

Академик В.В. КАФАРОВ, В.П. МЕШАЛКИН, Г.И. МАНКО

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНО-ИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Эффективность химико-технологических систем (х.т.с.) как обобщенная оценка качества их функционирования должна анализироваться с учетом не только технологических показателей, но также и такого важного показателя качества функционирования, как надежность [1, 2]. Снижение эффективности функционирования х.т.с. может произойти как вследствие отказов элементов х.т.с, так и вследствие наличия неучтенных в ходе проектирования объективно существующих неточности и неполноты априорной информации о физико-химических характеристиках технологических процессов и аппаратов. Для исследования отказов х.т.с, и их элементов используются методы теории структурно-параметрической надежности (с.п.н.). В частности, в [1 - 4] разработана методика системного анализа с.п.н. химико-технологических систем на основе использования топологических моделей надежности в виде параметрических потоковых графов, параметрических графов надежности и сигнальных графов надежности. Вопросы исследования надежности проектных решений рассматривает теория проектно-расчетной надежности основы которой изложены в [5].

Следует отметить, что предложенный в [5] метод анализа п.р.н, не предусматривает возможности учета характеристик с.п.н., так же как анализ с.п.н. известными методами не обеспечивает учета п.р.н.

Для проведения всестороннего анализа эффективности х.т.с. с учетом самых разнообразных аспектов необходимо создание единой методологической основы таких исследований, максимально обобщающей используемые в настоящее время методы анализа надежности и эффективности х.т.с.

Известно, что высокую степень обобщения закономерностей и явлений самых различных областей дает использование методов и понятий теории информации. Целесообразность широкого применения информационных понятий и теорий показана, например, в [6, 7]. Для управляющих систем (у.с.) в [7] рассмотрены вопросы создания методологии системно-информационного анализа, включающей три этапа: формализацию целей управления и построение иерархии целей; определение неорганизованности функционирования у.с. в отношении целей управления; оптимизацию состава, структуры и свойств у.с. с целью согласованного уменьшения неорганизованности функционирования в отношении всех целей.

В настоящей статье предпринята попытка разработать на базе методов [1—5, 7] основы системно-информационного анализа эффективности х.т.с. Для выполнения этой задачи полученные в [7] определения и выводы переосмысливаются и развиваются применительно к проблемам исследования эффективности х.т.с.

Дадим следующие определения основным понятиям системно-информационного анализа эффективности х.т.с. К р и т е р и е м ц е л и функционирования х.т.с. (или ее элемента) будем называть количественно определенную в пространстве состояний системы (элемента) область значений выходных переменных, соответствующих нормальному функционированию системы (элемента). Цель считается достигнутой, когда вектор X переменных х.т.с. (элемента) находится внутри этой области. Составляющие вектора X являются параметрами критерия цели. Границы областей достижения цели могут быть четко не обозначенными, местоположение границ может иметь случайный характер, например при использовании интервальных оценок параметров критерия цели.

Для измерения степени достижения цели будем использовать понятие неупорядоченности U функционирования х.т.с. или ее элемента как численной меры различия вектора X в отношении эталона порядка $X_{эт}$, которая стремится к нулю при $X \rightarrow X_{эт}$. Неупорядоченность может быть соотнесена с границей области полного достижения цели $\xi(X)$ и в общем случае является функцией четырех аргументов: $X, X_{эт}, \xi(X)$ и времени t .

Если неупорядоченность функционирования х.т.с. (элемента) - величина переменная, принимающая различные значения в различных ситуациях, складывающихся в системе, и в различные моменты времени, то неорганизованность функционирования -- это обобщенная за рассматриваемое число ситуаций и временных интервалов неупорядоченность:

$$(1) \quad \bar{O} = \bigcup_{k=1}^m \alpha_k \bigcup_{j=1}^n p_j \bar{Y}_j,$$

где $\bigcup_{k=1}^m$, $\bigcup_{j=1}^n$ — некоторые отвлеченные символы обобщения неупорядоченности за m интервалов времени и n ситуаций соответственно; α_k — вес k -го интервала времени; p_j — вероятность j -той ситуации.

Если параметр критерия цели оценивается интервальной оценкой, то возможны только две ситуации: значение параметра цели либо покрывается доверительным интервалом Δ либо лежит вне доверительного интервала. Вероятность первой ситуации равна доверительной информации β , вероятность второй $(1-\beta)$. В этом случае для измерения неорганизованности функционирования можно взять информационный критерий, используемый в [8] в качестве критерия оптимальности интервальной оценки

$$(2) \quad \bar{O} = I_{\Delta}/H_{\Delta},$$

где $I_{\Delta} = \beta \log \frac{\beta}{\alpha} + (1-\beta) \log \frac{1-\beta}{1-\alpha}$ — количество информации, получаемое в результате выбора данной интервальной оценки; $H_{\Delta} = \alpha \log \alpha + (1-\alpha) \log (1-\alpha)$ - энтропия распределения вероятностей $Q = \{\alpha, 1-\alpha\}$, α — априорная доверительная вероятность; β — апостериорная доверительная вероятность.

С использованием рассмотренных понятий и определений нами разработана методика проведения системно-информационного анализа эффективности х.т.с., включающая следующие основные этапы.

На первом этапе должны быть определены цели функционирования х.т.с. и сформулированы критерии целей. Цели функционирования образуют иерархию целей, которая определяется назначением, структурой и принципами функционирования исследуемой системы. Из всего множества целей функционирования данной системы выделяется глобальная цель. Глобальная цель помещается на верхнем уровне иерархии целей. Уровнем ниже располагаются цели, достижение которых, необходимо для выполнения вышестоящей цели и т.д. до нижнего уровня, на котором находятся цели, принимаемые за первичные. Каждая нижестоящая в иерархии цель является подцелью вышестоящей цели. Этот этап в принципе совпадает с первым этапом методики [7].

Второй этап системно-информационного анализа эффективности х.т.с. во многом совпадает с первым этапом системного анализа надежности по методике [1-4]. Производятся сбор и обработка статистических данных о функционировании элементов х.т.с. для определения характеристик их надежности. Кроме того, на этом этапе определяются статистические характеристики параметров входных потоков х.т.с, т.е. входных переменных х.т.с. Разрабатываются математические модели элементов х.т.с, определяются законы распределения значений выходных переменных х.т.с. и характеристик надежности ее элементов, производится проверка математических моделей и законов распределения на адекватность исходным данным. При этом

целесообразным является использование информационных характеристик и критериев, разработанных в [9, 10].

На третьем этапе строится топологическая модель х.т.с, отображающая иерархию целей функционирования. Такая модель разработана нами в виде комплексного графа анализа эффективности (к.г.а.э.). Вершины графа отображают цели функционирования, формализованные на первом этапе системно-информационного анализа эффективности. Связи между целями изображаются дугами графа, направленными от подцелей к целям. Каждой вершине к.г.а.э. соответствует некоторое значение неорганизованности (2) функционирования х.т.с или ее элементов в отношении соответствующей цели. Каждой дуге к.г.а.э. поставлен в соответствие вес, определяемый вероятностью отказа элемента или группы элементов, ответственных за достижение цели, изображаемой вершиной, к которой направлена данная дуга.

К.г.а.э. дает возможность рассчитать значение неорганизованности функционирования х.т.с в отношении глобальной цели при известных интервальных оценках критериев целей функционирования, а также известных вероятностях отказов соответствующих элементов х.т.с. Для этого определяются с помощью математических моделей элементов х.т.с размеры доверительных интервалов критериев целей, а с помощью алгебры случайных событий - доверительные вероятности, учитывающие вероятности отказов элементов. Доверительные вероятности рассчитываются, исходя из предположения, что значение критерия цели может не оказаться в доверительном интервале как вследствие отказа соответствующего элемента (событие A), так и вследствие ненадежности проектных решений (событие B). Результирующее событие C есть дизъюнкция событий A и B :

$$(3) \quad P(C) = P(A \vee B) = P(A) + P(B) - P(A)P(B).$$

В общем случае неорганизованность функционирования в отношении глобальной цели представляет собой некоторый функционал от вектора неорганизованностей \bar{O} в отношении всех целей, кроме глобальной, вектора характеристик надежности P , а также от технологической топологии G х.т.с:

$$(4) \quad \bar{O}_z = \varphi(\bar{O}, P, G)$$

и может рассматриваться как критерий технической эффективности х.т.с.

В зависимости от конкретной поставленной перед исследователем проблемы четвертый этап системно-информационного анализа эффективности х.т.с может предполагать решение разных задач, например:

1) по известным характеристикам надежности элементов и заданным ограничениям на значение неорганизованности функционирования х.т.с в отношении глобальной цели определить требования к статистическим характеристикам входных переменных х.т.с;

2) по заданным ограничениям на значение неорганизованности функционирования х.т.с в отношении глобальной цели и известным статистическим характеристикам входных переменных х.т.с. определить требования к характеристикам надежности элементов х.т.с и оптимально (с точки зрения, например, минимума затрат на изготовление или реконструкцию системы) распределить надежность по элементам х.т.с; иначе говоря, отыскать экстремум критерия экономической

$$(5) \quad \Psi = \text{extr}_F \mathcal{E} \quad \text{при ограничении} \quad \bar{O}_r \leq \bar{O}_r^*,$$

эффективности \mathcal{E} х.т.с

где \bar{O}_g^* — максимально допустимое значение неорганизованности функционирования х.т.с. в отношении глобальной цели;

3) по известным статистическим характеристикам входных переменных х.т.с. и известным характеристикам надежности типовых элементов х.т.с. определить оптимальную технологическую топологию системы, обеспечивающую экстремальное значение критерия эффективности х.т.с. при выполнении ограничений на значение неорганизованности функционирования х.т.с. в отношении глобальной цели:

$$(6) \quad \Psi = \underset{G}{\text{extr}} \exists \quad \text{при} \quad \bar{O}_g \leq \bar{O}_g^*$$

и т.д.

В качестве критерия экономической эффективности могут использоваться либо коэффициент экономической эффективности, либо приведенные затраты на единицу выпускаемой продукции [11] с учетом потерь от неорганизованности функционирования х.т.с.

На пятом этапе системно-информационного анализа производится разработка конкретных инженерно-технических рекомендаций по повышению эффективности х.т.с.

В заключение рассмотрим пример построения к.г.а.э. подсистемы реакторов х.т.с. производства диметилформаида. На рис. 1 показана технологическая схема подсистемы. В реакторе-десорбере **1** происходит реакция взаимодействия жидкой муравьиной кислоты (МК) и газообразного диметиламина (ДМА) с образованием формиатдиметиламина (ФДМА). В реакторе-испарителе **2** ФДМА разлагается на воду и целевой продукт — диметилформамид. Частично реакция разложения ФДМА происходит и в первом реакторе. Получаемый в обоих реакторах диметилформамид направляется на ректификацию в подсистему очистки. К.г.а.э. подсистемы реакторов приведен на рис. 2. В изображающих вершины графа кружках проставлены значения неорганизованности O функционирования элементов подсистемы в отношении целей, состоящих в обеспечении нахождения значений технологических параметров системы в заданных пределах. Значениям индекса i соответствуют цели, состоящие в наступлении следующих событий: **1** — событие "параметры выходного потока подсистемы в норме"; **2** — "параметры выходного потока реактора **1** в норме"; **3** — "расход ДМА на реактор **2** в норме"; **4** — "температура в реакторе **2** в норме"; **5** — "расход МК на реактор **1** в норме"; **6** — "расход ДМА на реактор **1** в норме"; **7** — "давление паров ДМА в мернике **3** в норме"; **9** — "наличие МК в мернике **4**"; **10** — "температура МК в норме"; **11** — "давление греющего пара в норме"; **12** — "наличие ДМА в мернике **3**".

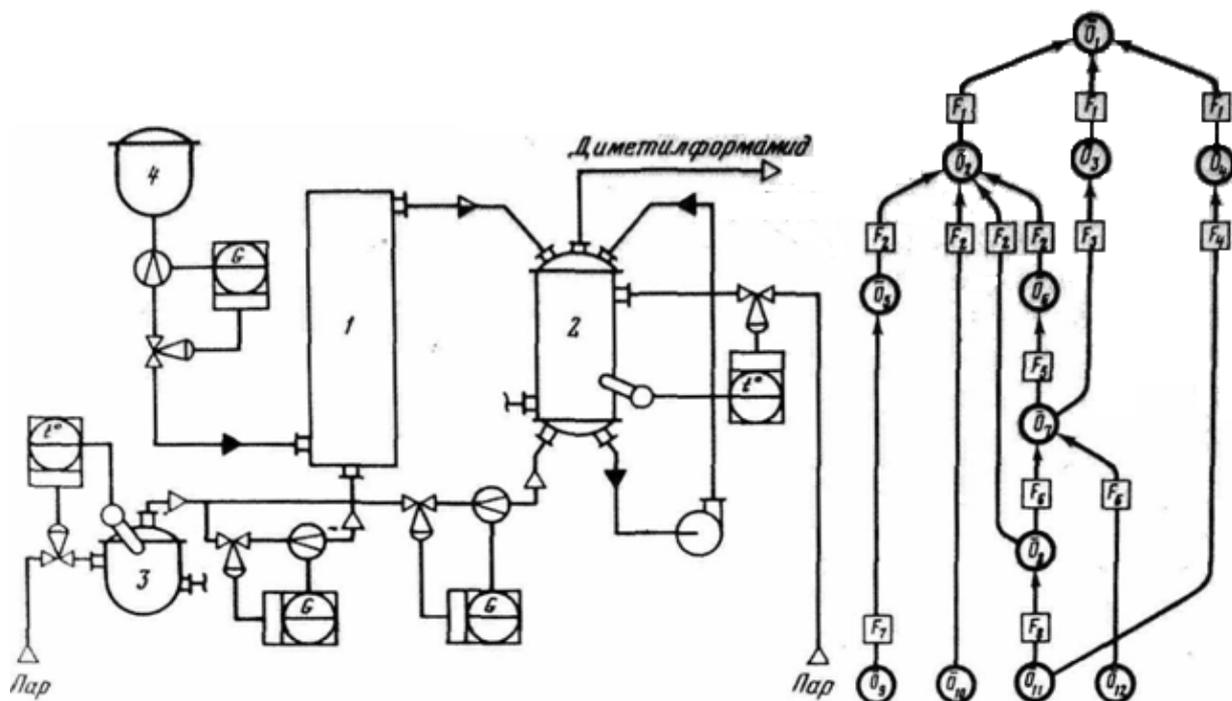


Рис. 1. Подсистема реакторов х.т.с. производства диметилформамида. 1 - реактор-десорбер; 2 - реактор-испаритель; 3 - мерник диметиламина; 4 - мерник муравьиной кислоты

Рис. 2. К.г.а.э. подсистемы реакторов х.т.с. производства диметилформамида

Дугам графа соответствуют проставленные в квадратах веса, равные: F_1 — вероятности отказа (в.о.) реактора 2; F_2 — в.о. реактора 1; F_3 — в.о. системы регулирования расхода ДМА на реактор 2; F_4 — в.о. системы регулирования температуры в реакторе 2; F_5 — в.о. системы регулирования расхода ДМА на реактор 1; F_6 — в.о. системы питания диметиламином; F_7 — в.о. системы питания муравьиной кислотой; F_8 — в.о. системы регулирования температуры в мернике 3.

Химико-технологический институт
ИМ. Д.И. Менделеева, Москва

Поступило
19 XI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Кафаров, И.П. Мешалкин, В кн.: Итоги науки и техники. Процессы и аппараты Химической технологии, т. 7, М., 1979.
2. В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, В.Л. Перов, Математические основы автоматизированного проектирования химических производств, М., 1979.
3. В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин и др., ДАН, т. 219, № 3, 615 (1974).
4. В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин и др., ДАН, т. 229, № 2, 408 (1976).
5. В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, В.М. Буроецов, ДАН, т. 243, № 5, 1235 (1978).
6. Б.Н. Петров, В.В. Петров и др., В кн.: Итоги науки и техники. Техническая кибернетика, т. 5, М., 1970.
7. Ю.М. Горский, Информационные аспекты управления и моделирования, М., 1978.
8. Я.Л. Рипс, В сб.: Основные вопросы теории и практики надежности, М., 1971, стр. 98.
9. В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г.И. Манко, ДАН, т. 242, № 2, 383 (1978).
10. В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г.И. Манко, ДАН, т. 249, № 4, 923 (1979).
11. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Вопр. изобретательства, № 7, 46 (1977).