

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

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В связи со значительным увеличением мощности оборудования химико-технологических систем (х.т.с.) возникает задача разработки методов анализа надежности проектируемых х.т.с., а также методов организации и планирования ремонтов оборудования в период эксплуатации системы. Надежность х.т.с. представляет собой свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя требуемые эксплуатационные характеристики в течение определенного времени. Надежность х.т.с. зависит от общего количества элементов системы и от интенсивности их отказов. При этом отказом х.т.с. (элемента х.т.с.) будем называть событие, заключающееся в нарушении работоспособности, т. е. в потере системой (элементом) способности выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

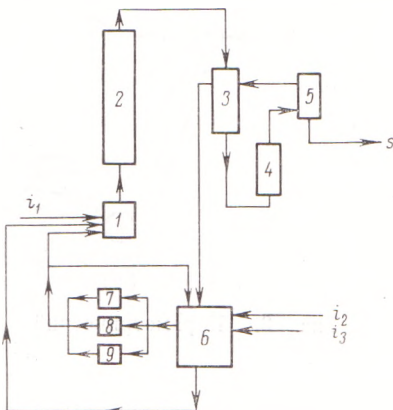
При анализе надежности х.т.с. можно выделить эксплуатационную надежность х.т.с. и надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами (а.с.у. т.п. или а.с.у. х.т.с.). Эксплуатационная надежность х.т.с. зависит от качества конструкционных материалов, от достоверности исходной информации о параметрах технологического режима, принятых при проектировании х.т.с., а также от качества монтажа, эксплуатации и ремонта элементов х.т.с. Надежность а.с.у. х.т.с. определяется качеством работы контрольно-измерительных приборов и зависит от правильности выбора каналов управления, а также от принятых алгоритмов управления.

Указанные виды надежности х.т.с. количественно оценивают с помощью вероятностно-статистических и эксплуатационных характеристик надежности (¹). Определение этих характеристик является весьма трудоемкой задачей, связанной либо с анализом большого объема статистической информации об отказах х.т.с., для накопления которой необходим длительный период эксплуатации; либо с осуществлением статистических испытаний на модели х.т.с., разработка которой также требует предварительных данных об отказах действующей системы.

В условиях проектирования новых систем повышенной мощности по сравнению с действующими, а также х.т.с. агрегатов большой единичной мощности статистическая информация об отказах, как правило, отсутствует, в то время как достоверная оценка характеристик надежности вновь создаваемых систем становится все более необходимой. Для того чтобы уже на стадии проектирования определять характеристики надежности х.т.с., введем понятие надежность технологической топологии х.т.с., под которой будем понимать надежность системы, зависящую от структуры технологических связей ее элементов. Задачей анализа надежности технологической топологии х.т.с. является нахождение структурных недостатков в технологической схеме системы и выбор оптимального варианта повышения надежности х.т.с. путем введения резервных технологических связей и элементов х.т.с., а также вычисление оценок верхних и нижних границ значений вероятностно-статистических и эксплуатационных характеристик надежности х.т.с.

Качественный анализ надежности технологической топологии х.т.с. будем осуществлять с помощью топологической модели системы в виде параметрического потокового графа (п.п.г.) х.т.с. ⁽²⁾ на основе исследования его структурных характеристик, которыми являются связность графа, множество сочленения и структурный ранг элемента х.т.с. ^(3, 4). С помощью указанных характеристик п.п.г. выявляют отсутствие необходимых для обеспечения требуемой надежности технологических связей, а также элементы х.т.с., имеющие наибольшее число технологических связей, и определяют те элементы, отказ которых приведет к отказу всей системы.

Рис. 1. Структурная схема подсистемы синтеза и дистилляции 1-й ступени х.т.с. производства карбамида: 1 — смеситель; 2 — колонна синтеза; 3 — ректификационная колонна; 4 — подогреватель; 5 — сепаратор; 6 — промывная колонна; 7, 8, 9 — конденсаторы аммиака; i_1 — источник сырья (аммиак и двуокись углерода); i_2, i_3 — соответственно потоки аммиачной воды и углеаммонийных солей, орошающие промывную колонну; s — поток плава карбамида на дистилляцию II-ступени



Зная структурные ранги элементов х.т.с., можно классифицировать элементы в порядке структурной значимости: чем выше структурный ранг элемента, тем сильнее данный элемент связан с другими элементами системы и тем сильнее скажется отказ этого элемента на работоспособности х.т.с.

Структурный ранг i -го элемента х.т.с. R_i можно вычислять по формуле

$$R_i = \sum_{j=1}^n h_{ij}^{(p)} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}^{(p)}, \quad (1)$$

где $h_{ij}^{(p)}$ — элемент матрицы связей п.п.г. $[P] = [H]^p$; $[H]$ — матрица смежности п.п.г.; p — показатель степени: $p=4$, если число элементов х.т.с. $n \leq 30$; если $n > 30$, то $p=8$.

В х.т.с. существуют «узкие» места, если обнаружены элементы со структурными рангами, значительно превосходящими все остальные. Для повышения надежности технологической топологии х.т.с. в этом случае необходимо либо перераспределить технологические связи так, чтобы ранги всех элементов системы были бы примерно одинаковыми, либо в первую очередь обеспечить повышенную надежность элементов х.т.с. с наибольшими структурными рангами.

Множество сочленения п.п.г., объединяющее минимальное число вершин графа, соответствующих элементам х.т.с., отказ которых приведет к отказу всей системы, можно определить по следующему алгоритму.

1. Найти центры и периферийные точки графа. Для этого для каждой вершины i определяют величину $d(i, j)$ — отклонение вершины i от вершины j , равное длине наименьшего пути из i в j , и величину $e(i) = \max d(i, j)$, называемую отклоненностью вершины i , где $j=1, n$ ($j \neq i$).

2. Вершины п.п.г., соответствующие периферийным точкам с наибольшей отклоненностью, исключают из дальнейшего рассмотрения, так как они соответствуют элементам х.т.с., отказ которых не приводит к нарушению работоспособности системы.

3. Из оставшихся вершин п.п.г. выбирается оптимальное множество сочленения п.п.г., отвечающее максимуму целевой функции, имеющей вид:

$$\Psi = \sum_{s \in M} \frac{\rho_s}{e(s)}, \quad (2)$$

где ρ_s и $e(s)$ — соответственно степень и отклоненность вершины s , принадлежащей множеству сочленения M .

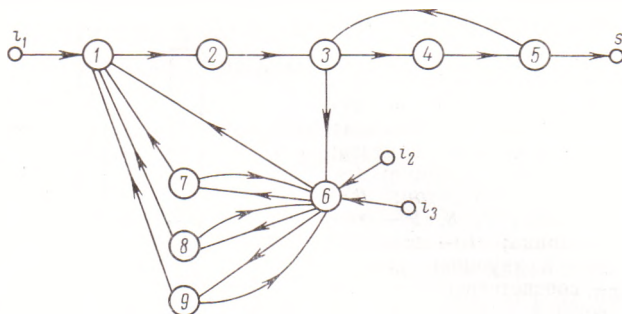


Рис. 2. Параметрический потоковый граф подсистемы (рис. 1)

Выбор множества сочленения п.п.г. можно осуществить с помощью динамического программирования, определяя величину функции Ψ каждый раз после отнесения ко множеству сочленения предыдущей вершины и вычеркивания ее из п.п.г.

Рассмотрим применение п.п.г. для качественного анализа надежности подсистемы синтеза и дистилляции 1-й ступени х.т.с. производства карбамида, структурная схема которой представлена на рис. 1. На рис. 2 изображен п.п.г. данной подсистемы, который содержит после удаления вершин-источников i_1, i_2, i_3 и вершины-стока s $n=9$ вершин, соответствующих элементам х.т.с. и $m=16$ ветвей, соответствующих технологическим связям данных элементов х.т.с. В табл. 1 приведены значения степеней вершин п.п.г. и их отклоненностей. Вершины 2 и 3, имеющие наименьшие

Таблица 1

Определение структурных характеристик параметрического потокового графа х.т.с. (рис. 2).

i , номер вер- шины п.п.г.	ρ_i	$e(i)$	R_i	i , номер вер- шины п.п.г.	ρ_i	$e(i)$	R_i
1	6	4	0,058	6	40	5	0,130
2	2	3	0,116	7	3	5	0,130
3	4	3	0,130	8	3	5	0,130
4	2	5	0,058	9	3	5	0,130
5	3	4	0,116				

отклоненности, являются вершинами — центрами п.п.г. и могут быть включены во множество сочленения графа. Вершины 4, 7, 8, 9, имеющие небольшие степени и наибольшие отклоненности, являются периферийными вершинами графа и исключаются из дальнейшего рассмотрения. Из оставшихся вершин находим с помощью критерия (2) искомое множество сочленения $M = \{1; 3, 6\}$.

Полученный набор вершин п.п.г. дает величину $\max \Psi$.

Таким образом, найдено множество сочленения п.п.г. подсистемы синтеза и дистилляции 1-й ступени х.т.с. производства карбамида, содержащие следующие элементы х.т.с.: смеситель, ректификационную и промывную колонны, отказ которых приведет к нарушению работоспособности данной подсистемы. Следовательно, при проектировании в первую очередь необходимо обеспечить повышенную надежность указанных элементов.

Для сравнения в табл. 1 приведены значения структурных рангов элементов х.т.с., вычисленные по формуле (1). Конденсаторы аммиака 7, 8 и 9, хотя и имеющие большой структурный ранг, не включены во множество сочленения, так как они, будучи соединены параллельно, исключают возможность отказа подсистемы, когда хотя бы один из них останется в работоспособном состоянии.

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

Поступило
28 III 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. К. Горский, Статистические алгоритмы исследования надежности. «Наука», 1970. ² Н. М. Жаворонков, В. В. Кафаров и др. Теоретич. основы химич. технол., 4, № 2, 1970. ³ К. Берг, Теория графов и ее применения, ИЛ, 1962. ⁴ В. П. Мешалкин, Некоторые принципы анализа химико-технологических систем, Автореферат кандидатской диссертации, М., 1971.