

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

## МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для количественного анализа надежности химико-технологических систем (ХТС) и отдельных элементов (аппаратов) ХТС, т. е. для определения их вероятностно-статистических характеристик надежности применяют методы теории вероятности и математической статистики с использованием модели надежности системы в виде так называемых блок-схем надежности, методика построения которых для ХТС произвольной технологической топологии отсутствует (<sup>1-4</sup>). До настоящего времени не предложена модель ХТС, при помощи которой можно было бы формализовать количественный анализ надежности ХТС произвольной технологической топологии. Разработка такой модели имеет особенно важное значение при анализе надежности на стадии проектирования ХТС крупнотоннажных агрегатов, так как ненадежная работа таких систем, сопровождаемая даже кратковременным выходом из строя отдельных аппаратов, приведет к значительным потерям сырья и энергии, что существенно уменьшит экономическую эффективность ХТС.

В настоящей работе предлагается метод количественного анализа надежности ХТС, основанный на построении топологической модели системы в виде параметрического графа надежности (п.г.н.) ХТС и использовании символического исчисления. При этом предполагаем, что отказы всех элементов (аппаратов) ХТС независимы, а отказ каждого элемента приводит к нарушению работоспособности некоторой подсистемы или ХТС в целом. Выделим два вида отказов ХТС. Отказ ХТС первого вида заключается в снижении производительности системы ниже заданной. Отказ ХТС второго вида соответствует событию, заключающемуся в полном прекращении выпуска продукции, т. е. в выходе системы из строя. Например, для ХТС, операторная схема которой представлена на рис. 1, отказ первого вида наступает при выходе из строя любого технологического оператора (элемента ХТС) (<sup>5</sup>). Отказ рассматриваемой ХТС второго вида вызывают либо отказ одного из следующих технологических операторов: оператора смешения (1), оператора химического превращения (3) и оператора разделения (6), либо одновременный отказ группы параллельно работающих операторов химического превращения (2, 4 и 5). Отказ оператора нагревания — охлаждения (7) не приводит к отказу ХТС второго вида.

В соответствии с принятыми предположениями разделим элементы ХТС на три класса по влиянию их отказов на надежность функционирования системы в целом, I — элементы, отказы которых не приводят к снижению производительности ХТС; II — элементы, при отказе которых наступает отказ ХТС первого вида и III — элементы, отказы которых вызывают отказ ХТС второго вида.

Предлагаемая для количественного анализа надежности ХТС топологическая модель в виде п.г.н. ХТС представляет собой неориентированный граф, каждое  $i$ -е ребро которого соответствует  $i$ -му элементу ХТС, характеризующему вероятностью безотказной работы  $p_i \leq 1$ , а вершины п.г.н. отображают наличие технологических и информационных связей в ХТС, которые считаем абсолютно надежными,  $p_{об} = r = 1$ . Положение ребер в п.г.н. оп-

ределяется тем, каким образом отказы элементов, которым соответствуют эти ребра графа, влияют на работоспособность системы в целом, что выявляется в результате предварительного качественного анализа надежности системы.

Вероятность безотказной работы ХТС  $P$  в соответствии с условием независимости отказов системы определяем следующим образом:

$$P = P_1 \cdot P_2, \quad (1)$$

где вероятности  $P_1$  и  $P_2$  определяем с помощью п.г.н., построенных для одной технологической схемы ХТС соответственно для отказа системы первого вида ( $P_1$ ) и для случая отказа второго вида ( $P_2$ ). Очевидно, что  $P_1 \leq P_2$ ,

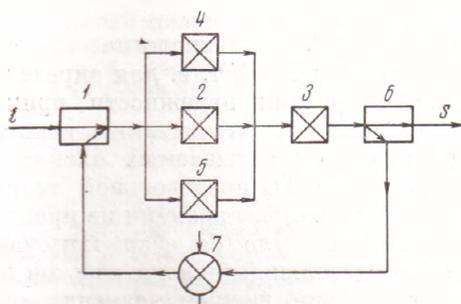


Рис. 1

Рис. 1. Операторная схема химико-технологической системы:  $i$  — исходные реагенты;  $S$  — готовый продукт; 1 — оператор смешения; 2–5 — операторы химического превращения; 6 — оператор разделения; 7 — оператор нагревания — охлаждения

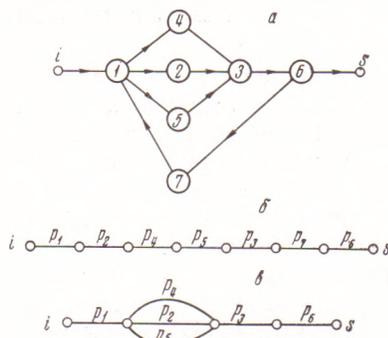


Рис. 2

Рис. 2. Параметрический потоковый граф (а) и параметрические графы надежности (б, в) химико-технологической системы (рис. 1)

ибо, как показывает анализ статистических данных об отказах ХТС, полное прекращение выпуска продукции происходит значительно реже, чем снижение производительности.

Методика построения п.г.н. ХТС для отказов ХТС первого или второго видов по исходному параметрическому потоковому графу (п.п.г.) ХТС (<sup>5-7</sup>) состоит в следующем.

В п.п.г. ХТС определяем вершины, соответствующие таким элементам системы, отказы которых приводят к отказу ХТС в целом, т. е. выделяем вершины п.п.г., соответствующие элементам основного технологического соединения системы от входа сырья ( $i$ ) до выхода готовой продукции ( $s$ ). Этим вершинам ставим в соответствие последовательное соединение ребер п.г.н., так как при отказе любого элемента основного технологического соединения происходит нарушение работоспособности ХТС в целом. Далее выделяем вершины п.п.г., которые соответствуют резервным элементам системы. Эти вершины отображаем в п.г.н. в виде ребер, располагаемых параллельно ребрам основного соединения, потому что отказ резервированной подсистемы ХТС возникает лишь при одновременном выходе из строя ее основного и резервного элементов. Вершины п.п.г., соответствующие элементам ХТС, не являющимся резервными по отношению к элементам основного технологического соединения системы и отказы которых не приводят к отказу ХТС первого или второго видов, не отображаются в п.г.н. При расчете вероятности отсутствия рассматриваемого вида отказа ХТС характеристики надежности этих элементов не учитываются. Таким образом, в общем случае, независимо от вида отказа ХТС, для различных вариантов структуры п.п.г. возможны структуры п.г.н., представляющие только лишь последовательное, параллельное или последовательно параллельное соединение ребер.

Для ХТС (рис. 1) соответствующие ей п.г.н. для отказов первого и второго видов, построенные по исходному п.п.г. (рис. 2, а), представлены на рис. 2, б, в.

Отказы ХТС первого или второго видов могут происходить не только в случае отказов элементов (аппаратов) ХТС, но и в результате отказов технологических связей: разрывов, замерзания или забивания трубопроводов, пропусков в сварных соединениях и т. п. Для количественного анализа надежности ХТС с учетом надежности технологических связей между элементами системы будем применять топологическую модель ХТС в виде дуального п.г.н. ХТС.

Дуальный п.г.н. — это неориентированный граф, в котором каждому  $j$ -му ребру, отображающему  $j$ -ю технологическую связь, соответствует число  $r_j \leq 1$ , равное вероятности исправного состояния этой технологической связи. Построение дуального п.г.н. осуществляется в соответствии с общей методикой построения п.г.н. ХТС, но только по отношению к технологическим связям ХТС, которым соответствуют ветви исходного п.п.г.

Для определения вероятностей отсутствия отказов ХТС первого или второго видов ( $P_1$  или  $P_2$ ) по топологии п.г.н. будем использовать символическое исчисление<sup>(8)</sup>. В символическом исчислении приняты условные операции сложения и умножения:

$$p_i \otimes p_j \rightarrow p_i \cdot p_j, \quad (2)$$

$$p_i \oplus p_j \rightarrow p_i + p_j - p_i \cdot p_j, \quad (3)$$

где  $\otimes$  — условная операция умножения для определения вероятности безотказной работы элементов ХТС, которым в п.г.н. соответствует последовательное соединение ребер (элементарная цепь графа);  $\oplus$  — условная операция сложения для определения вероятности безотказной работы элементов ХТС, которым в п.г.н. соответствуют параллельные ребра (элементарный цикл графа).

Применение символического исчисления позволяет формализовать определение вероятности безотказной работы ХТС произвольной структуры по топологии п.г.н. системы:  $P^*(t) = f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t))$ , где  $p_i(t)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента ХТС;  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — число элементов ХТС. Значение величины  $P^*(t)$ , представленное в символической форме, сохраняет информацию о топологии п.г.н., в отличие от окончательной алгебраической формы, которая не отражает топологические характеристики п.г.н. и не вскрывает влияние надежности отдельных элементов ХТС на надежность безотказного функционирования системы в целом.

Таким образом, разработанный метод количественного анализа надежности ХТС, основанный на построении п.г.н. и использовании символического исчисления, состоит из следующих основных этапов: осуществить предварительный качественный анализ отказов ХТС в целом; классифицировать элементы ХТС по влиянию их отказов на надежность функционирования ХТС; построить топологическую модель ХТС в виде п.г.н. ХТС в соответствии с разработанной методикой; определить с помощью п.г.н. и символического исчисления вероятности отсутствия отказов ХТС первого и второго видов; вычислить вероятность безотказной работы ХТС в целом.

В качестве примера определим для ХТС (рис. 1) вероятность отсутствия отказа второго вида с помощью п.г.н. (рис. 2, в) и операций символического исчисления (2) и (3);

$$P_2^*(t) = p_1 \otimes [(p_2 \oplus p_4) \oplus p_5] \otimes p_3 \otimes p_6 \rightarrow p_1 p_2 p_3 p_6 + p_1 p_3 p_4 p_6 - p_1 p_2 p_3 p_4 p_6 + \\ + p_1 p_3 p_5 p_6 - p_1 p_2 p_3 p_5 p_6 - p_1 p_3 p_4 p_5 p_6 - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6.$$

Благодаря предложенному методу количественного анализа надежности ХТС формализуется определение вероятностно-статистических характеристик надежности ХТС, что позволяет довольно легко оценивать надежность различных вариантов структуры технологических связей ХТС на

стадиях проектирования и эксплуатации с целью выбора наиболее надежного варианта технологической схемы. Предположенный метод дает возможность выявить «узкие» места в ХТС, т. е. определить физическую надежность каких элементов и технологических связей необходимо повысить или для каких элементов и технологических связей необходимо провести дополнительное резервирование, чтобы обеспечить требуемую надежность ХТС.

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

Поступило  
2 X 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. Уилсон, М. Уилсон, Информация, вычислительные машины и проектирование систем, М., 1968. <sup>2</sup> С. F. King, D. F. Rudd, Am. Inst. Chem. Eng., J., 18, № 2 (1972).  
<sup>3</sup> А. Ф. Зубова, Надежность машин и аппаратов химических производств, Л., 1971.  
<sup>4</sup> Н. М. Дубинский, Надежность систем газоснабжения, Киев, 1970. <sup>5</sup> В. В. Кафаров, Методы кибернетики в химии и химической технологии, М., 1971. <sup>6</sup> Н. М. Жаворонков, В. В. Кафаров и др., Теоретич. осн. химич. технол., 4, № 2 (1970). <sup>7</sup> В. Ш. Мешалкин, Автореф. кандидатской диссертации, МХТИ им. Д. И. Менделеева, М., 1971.  
<sup>8</sup> П. Халмош, Теория меры, ИЛ, 1953.