

Член-корреспондент АН СССР В. В. КАФАРОВ, В. Л. ПЕРОЗ,  
В. П. МЕШАЛКИН, В. Н. ИГНАТОВ

## ДВУХУРОВНЕВЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Оптимизацию характеристик надежности химико-технологических систем (ХТС), определяемых с помощью системного анализа<sup>(1,2)</sup>, можно осуществить либо увеличением физической надежности элементов ХТС, либо увеличением надежности технологической топологии ХТС путем включения резервного технологического оборудования<sup>(3-5)</sup>. В настоящей работе предлагается метод определения оптимальных значений характеристик надежности ХТС с применением резервирования. На рис. 1 показано применение различных типов и видов резервирования<sup>(6)</sup>.

Дополнительные капитальные затраты на резервирование современных ХТС зависят от требуемых величин характеристик их надежности и могут достигать больших значений. В связи с этим возникает проблема определения оптимальных величин характеристик надежности ХТС. Решение указанной проблемы включает следующие этапы.

Первый этап — этап системного анализа уровня надежности ХТС<sup>(2)</sup> позволяет определить желаемые значения характеристик надежности системы, соответствующие требованиям к эффективности работы современных ХТС. При этом из всей совокупности характеристик, оценивающих

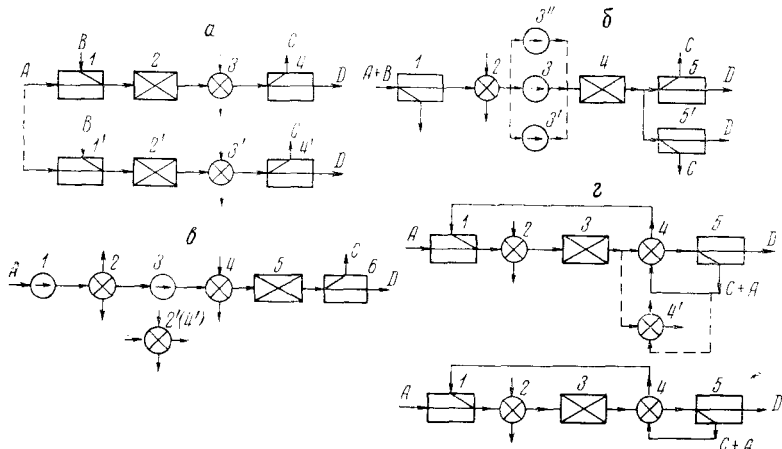


Рис. 1. Операторные схемы некоторых ХТС с резервированием: а — общее резервирование; б — поэлементное с целой кратностью; в — скользящее; г — поэлементное с дробной кратностью; А, В — исходное сырье; С, D — продукты; 1-5 — технологические операторы; 1'-5', 3'', 2' (4') — резервные элементы ХТС

уровень надежности системы, как правило, выбирается основная — вероятность безотказной работы ХТС (или надежность ХТС) на заданном интервале времени,  $P(t)$ . От этой характеристики зависят остальные вероятностно-статистические и эксплуатационные характеристики надежности ХТС, что не изменит основных положений рассматриваемого метода.

Формирование критерия оптимизации осуществляется с учетом того, что задача определения оптимальных значений характеристик надежности

ХТС представляет собой типичную двухуровневую задачу оптимизации, блок-схема общей методики решения которой изображена на рис. 2.

Центральный алгоритм  $A$  выбора оптимальных характеристик надежности системы с использованием глобального критерия оптимальности — экономической эффективности капитальных вложений в систему  $\mathcal{E}_{\text{год}}^{(j)}$  — передает на  $j$ -й итерации в местный алгоритм  $A_j$  оптимизации поэлементного резервирования ХТС по

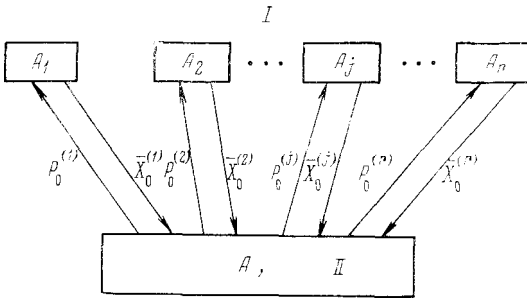


Рис. 2. Блок-схема общего алгоритма двухуровневой оптимизации характеристик надежности ХТС:  $I$  — оптимизация поэлементного резервирования системы;  $II$  — выбор оптимального значения характеристики надежности ХТС:  $A$  — центральный алгоритм;  $A_j$  — решение задачи  $i$ -го уровня оптимизации с применением местного алгоритма;  $P_0^{(j)}$  — задаваемая на  $j$ -й итерации величина характеристики надежности ХТС;  $\bar{X}_0^{(j)}$  — состав оптимального варианта поэлементного резервирования системы на  $j$ -й итерации;  $j=1, \dots, r$ ;  $r$  — число итераций

$= P_0^{(j+1)}$ , которое опять передается в местный алгоритм. Рассмотренный процесс продолжается, пока не будет достигнут максимум глобального критерия оптимизации.

В качестве локального критерия оптимизации приняты дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты на резервирование  $K_p(\bar{X})$ :

$$K_p(\bar{X}) = \sum_{i=1}^n (C_i + \theta_i) x_i = \sum_{i=1}^n k_i x_i, \quad (1)$$

где  $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  — состав варианта поэлементного резервирования ХТС;  $x_i$  — количество резервных элементов  $i$ -го типа;  $C_i + \theta_i = k_i$  — капитальные и эксплуатационные затраты в элемент  $i$ -го типа;  $i=1, \dots, n$ ;  $n$  — количество различных типов элементов в ХТС.

Для оптимального варианта резервирования ХТС должны выполняться: необходимое условие

$$P(\bar{X}_0^{(j)}) \geq P_0^{(j)} \quad (2a)$$

и достаточное условие

$$K_p(\bar{X}_0^{(j)}) = \min \sum_{i=1}^n k_i x_i^{(j)} \quad \bar{X}_0^{(j)} \in \bar{X}^{(j)}, \quad (2b)$$

где  $\bar{X}_0^{(j)} = \{x_{01}^{(j)}, x_{02}^{(j)}, \dots, x_{0i}^{(j)}, \dots, x_{0n}^{(j)}\}$  — состав оптимального варианта поэлементного резервирования ХТС для  $j$ -го заданного значения надежности системы  $P_0^{(j)}$ ;  $P(\bar{X}_0^{(j)})$  — надежность системы с резервом состава  $\bar{X}_0^{(j)}$ ;  $\bar{X}^{(j)} = \{x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_i^{(j)}, \dots, x_n^{(j)}\}$  — состав варианта поэлементного резер-

ного резервирования ХТС по локальному критерию оптимальности — капитальным и эксплуатационным затратам на резервирование ХТС  $K_p(\bar{X})$  величину итерационно задаваемого значения характеристики надежности  $P_0^{(j)}$ . Определенные с помощью местного алгоритма  $A_j$  состав оптимального варианта резервирования  $\bar{X}_0^{(j)}$  и величина минимума локального критерия оптимизации  $K_p(\bar{X}_0^{(j)})$  передаются в центральный алгоритм  $A$ . Используя их, получаем величину глобального критерия оптимизации  $\mathcal{E}_{\text{год}}^{(j)}$ . По величине  $\mathcal{E}_{\text{год}}^{(j)}$  осуществляется коррекция заданного значения характеристики надежности ХТС:  $P_0^{(j)} \pm \Delta P_0 =$

эирования ХТС, выполняющего условие (2а);  $x_i^{(j)}$  — количество резервных элементов  $i$ -го типа в варианте резервирования состава  $\bar{X}_0^{(j)}$ .

В качестве глобального критерия оптимальности выбрана экономическая эффективность дополнительных капитальных вложений, равная разности приведенных затрат в ХТС:

$$\mathcal{E}_{\text{год}}^{(j)} = \left[ \left( \frac{E_n \cdot K_1}{B_1} + C_1 \right) - \left( \frac{E_n \cdot K_2^{(j)}}{B_2^{(j)}} + C_2^{(j)} \right) \right] B_2^{(j)}, \quad (3)$$

где  $K_2^{(j)} = K_1 + K_p(\bar{X}_0^{(j)})$ ;  $K_1$  и  $K_2^{(j)}$  — соответственно капитальные вложения в систему без резерва и в систему с оптимальным поэлементным резервированием состава  $\bar{X}_0^{(j)}$ , руб;  $B_1$  и  $B_2^{(j)}$  — соответственно годовой выпуск продукции (т/год) в ХТС без резерва и с резервом;  $C_1$  и  $C_2^{(j)}$  — соответственно себестоимость продукции (руб/т), выпускаемой ХТС без резерва и с резервом;  $E_n$  — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений (для химической промышленности  $E_n = 0,12$  (?)).

Величину  $B_2^{(j)}$  можно определить, используя соотношение

$$B_2^{(j)} = Q(T - T_{\text{п.п.р.}} - T_n^{(j)}), \quad (4)$$

где  $Q$  — производительность ХТС (т/ч);  $T$  — календарное время ( $T = 5760$  ч/год);  $T_{\text{п.п.р.}}$  — общее время планово-предупредительных ремонтов в году (ч);  $T_n^{(j)}$  — общее потерянное производительное время для ХТС с резервом состава  $\bar{X}_0^{(j)}$  (ч).

В результате резервирования ХТС происходит снижение себестоимости продукции до значения  $C_2^{(j)}$ , которое определяется из анализа статей расхода калькуляции по производству данной продукции.

Оптимальное значение надежности ХТС с применением поэлементного резервирования должно отвечать максимуму глобального критерия оптимальности:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \max_{j=1, \dots, r} \mathcal{E}_{\text{год}}^{(j)}, \quad (5)$$

где  $r$  — количество итераций при решении задачи оптимизации уровня надежности ХТС.

Из соотношений (1), (2б), (3) и (5) следует, что резервируемые элементы ХТС являются дискретными оптимизирующими переменными рассматриваемой задачи оптимизации характеристик надежности ХТС, и их количество определяет сложность ее решения. Поэтому на следующем, третьем этапе рассматриваемого метода из общего числа элементов исходной ХТС в результате качественного исследования надежности технологической топологии системы с помощью параметрического потокового графа (п.п.г.) ХТС (3) выделяются элементы, лимитирующие надежность системы. Резервировать следует только лишь эти элементы ХТС.

На основе общего алгоритма решения задачи оптимизации характеристик надежности ХТС выбираются методы поиска экстремумов локального и глобального критериев оптимизации.

Для решения задачи I уровня оптимизации — для определения оптимального варианта поэлементного резервирования используется метод неопределенных множителей Лагранжа, отличающийся от других возможных методов (4) (наискорейшего спуска, динамического программирования и других) сравнительной простотой реализации на ЭВМ. Для решения задачи II уровня оптимизации — для выбора оптимальной величины надежности ХТС — применяется метод скапирования по ряду предварительно задаваемых значений надежности системы.

Математической моделью, устанавливающей влияние изменений в тех-

нологической топологии ХТС за счет ввода резервных элементов на величину ее надежности, является параметрический граф надежности (п.г.п.) ХТС (8). Его построение и коррекция осуществляется на пятом этапе метода оптимизации характеристик надежности ХТС.

На шестом этапе выполняется поиск оптимальной величины надежности ХТС. Применение метода неопределенных множителей Лагранжа после ряда промежуточных преобразований позволяет получить для первого приближения состава оптимального резервирования системы:

$$x_{i(1)} = (\ln q_i)^{-1} \ln \frac{\alpha_i}{\alpha_i + v_{(1)}^*} - 1, \quad (6)$$

где  $v_{(1)}^*$  — первое приближение модифицированного множителя Лагранжа;  $\alpha_i = k_i / \ln q_i$ ;  $q_i$  — вероятность отказа элемента ХТС  $i$ -го типа;  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — количество элементов ХТС различных типов.

С помощью скорректированного п.г.п. ХТС определяем величину надежности ХТС с резервом состава  $\bar{X}_{(1)}$

$$P(\bar{X}_{(1)}) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i^{x_{i(1)}+1}). \quad (7)$$

Если  $P(\bar{X}_{(1)}) < P_0$ , то поиск оптимального варианта резервирования необходимо продолжить, используя следующее рекуррентное соотношение для  $m$ -го шага оптимизации ( $m \geq 2$ ):

$$v_{(m+1)}^* = v_{(m)}^* + (v_{(m)}^* - v_{(m-1)}^*) \frac{P_0 - P(\bar{X}_{(m-1)})}{P(\bar{X}_{(m)}) - P(\bar{X}_{(m-1)})}. \quad (8)$$

Найденное с помощью (8) значение  $v_{(m+1)}^*$  используется для определения  $\bar{X}_{(m+1)}$  из соотношения (6) и т. д. Этот процесс итеративно осуществляется до выполнения на  $N$ -м шаге оптимизации условия

$$\left| \prod_{i=1}^n (1 - q_i^{x_{i(N)}+1}) - P_0 \right| \leq \varepsilon. \quad (9)$$

После этого, в соответствии с общим алгоритмом двухуровневой оптимизации (рис. 2), выполняются итерации центрального алгоритма по выбору оптимальной величины надежности ХТС.

Решение задачи двухуровневой оптимизации завершается при выполнении условия (5). В результате определяется состав поэлементного резервирования, обеспечивающий оптимальное значение надежности ХТС. Найденный резерв необходимо определенным образом технически включить в реальную ХТС. Этой цели служит разработка рекомендаций по практической реализации резервирования ХТС. При этом осуществляется совместный учет ряда факторов, отражающих технологические особенности элементов и ХТС в целом (физико-химическая сущность технологических процессов; стабильность параметров технологических потоков и др.). Это позволит выбрать вид резервирования элементов системы (рис. 4).

Предложенный метод оптимизации характеристик надежности ХТС позволяет наиболее целесообразно распределить дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты на поэлементное резервирование системы, обеспечивающее оптимальную величину ее надежности.

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

Поступило  
2 VII 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин, Принципы математического моделирования химико-технологических систем, М., 1974. <sup>2</sup> В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др., ДАН, т. 219, № 3 (1974). <sup>3</sup> В. В. Кафаров, В. Л. Перов, ДАН, т. 212, № 5, 1168 (1973). <sup>4</sup> C. F. King, D. F. Rudd, Am. Inst. Chem. Eng. J., v. 18, № 2 (1972). <sup>5</sup> K. Konoki, J. Chem. Eng. Japan, v. 4, № 1, 77 (1971). <sup>6</sup> А. Ф. Зубова, Надежность машин и аппаратов химических производств, Л., 1971. <sup>7</sup> Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений, М., 1969. <sup>8</sup> В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др., ДАН, т. 215, № 2, 399 (1974).