предназначена для использования при решении ряда проектных и эксплуатационных задач. К основным из них относятся:

– выбор оптимального варианта построения схемы линии и оснащения ее устройствами управления (определение количества, вида и мест размещения этих устройств на линии);

– выбор оптимального управления отдельными подпроцессами, входящими в состав процесса восстановления работоспособности линии;

– оценка основных показателей надежности работы линии и распределительной сети (коэффициенты готовности и технического использования);

– планирование объемов и периодичности предупредительных ремонтов;

– планирование численности персонала, необходимого для обслуживания линии и сети в целом.

В настоящее время с использованием изложенной методики составлены программы для ЭВМ ЕС по решению второй и (частично) первой из перечисленных задач.

Литература

1. П р у с с В.Л. Оценка эффективности резервирования и автоматизации распределительных сетей 10 кВ. — Энергетик, 1978, № 6. 2. Ф о м и ч е в Г.Т. Опыт создания автоматизированной системы диспетчерского управления электросетевых предприятий (АСДУ ПЭС) для аварийных режимов. — Энергетика и электрификация, 1977, № 1. 3. П р у с с В.Л., Н и ч и п о р о в и ч Л.В., С м и р н о в А.И. Выбор оптимального управления поиском повреждения в воздушных электрических сетях 10 кВ. — Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1978, № 4. 4. С м и р н о в А.И. Повышение приспособленности распределительной линии 10 кВ к отысканию повреждений. — Энергетика и электрификация, 1978, № 2.

УДК 621.311.004.67:681.3.06:51

В.И. Савин

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ РЕМОНТА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В связи с большой номенклатурой ремонтных работ, материальных и трудовых ресурсов и необходимостью координации большого числа ремонтных подрядных организаций оперативное планирование и управление капитальными ремонтами мощных энергоблоков представляет собой сложную задачу. Повысить эффективность управления в энергоремонте возможно с внедрением систем сетевого планирования и управления (СПУ) на базе современных ЭВМ. Основой автоматизированных систем СПУ являются специальные математические модели, позволяющие на их основе проводить расчеты и оптимизацию сетевых моделей. В статье предлагаются методы минимизации трудовых затрат на выполнение ремонта в директивные сроки и получения оптимальных календарных планов работ, обеспечивающих равномерную потребность в ремонтном персонале.

Математически эти задачи записываются следующим образом. Пусть сетевая модель ремонта энергоблока (агрегата) задана конечным ориентированным графом $G = G(X, U)$, где $X = \{a, \dots, z\}$ — множество вершин-событий, а $U = \{(x, y) / (x, y) \in X\}$ — множество дуг-работ, соединяющих эти вершины. Предполагаем, что a — единственная начальная, а z — единственная конечная вершина графа. Для каждой работы заданы три набора чисел.

Первый набор соответствует одному числу $V(x, y)$ — трудоемкости работы, выраженной в человеко-часах. Она определяется по нормативам трудозатрат, либо экспертным путем исходя из физического объема работы.

Второй набор $\tilde{r}(x, y) = \{r_1, \dots, r_\omega\}$ — вектор кодов используемых ресурсов, компоненты которого соответствуют кодам специальностей рабочих ремонтного звена, занятого выполнением данной работы. На каждой работе может быть занято не более ω различных ресурсов.

Третий набор $s(x, y) = \{s_1^{min}, s_1^{opt}, s_1^{max}, \dots, s_\omega^{min}, s_\omega^{min}, s_\omega^{opt}, ч_\omega^{max}\}$ — вектор используемых ресурсов, компоненты которого соответствуют минимальной, оптимальной и максимальной численности специальностей рабочих, входящих в состав ремонтного звена. Минимальный состав звена для данной работы определяется по нормативам трудозатрат. Оптимальный — исходя из необходимости выполнения данного фронта работы и обеспечения высокой производительности труда. Максимальный — исходя из необходимости выполнения данного объема работы в кратчайший срок. При этом возможно снижение производительности труда. Для энергоремонтного производства предпочтительны варианты составов ремонтных звеньев, приведенные в табл. 1.

В зависимости от состава ремонтного звена и режима сменности трудоемкость определяет продолжительность работы $\tau(x, y)$, которая вычисляется по формуле

$$\tau(x,y) = \frac{V(x, y)}{8{,}2R^{(i)}(x, y)}, \tag{10}$$

где 8,2 — длительность рабочей смены в часах; $R^{(i)}(x, y)$ — суммарная численность рабочих по работе (x, y) по i-му варианту. Продолжительность каждой работы $\tau(x, y)$ по условиям технологии имеет верхний и нижний предел:

$$d(x, y) \leqslant \tau(x,y) \leqslant D(x, y), \quad (x, y) \in U. \tag{11}$$

Т а б л и ц а 1. Варианты составов ремонтных звеньев

Режим сменности	Формулы для вычисления численности ремонтного персонала по работе	
Односменный	$R^{(1)} = \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{min}$	(1)
,,	$R^{(2)} = \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(2)
Двухсменный	$R^{(3)} = \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{min} + \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(3)
,,	$R^{(4)} = 2\sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(4)
Трехсменный	$R^{(5)} = \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{min} + 2\sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(5)
,,	$R^{(6)} = 3\sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(6)
,,	$R^{(7)} = \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{max} + 2\sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(7)
,,	$R^{(8)} = 2\sum_{r=1}^{\omega} s_r^{max} + \sum_{r=1}^{\omega} s_r^{opt}$	(8)
,,	$R^{(9)} = 3\sum_{r=1}^{\omega} s_r^{max}$	(9)

Полученный набор значений (точек), отражающих зависимость численности рабочих $R(x, y)$ по работе (x, y) от продолжительности $\tau(x,y)$ аппроксимируется выпуклой кусочно-линейной функцией методом выпуклых оболочек [1], которая может быть записана в виде

$$R(x,y)\,[\tau(x,y)] = \max_{1\leqslant i\leqslant n} \left\{-c^{(i)}(x,y)\,\tau(x,y) + b^{(i)}(x,y)\right\}. \quad (12)$$

Здесь $\infty > c^{(1)}(x,y) > c^{(2)}(x,y) > ... > c^{(n)}(x,y) \geqslant 0$, где $c^{(i)}(x,y)$ – коэффициент, характеризующий относительный прирост численности ремонтного персонала при сокращении $\tau(x,y)$ на $[i, i+1]$-м участке ломаной функции.

С помощью введения дополнительных дуг от события x к событию y по одной дуге на каждую точку излома функции (12) можно свести нелинейную задачу к линейной. Если сокращение продолжительности $\tau(x,y)$ работы (x, y) может быть достигнуто за счет увеличения численности рабочих $R(x,y)$, то целью задачи является отыскание такого расписания работ

$\{\tau\ (x, y), A(x)\}$, которое мнимизирует суммарные трудовые затраты на выполнение всего ремонта за директивное время T:

$$\min \left\{ \sum_{(x,y)} [-c(x,y)\tau(x,y)+b(x,y)] \right\}. \tag{13}$$

При ограничениях:

$$\tau(x,y) + A(x) - A(y) \leqslant 0; \ (x, y) \in U; \tag{14}$$

$$A(z) - A(a) \leqslant T; \tag{15}$$

$$\tau(x, y) \leqslant D(x, y); \tag{16}$$

$$-\tau(x,y) \leqslant -d(x, y), \tag{17}$$

где $A(x)$, $A(y)$, $A(z)$, $A(a)$ – наиболее раннее время наступления событий соответственно x, y, z, a . Здесь неравенство (14) выражает то, что между событиями x и y должно пройти время, достаточное для выполнения работы (x, y) за τ (x, y). Условие (14) определяется формулой

$$A(y) = \max_{x} A(x) + \tau(x, y) \quad . \tag{18}$$

Условие (15) определяет, что величина критических путей в оптимальном плане не должна превышать заданного времени выполнения ремонта.

Математическая модель (13)...(17) является задачей параметрического линейного программирования. Сокращение продолжительности выполнения ремонта производится самым экономным способом: на каждом шаге с минимальным приростом затрат. Этот прирост определяется решением двойственной задачи максимизации потока в сети с ограничениями на пропускные способности дуг [2, 4]. В результате решения непрерывной задачи (13) ... (17) устанавливается целесообразная продолжительность работ сетевой модели $\{\tau\ (x, y)\ /\ (x, y) \in\ U\}$. Переход к дискретным вариантам продолжительностей работ осуществляется экстраполяцией τ (x, y) до ближайших точек.

В результате расчета сетевой модели ремонта и оптимизации ее по длительности простоя получается расписание работ, соответствующее наиболее ранним срокам их начал. При расчете потребности в ремонтном персонале по дням ремонта возможна существенная неравномерность потребления ресурсов как по общей численности, так и по отдельным профессиям.

Математическая модель выравнивания потребности в ремонтном персонале по нескольким специальностям с учетом специфических энергоремонтных ограничений использует метод усредненных расписаний [3]. Если момент начала работы (x, y) обозначить через $\alpha(x,y)$, то вектор $\alpha = \{(x, y)\ /\ (x, y)\ \in U\}$, называемый расписанием, вполне определит календарный план выполнения работ сетевой модели. При выборе очередной координаты расписания при помощи некоторой оценочной функции перебираются и оцениваются все допустимые положения данной работы. Фиксируется то значение $\alpha(x, y)$, которое доставляет локальный экстремум оценочной функции. На каждом шаге вычислений фиксируется выбранное значение $\alpha^*(x, y)$ для очередной работы. Полученное расписание $\alpha^* = \{\alpha^*(x,y)/(x, y) \in U\}$ принимается за решение задачи.

Для построения оценочной функции введем усредненное расписание $\alpha = \{\alpha(x, y)/(x, y) \in U\}$. Считаем, что для каждой работы (x, y) U величина $\alpha(x, y)$ может принимать с равной вероятностью целые значения из промежутка $[A(x), B(y)\ \tau\ (x, y)]$ независимо от других компонент расписания, где $A(x)$ – наиболее раннее время наступления событий x; $B(y)$ – наиболее поздний срок наступления события y. Тогда для каждого целого $\kappa \in [0, T-1]$ может быть подсчитана вероятность $p_K(x,y)$ выполнения работы (x, y) на интервале $[\kappa, \kappa+1)$:

$$p_K(x,y) = \begin{cases} \dfrac{d_K}{q_0} & \text{при } \kappa \in [A(x), B(y) - 1]; \\ & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \tag{19}$$

где q – число всех возможных положений работы (x, y); $d\kappa$ – число тех из них, при которых работа (x, y) ведется на отрезке $[\kappa, \kappa+1)$;

$$q = B(y) - A(x) - \tau(x,y) + 1. \tag{20}$$

Вероятности $p_K(x, y)$ используются для определения величины

$$\sigma_r(\kappa, \alpha) = \sum_{(x, y) \in U} p_K(x, y)\, s_r(x, y), \tag{21}$$

где $\sigma_r(\kappa, \alpha)$ – ожидаемая суммарная потребность в ресурсе r-го вида на интервале $[\kappa, \kappa+1)$ при рассматриваемом усредненном расписании α.

Отрезок $[t_1^j, t_2^j]$ назовем j-м интервалом связности [5] r-го ресурса, если:

$$\sigma_r(\kappa, \bar{a}) = \begin{cases} \neq 0, & t_1^j \leqslant \kappa < t_2^j; \\ = 0, & \kappa = t_1^j - 1,\ \kappa = t_2^j. \end{cases} \tag{22}$$

Длина j-го интервала связности r-го ресурса T_r^j равна

$$T_r^j = t_2^j - t_1^j. \tag{23}$$

Тогда выражение $\sum_{\kappa=t_1^j}^{t_2^j - 1} \sigma_r(\kappa, \alpha)$ определяется как математическое ожидание суммарной потребности в ресурсе r-го вида на j-м интервале связности, а $\sigma_r^{oj} = \dfrac{1}{T_r^j} \sum_{\kappa=t_1^j}^{t_2^j - 1} \sigma_r(\kappa, \alpha)$ – среднее потребление r-го ресурса на j-м интервале связанности. Запишем математическую модель задачи. Найдем расписание $\alpha=\{\alpha(x,y)/(x,y)\in U\}$, доставляющее минимум функционалу:

$$\min\left\{F(\alpha) = \sum_{r=1}^{\omega}\sum_{j=1}^{I_r}\frac{1}{T_r^j}\sum_{\kappa=t_1}^{t_2^j-1}[\sigma_r(\kappa,\bar{\alpha})-\sigma_r^{oj}]^2\right\}, \qquad (24)$$

при условиях:

$$\alpha(x,y)+\tau(x,y)\leqslant\alpha(y,v),\ (x,y)\in U,\ v\geqslant y; \qquad (25)$$

$$\alpha(a,x)\geqslant 0;\ x\geqslant a; \qquad (26)$$

$$\alpha(x,z)+\tau(x,z)\leqslant T;\ x\leqslant z; \qquad (27)$$

$$\frac{/U^{кр}/}{/U/}\leqslant 0{,}4; \qquad (28)$$

$$B_l(y)-A_l(y)\geqslant\varepsilon_l;\ l=1,\dots,m. \qquad (29)$$

Здесь целевая или оценочная функция (24) выражает по каждому r-му ресурсу минимум среднеквадратического отклонения математического ожидания суммарной потребности в ресурсе от средней величины потребления. Условие (25) выражает то, что между событиями x и y должно пройти время, достаточное для выполнения работы (xy) за τ (x, y) единиц времени. Условие (26) означает неотрицательность начального события сетевой модели. Условие (27) выражает то, что критическое время сетевой модели не должно превышать директивного срока. Неравенство (28) означает, что в оптимальном плане доля критических работ $/U^{кр}/$ не должна превосходить 40% общего числа работ сетевой модели. Условие (29) означает то, что для завершающего события любого l-го узла необходимо выдерживать фиксированный резерв ε_l.

Приведенные математические модели оптимизации сетевой модели энергоблока реализованы автором по специальным алгоритмам на универсальном алгоритмическом языке PL–I ЕС ЭВМ.

Литература

1. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. — М., 1974. 2. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. — М., 1966. 3. Ахмадеев Р.Х. Решение многоресурсной задачи сетевого планирования. — В сб.: Оптимизация. Новосибирск, 1973, вып. 10.