Доклады Академии наук СССР
1976. Том 229, № 2

УДК 66.01-192.001.57

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Член-корреспондент АН СССР В. В. КАФАРОВ, В. П. МЕШАЛКИН,
В. Л. ПЕРОВ, Л. П. ЛЯШЕНКО

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ КРУПНОТОННАЖНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одним из важнейших направлений повышения эффективности крупнотоннажных агрегатов является повышение надежности процессов их функционирования. В настоящей работе предложен метод повышения эффективности крупнотоннажных агрегатов на основе комплексной оптимизации надежности их процессов функционирования как путем оптимального поэлементного резервирования технологического оборудования химико-технологических систем (ХТС), так и путем разработки оптимальных графиков организации профилактических ремонтных работ оборудования этих систем. Задача комплексной оптимизации характеристик надежности крупнотоннажных агрегатов на основе оптимального резервирования и оптимального планирования текущих ремонтов формулируется следующим образом.

Найти максимальное значение критерия экономической эффективности $\mathcal{Э}$ от дополнительных капитальных вложений на повышение характеристик надежности ХТС, затраченных на реализацию оптимального резервирования и оптимального планирования планово-предупредительных ремонтов (ППР), т. е. необходимо определить:

$$\begin{gathered}\max \mathcal{Э}(\overline{Q}, \overline{X}),\\ \overline{Q}_{\text{опт}} \subset Q,\\ \overline{X}_{\text{опт}} \subset \overline{X}.\end{gathered} \tag{1}$$

Величина критерия $\mathcal{Э}$ является функцией характеристик надежности системы Q и количества резервных элементов X:

$$\begin{gathered}\overline{X}=(X_1, X_2, \ldots, X_i, X_N),\\ \overline{Q}=\overline{Q}(q_1, q_2, \ldots, q_i, q_N)\end{gathered} \tag{2}$$

при условии, что для всех $i=1, 2, \ldots, N$:

$$X_i>0, \quad 0<q_i<1, \tag{3}$$

где X_i — целое $\overline{X}$, $\overline{X}_{\text{опт}}$ — соответственно значения векторов состава варианта поэлементного резервирования и состава оптимального варианта резервирования элементов ХТС; $\overline{Q}$, $\overline{Q}_{\text{опт}}$ — соответственно значения векторов вероятности отказа и оптимальной вероятности отказа ХТС; N — число элементов рассматриваемой модели надежности в виде параметрического графа надежности (ПГН); $Q=f(q)$ зависит от особенностей технологической топологии ХТС, а также от надежности составляющих ее элементов и определяется топологической моделью системы в виде ПГН [1].

Величина критерия экономической эффективности определяется из следующего соотношения:

$$\mathcal{Э}=\left[\left(\frac{E_{\text{н}}K_1}{B_1}+C_1\right)-\left(\frac{E_{\text{н}}K_2}{B_2}+C_2\right)\right]B_2, \tag{4}$$

где B_j — выпуск продукции, являющийся функцией надежности системы; C_j — себестоимость единицы продукции; K_j — капитальные вложения в ХТС на реализацию резервирования и выполнение ППР; $E_н$ — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений. Индекс $j=1, 2$ соответственно обозначает величины для ХТС до и после определения оптимального резерва и оптимального графика ППР.

Величины B, $\bar{C}_1$, $\bar{C}_2$, K_1, K_2, входящие в (4), вычисляются по следующим уравнениям:

$$B=G(T-T_{\text{ппр}}-T_{\text{п}}), \tag{5}$$

$$T_{\text{п}}=\frac{T-T_{\text{ппр}}}{(m_{t_{\text{р}}}+m_{t_{\text{в}}})}\cdot m_{t_{\text{в}}}, \tag{6}$$

$$m_{t_{\text{р}}}=-T_0/\ln P. \tag{7}$$

Здесь $m_{t_{\text{р}}}$ — среднее время безотказной работы ХТС. Подставляя формулу (6) в (5), с учетом (7) получаем

$$B=[(T-T_{\text{ппр}})T_0G]/[T_0-m_{t_{\text{в}}}\cdot\ln P], \tag{8}$$

где G — производительность ХТС (тонн/час), T_0 — межремонтный период для ХТС в целом (час.), T — длительность рассматриваемого периода времени (час.), $T_{\text{ппр}}$ — длительность планово-предупредительных ремонтов ХТС в целом (час.).

В результате оптимального резервирования и введения оптимального графика текущих планово-предупредительных ремонтов происходит снижение себестоимости продукции до $\bar{C}_2$, которая определяется так:

$$\bar{C}_2=C^{(1)}+C^{(2)}\frac{B_1}{B_2}+C^{(3)}\frac{B_1}{B_2}\frac{K_1}{K_2}+C^{(4)'}, \tag{9}$$

$$C^{(4)'}=\left[\sum_{i=1}^{N}C_{1i}X_{i\,\text{опт}}M_i\right]\Big/B_2, \tag{10}$$

где C_{1i} — стоимость одного текущего ремонта i-го элемента; M_i — количество ППР i-го вида, которое определяется по уравнению

$$M_i=T/T_{i\,\text{опт}}=-T/[m_{t_{\text{р}_i}}\ln(1-q_i)]. \tag{11}$$

Капиталовложения в систему с резервом и с оптимальным резервом определяются по следующим формулам:

$$K_1=\sum_{i}^{N}K_{1i}X_i, \tag{12}$$

$$K_2=\sum_{i}^{N}K_{1i}X_{i\,\text{опт}}, \tag{13}$$

где K_{1i} — дополнительные капиталовложения в резервирование i-го элемента ХТС, X_i определяется на основе рассмотрения ПГН.

Задача комплексной оптимизации характеристик надежности ХТС представляет собой типичную многомерную задачу оптимизации, для которой предлагается следующий алгоритм. 1) На основании выбранного критерия (4) задаемся величиной относительной разности экономической эффективности

$$\delta^{э}=(Э-Э_{\max})/Э_{\max}. \tag{14}$$

2) Осуществляем поиск оптимального резерва, обеспечивающего экстремум критерию оптимальности (4) для оборудования, лимитирующего надежность ХТС и определенного в ходе системного анализа характеристик надежности ХТС ([2]), проведенного для рассматриваемой системы. 3) Расчет оптимальной вероятности отказа для элементов с выбранным опти-

мальным резервом. 4) Определение оптимальных межремонтных периодов, лежащих в основе составления оптимального графика ППР,

$$T_{i\,\text{опт}} = -m_{t_{p_i}} \ln(1 - q_{i\,\text{опт}}). \qquad (15)$$

5) Вычисление значения экономической эффективности для каждого шага итерации и относительной экономической эффективности (расчетной) $\delta^{(\text{р})}$. 6) Повторение расчета, т. е. поиск новых значений оптимальных резервов и оптимальных межремонтных периодов ППР, если не выполняется условие

$$\delta^{(\text{р})} \leqslant \delta^{(\text{з})}. \qquad (16)$$

Если условие (16) выполняется, то переходят к рассмотрению другого элемента ХТС.

Стратегия реализации приведенного алгоритма комплексной оптимизации характеристик надежности может быть представлена в виде двух-

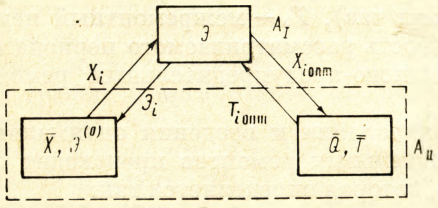


Рис. 1

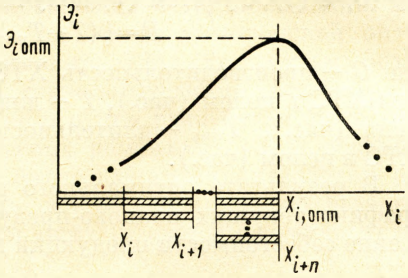


Рис. 2

Рис. 1. Двухуровневый, итерационный алгоритм задачи комплексной оптимизации характеристик надежности. A_I — центральный алгоритм, A_{II} — местный алгоритм

Рис. 2. К иллюстрации процедуры оптимизации в местном алгоритме A_{II}. Зависимость критерия эффективности $Э$ от количества резерва X, вводимого с целью повышения характеристик надежности ХТС

уровневого итерационного алгоритма рис. 1. В местном алгоритме A_{II} производится поиск оптимальных значений резерва (X) и оптимальных значений межремонтных периодов (Т). В центральном алгоритме A_I осуществляется вычисление критерия оптимальности $Э$ по выражению (4). Для определения в местном алгоритме оптимальных значений $\bar{X}$, $\bar{Q}$ (рис. 1) применяется метод максимального элемента ([3]), представляющий собой один из вариантов численной реализации метода множителей Лагранжа. Главное достоинство этого метода состоит в том, что решение задачи с большим числом переменных n сводится к решению n задач с одной переменной.

В соответствии с этим методом из всего числа N рассматриваемых элементов ХТС выбирается «максимальный элемент», т. е. такой элемент, вероятность отказа которого наибольшая. Такой выбор делается потому, что именно «максимальный элемент» наиболее сильно влияет на надежность системы и его необходимо резервировать или повысить его конструкционную надежность. Этому элементу i ($i=1, \ldots, N$) добавляется резерв. Затем в центральном алгоритме вычисляется значение критерия оптимальности $Э_i$ от введения резерва для рассматриваемого элемента, которое сравнивается с начальным значением $Э^0$. Процедура процесса оптимизации в местном алгоритме A_{II} осуществляется до тех пор, пока не будет найдено максимальное значение критерия эффективности от введения резерва. Типичная зависимость критерия эффективности от дополнительных капитальных вложений на повышение характеристик надежности оборудования ХТС от ввода резерва, иллюстрирующая процедуру оптимизации в местном алгоритме A_{II}, показана на рис. 2. Далее значение $X_{i\,\text{опт}}$ из централь-

ного алгоритма передается в местный, где вычисляются значения оптимальной вероятности отказа оборудования ХТС ($q_{i\,\text{опт}}$) и оптимальный межремонтный период, поступающие в центральный алгоритм, который в конечном итоге определяет комплексную экономическую эффективность как от оптимального резерва, так и от оптимально выбранного графика ППР для крупнотоннажных ХТС.

Московский химико-технологический институт
им. Д. И. Менделеева

Поступило
17 III 1976

ЛИТЕРАТУРА

[1] *В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др.*, ДАН, т. 215, № 2 (1974). [2] *В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др.*, ДАН, т. 219, № 3 (1974). [3] *A. S. Manne*, Operat. Res., v. 6, № 3 (1958).