

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

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Совокупность вероятностно-статистических и эксплуатационных характеристик надежности элементов и химико-технологических систем (ХТС) в целом, которые определяются с помощью статистических соотношений⁽¹⁾, оценивает уровень надежности систем. К указанным характеристикам надежности относятся: вероятности безотказной работы на некотором интервале времени, $p=p(t_{p_i})$; среднее время безотказной работы, $m_{t_p}=m_{t_p}(t_{p_i})$; среднее время восстановления работоспособности после отказа, $m_{t_n}=m_{t_n}(t_{n_i})$; интенсивность (опасность) отказов, $\lambda=\lambda(t_{p_i})$; коэффициент технического использования, $K_{ти}=K_{ти}(t_{p_i}; t_{n_i})$; коэффициент готовности к эксплуатации, $K_r=K_r(t_{p_i}; t_{n_i})$ и коэффициент использования оборудования, $K_n=K_n(t_{p_i}; t_{n_i})$, где t_{p_i} — продолжительность безотказной работы элемента ХТС между i -м и $(i+1)$ -м отказами (ч); t_{n_i} — продолжительность внепланового ремонта элемента ХТС после i -го отказа (ч).

Для решения задачи анализа уровня надежности ХТС в целом предлагается системный анализ характеристик надежности ХТС, включающий основные этапы: I — изучение процесса функционирования ХТС и определение величин вероятностно-статистических и эксплуатационных характеристик надежности отдельных элементов ХТС; II — качественное и количественное исследование надежности ХТС и III — принятие научно-технических и инженерных решений по повышению уровня надежности ХТС.

На первом этапе осуществляется сбор, накопление и систематизация статистических данных, характеризующих надежность элементов и ХТС в целом на некотором интервале времени периода нормальной эксплуатации. Эти данные берутся из эксплуатационных документов о процессах функционирования и об отказах действующих ХТС.

Метод сбора, накопления и систематизации статистических данных об отказах элементов ХТС включает следующее. Собираются данные о моментах отказов элементов и ХТС в целом. Необходимо также принимать во внимание намеченный план выпуска готовой продукции, ритмичность ее отгрузок со складов потребителям; наличие резервных элементов ХТС.

При систематизации собранных статистических данных необходимо выделить следующие типы состояний элементов ХТС (рис. 1): 1) безотказная работа элемента с осуществлением требуемых технологических функций с заданными параметрами ($m=1$); 2) простой элемента в резерве (при наличии в ХТС резервного технологического оборудования) — резервный элемент ХТС находится в работоспособном состоянии и ожидает момента включения в технологический процесс взамен основного элемента при его отказе или планово-предупредительном ремонте ($m=2$); 3) состояние простоя элемента по организационно-техническим причинам ($m=3$); 4) отказ элемента, сопровождаемый остановкой элемента или ХТС в целом^(2, 3) для выполнения внепланового восстановительного ремонта отказавшего оборудования ($m=4$); 5), 6) и 7) простой элемента ХТС соответственно в период текущего, среднего и капитального планово-предупредительного ремонта ($m=5, 6, 7$, m — условный код состояния).

Систематизированные статистические данные о моментах смен состояний элемента ХТС представляются в форме матрицы состояний элемента ХТС $[S]_l$, где l — номер элемента ХТС: $l=1, \dots, v$; v — количество элементов в системе. Матрица $[S]_l$ имеет размер $[(1 \times 5); (1 \times K_l)]$, где K_l — число смен состояний l -го элемента ХТС за период наблюдений. Столбец $[s_{ij}]_l$ матрицы $[S]_l$ содержит информацию о j -м состоянии l -го элемента ХТС с начала наблюдения и имеет следующий вид:

$$[s_{ij}]_l = [s_{1j}; s_{2j}; s_{3j}; s_{4j}; s_{5j}]_l^T,$$

где элементы $s_{1j} - s_{4j}$ характеризуют момент времени, когда l -ый элемент переходит из $(j-1)$ -го в j -е состояние: s_{1j} — год, s_{2j} — месяц, s_{3j} — дата, s_{4j} — час перехода l -го элемента ХТС из $(j-1)$ -го в j -е состояние; s_{5j} — условный код j -го состояния l -го элемента ХТС; $s_{5j} = m = 1, \dots, r$; $r \leq 7$ — количество наблюдаемых различных состояний l -го элемента ХТС; $j = 1, \dots, K_l$.

Обработка статистических данных, представленных в форме матриц $[S]_l$, заключается в расчете значений вероятностно-статистических и эксплуатационных характеристик надежности элементов ХТС, а также в определении законов распределения времени безотказной работы и времени восстановления элементов ХТС. Поскольку величины t_{p_i} и t_{B_i} определяемые из матриц $[S]_l$, являются случайными величинами, для средних значений характеристик надежности, вычисленных с помощью статистических соотношений ⁽¹⁾, необходимо определить доверительные интервалы, внутри границ которых с заданной вероятностью заключены их истинные значения ⁽²⁾. Это является важным при определении оптимальных сроков проведения плано-предупредительных ремонтов ХТС. Верх-



Рис. 1

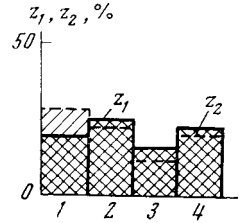


Рис. 2

Рис. 1. Диаграмма типов смены состояний некоторого элемента ХТС в период нормальной эксплуатации $t_H(t_H)$ — момент начала (окончания) наблюдений: 1 — безотказная работа; 2 — резерв; 3 — простой по организационно-техническим причинам; 4 — внеплановый ремонт для устранения последствий отказа; 5, 6, 7 — соответственно текущий, средний, капитальный плано-предупредительные ремонты

Рис. 2. Диаграммы распределения удельных весов типов отказов отдельных элементов некоторой ХТС в общем числе отказов z_1 (а) и в общем времени внеплановых ремонтов z_2 (б): 1 — технологические отказы; 2 — механические отказы; 3 — отказы элементов систем автоматического регулирования и контроля; 4 — прочие отказы

ние и нижние границы доверительных интервалов для характеристик надежности — m_B и m_H определяют, используя квантили χ^2 -распределения ⁽⁵⁾:

$$m_B = \frac{2 \cdot n \cdot \bar{m}_t}{\chi^2_{2n; 1-(1-p)/2}}; \quad (1)$$

$$m_H = \frac{2 \cdot n \cdot \bar{m}_t}{\chi^2_{2n; 1-p/2}}; \quad (2)$$

где \bar{m}_t — среднее значение характеристики надежности элемента ХТС, например, среднее время безотказной работы или среднее время восстанов-

ления элемента ХТС; p — коэффициент (уровень доверия; $(1-p)$ — доверительная вероятность); $\chi^2_{2n, 1-(1-p)/2}$ и $\chi^2_{2n, 1-p/2}$ — значения квантилей χ^2 -распределения.

Обработка статистических данных с использованием матриц $[S]_i$ осуществляется следующим образом.

Предварительно выполняются операции вычисления времени пребывания элемента ХТС в j -м состоянии:

$$t_j = \tau_{j+1} - \tau, \quad (3)$$

и формирования суммы продолжительностей пребывания в состоянии m -го вида:

$$x_m = \sum_{i=1}^{N_m} t_{m_i}, \quad (4)$$

где τ_j и τ_{j+1} — соответственно моменты перехода элемента ХТС в j -е и $(j+1)$ -е состояние; t_{m_i} — продолжительность пребывания в i -м состоянии m -го вида; N_m — количество наблюдавшихся состояний m -го вида; $m=1, 2, \dots, 7$.

В результате предварительной статистической обработки матрицы $[S]_i$ формируем матрицы времени восстановления $[T_v]$ и времени безотказной работы элемента ХТС $[T_p]$ и вычисляем вероятностно-статистические и эксплуатационные характеристики надежности элемента ХТС, а также верхние и нижние границы их доверительных интервалов.

С целью прогнозирования моментов возникновения отказов элементов ХТС, являющихся случайными величинами, и для оценки времени, требуемого для восстановления работоспособности элементов ХТС после отказа, необходимо знать законы распределения этих случайных величин. Для определения закона распределения можно использовать два способа — аналитический и графический. По аналитическому способу на следующей стадии обработки статистических данных по формулам (5а) и (5б) осуществляется расчет оценок коэффициентов вариации β_1 и β_2 , определяющих вид и параметры закона распределения ⁽⁶⁾:

$$\beta_1 = \left[\frac{1}{n-f} \sum_{i=1}^{n-f} (t_i - \bar{m}_i)^3 \right]^2 \left[\frac{1}{n-f} \sum_{i=1}^{n-f} (t_i - \bar{m}_i)^2 \right]^{-3}, \quad (5a)$$

$$\beta_2 = \left[\frac{1}{n-f} \sum_{i=1}^{n-f} (t_i - \bar{m}_i)^4 \right] \left[\frac{1}{n-f} \sum_{i=1}^{n-f} (t_i - \bar{m}_i)^2 \right]^{-2}, \quad (5б)$$

где t_i — i -й элемент матрицы $[T_p]$ ($[T_v]$); n — размерность матрицы $[T_p]$ ($[T_v]$); f — количество исключенных резко выделяющихся (экстремальных) элементов матрицы $[T_p]$ ($[T_v]$).

По графическому способу для оценки вида закона распределения необходимо рассчитать и построить гистограммы для времени безотказной работы и для времени восстановления элемента ХТС. Гистограмма характеризует относительную частоту $v_i = n_i/n$ появления случайной величины, имеющей величину t_{p_i} или t_{v_i} , в общей совокупности $[T_p]$ или $[T_v]$, где

$n = \sum_{i=1}^e n_i$ — размерность матрицы $[T_p]$ ($[T_v]$); n_i — количество случайных

величин, равных t_{p_i} (t_{v_i}); e — количество групп. Наряду с обработкой статистических данных об отказах элементов ХТС на первом этапе системного анализа осуществляется изучение технологической топологии ХТС. По его результатам строится параметрический потоковый граф (п.п.г.) ХТС ⁽⁷⁾.

Первый этап системного анализа характеристик надежности ХТС завершается качественным технологическим анализом типов отказов отдельных элементов ХТС. Он включает исследование причин отказов элементов системы, изучение взаимовлияния отказов и определение их последствий.

В соответствии с принятой классификацией отказов элементов и ХТС в целом можно выделить следующие типы отказов отдельных элементов: 1) технологические отказы, связанные с нарушением норм технологического режима или с выходом из строя основного технологического оборудования; 2) механические отказы, заключающиеся в нарушении работоспособности компрессорного, насосного и электрического оборудования ХТС; 3) отказы элементов системы автоматического регулирования и контроля и 4) прочие отказы. На рис. 2 приведены примеры диаграмм, показывающих распределение удельных весов (z_1 и z_2) типов отказов отдельных элементов ХТС для некоторой ХТС.

Качественный технологический анализ отказов элементов и ХТС в целом позволяет выявить элементы ХТС с относительно небольшим числом отказов, но требующие большего по сравнению с другими элементами системы времени для восстановления своей работоспособности. Необходимо выяснить причину этого и, если возможно по техническим условиям, разработать меры по ускорению ремонтов этих элементов ХТС и ликвидировать тем самым «узкие места» системы, лимитирующие ее надежность.

Изучение взаимовлияния отказов отдельных элементов ХТС на их работоспособность и надежность системы в целом позволяет построить топологическую модель надежности ХТС в форме параметрического графа надежности (п.г.н.) ХТС⁽³⁾. П.п.г. ХТС и п.г.н. ХТС используются при качественном и количественном исследовании ХТС на втором этапе системного анализа характеристик надежности ХТС^(2, 3).

Результаты двух этапов системного анализа характеристик надежности ХТС делают возможной научно обоснованную разработку организационно-технических мероприятий по повышению уровня надежности ХТС. Их целью является составление оптимальных графиков планово-предупредительных ремонтов, определение путей реализации неиспользуемого резерва производительного времени, позволяющих резко снизить потери продукции путем повышения надежности процессов функционирования элементов и ХТС в целом.

Предложенные принципы системного анализа характеристик надежности ХТС позволяют разработать вычислительные алгоритмы и программы для осуществления исследования надежности элементов и ХТС в целом с помощью ЭВМ, необходимые для математического обеспечения автоматизированной системы проектирования химических производств (а.с.п.хим.).

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

Поступило
2 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. К. Горский, Статистические алгоритмы исследования надежности, «Наука», 1970. ² В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др., ДАН, т. 212, № 5, 1973 (1168). ³ В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др., ДАН, т. 215, № 2, 1974, 399. ⁴ Справочник по надежности, под ред. Б. Левина, М., 1969. ⁵ Е. С. Венгцель, Л. А. Овчаров, Теория вероятностей, «Наука», 1973. ⁶ Г. Хан, С. Шапиро, Статистические модели в инженерных задачах, М., 1969. ⁷ В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин, Принципы математического моделирования химико-технологических систем, М., 1974.