rightarrow \max, \quad (10)$$

при ограничениях (2) и (4). При этом выражение (10) является зеркальным отражением в отрицательную область выражения (3), с учётом суммарного начального риска Y_{Σ}.

Рассмотрим два алгоритма – для приближённого решения вручную и для точного решения задачи на ЭВМ.

А) Алгоритм для приближенного решения.

Рядом авторов [2, 5] показано, что квазиоптимальное решение при d_1 << D получается с использованием простого правила: в оптимальный план включаются мероприятия в порядке убывания оценок их удельной эффективности Ψ_1' / d_1:

$$\text{Если } \frac{\Psi_l^{*\prime}}{\mathrm{d}_l^*} = \max \frac{\Psi_l^{\prime}}{\mathrm{d}_l}, \text{ то } \varphi_l^* = 1. \qquad (11)$$

В данном случае не просматриваются варианты рационального расходования остатков ресурсов:

$$\Delta = D - \sum_{l=1}^{L} d_l.$$

Однако при больших L и стоимости отдельного мероприятия $\mathrm{d_l} \ll D$ эти погрешности невелики и ими можно пренебречь.

Б) Алгоритм для точного решения.

Здесь нельзя использовать хорошо разработанные методы линейного программирования, так как результаты решения $\{\varphi_l\}$ должны быть целочисленными. В этом случае можем использовать хорошо зарекомендовавший себя метод "ветвей и границ" [6], показавший достаточно быструю сходимость. Данный алгоритм основан на построении "дерева" возможных решений (планов) E и отсеивании подмножеств неперспективных решений.

Допустим, для плана Z определена целевая функция

$$F(Z) = \sum_{l=1}^{L} \varphi_l^* \, \Psi_l^{\prime}. \qquad (12)$$

Обозначим через C нижнюю границу (рекорд) для максимального (то есть оптимального) в смысле (10) значения $F(Z)$:

$$C \le \max F(Z). \qquad (13)$$

В этом случае алгоритм с использованием метода "ветвей и границ" будет состоять из следующих этапов:

1) Множество решений E разбиваем на некоторое число подмножеств $\{E'\}$, для каждого из которых определяют так называемую верхнюю границу B:

$$B \ge F(E') \text{ для всех } E' \in E. \qquad (14)$$

Тогда, если $B < C$ и для некоторого E' $\max\limits_{z \in E} F(Z) > F(E')$, то E' не содер жит оптимального решения.

2) Одно из неразбитых до конца подмножеств разбиваем на более мелкие, для каждого из которых вычисляем верхние границы B. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет получено подмножество, содержащее одну точку (план).

3) Пусть Z' – найденная точка. Вычисляем $F(Z')$, определяем нижнюю границу $C = F(Z')$ и заменяем её на относящуюся к этой точке верхнюю границу $F(Z') = B$.

4) Выбираем следующее неразбитое до конца подмножество и вычисляем для него верхнюю границу.

5) Процесс продолжаем до тех пор, пока либо найденное подмножество не будет состоять из одной точки, либо станет невозможным выбирать ни одно подмножество, так как все $B < C$.

В первом случае переходим к этапу 3, корректируя при этом значения C таким образом, чтобы оно было максимальным из всех найденных значений C (рекордов).

Во втором случае поиск прекращается, C принимается в качестве максимума функции F, получаем оптимальный план мероприятий Z^*, для которого $F(Z^*) = C$ будет решением задачи.

При использовании приведенного метода весьма важным является определение выражения для верхней границы B. Учитывая особенности настоящей задачи и специфики объекта оптимизации целесообразно в качестве оценки для B использовать выражение:

$$B = \sum_{r=1}^{l'} \varphi_l^* \Psi'_r + \frac{D - \sum_{r=1}^{l'} \varphi_r^* d_r}{d_{r+1}} \Psi'_{r+1}, \quad (15)$$

где l' – число первоначально вошедших в план мероприятий, дающих остаток, меньший стоимости следующего мероприятия:

$$D - \sum_{r=1}^{l'} \varphi_r d_r \le d_{r+1}. \quad (16)$$

Включение в план начинается с мероприятия, имеющего максимальную удельную эффективность:

$$\frac{\Psi'_r}{d_r} \ge \frac{\Psi'_{r+1}}{d_{r+1}}, \; r = \overline{1, R}. \quad (17)$$

Литература

1. ***Беленький В.М., Прус Ю.В.*** Методика оптимального планирования профилактических мероприятий в системе управления охраной труда // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып. 4 (51). 2013. http://ipb.mos.ru/ttb.

2. ***Гольдштейн Е.Г., Юдин Д.Б.*** Новые направления в линейном программировании. М.: Советское радио, 1966.

3. ***Вагнер Г.*** Основы исследования операций. М.: Мир, 1973.

4. ***Календарное*** планирование / Под ред. Д. Мута. М.: Прогресс, 1966.

5. ***Болтянский В.Г.*** Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1966.

6. ***Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю.*** Дискретное программирование. М.: Наука, 1969.