А.В. КОШЕЛЬНИК, канд. техн. наук, ИПМаш НАН Украины,
В.Л. БЕССОННЫЙ, Университет гражданской защиты

МЕТОДИКА АНАЛИЗА РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЪЕКТАМ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Розглянуто можливість застосування формальних методів системного аналізу для рішення широкого кола проблем, спрямованих на підвищення ефективності й надійності функціонування технічних об’єктів підвищеної небезпеки. Практична реалізація такого підходу забезпечує комп’ютеризацію оцінок ризиків та є ефективним способом відбивання потенційних погроз у конкретних обставинах функціонування об’єктів хімічної промисловості.

The opportunity of application of system analysis formal methods for the solution of the different problems directed on raise of efficiency and reliability of functioning of technical objects of danger installations is observed. Practical implementation of such approach provides a computerization of estimations of risks and is effective way of parrying of potential threats in concrete condition of functioning of installations of the chemical industry.

Введение. Индустриализация экономики привела к формированию производственной инфраструктуры территориально-промышленных комплексов, для которых характерна концентрация значительных материальных и энергетических ресурсов, обладающих повышенной опасностью для человека и окружающей среды в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Для разработки превентивных организационных, технических и технологических мероприятий, направленных на предотвращение или минимизацию негативных последствий техногенных аварий, целесообразно располагать инструментарием, обеспечивающим априорные оценки вероятностей возникновения нештатных ситуаций и масштабов возможных их последствий [1, 2]. Наличие такого инструментария дает возможность предсказывать потенциальные угрозы –риски и проектировать способы эффективного их парирования в конкретных обстоятельствах функционирования промышленных объектов химической промышленности [3, 4].

Анализ публикаций и выделение нерешенной части проблемы. Риск возникновения техногенных аварий не возникает сам по себе, а инициируется отказами технической системы, действиями людей или внешними причинами – исходными событиями. В статье будет рассматриваться только ко-

нечное число исходных событий $h_1, h_2, ..., h_N$, которые порождаются только отказами технической системы. Обозначим вероятности возникновения этих событий $P(h_1), P(h_2), ..., P(h_N)$. Получение вероятностей $P(h_1), P(h_2), ..., P(h_N)$ основывается на исследованиях законов надежности элементов технической системы.

В свою очередь, любое одно из исходных событий h может вызвать несколько i последствий $V(h,i)$ различных масштабов для людей, обслуживающих техническую систему и/или проживающих в непосредственной близости от источника потенциальной опасности, для общества в целом и окружающей среды. Масштабы последствий зависят от степени подготовленности функциональной структуры сложной технической системы к отражению инициирующих событий, от путей протекания аварии и способов компенсации последствий.

Величина частного риска, инициированного событием h, может быть определена как произведение [5]:

$$R(h,i) = \overline{P}(h,i) \cdot V(h,i), \qquad (1)$$

где $R(h,i)$ – частный риск, создаваемый i последствием события h; $\overline{P}(h,i)$ – вероятность (частота) появления последствия вида i; $V(h,i)$ – масштаб i последствия, выраженный в количественной форме.

Число i последствий для сложной технической системы может оказываться значительным. На практике среди масштабов i последствий существует доминирующее по масштабу последствие. Руководствуясь позицией крайнего пессимизма, примем это доминирующее последствие, как единственное последствие инициирующего события h. Тогда формула (1) упростится и примет вид:

$$R(h) = \overline{P}(h) \cdot V(h), \qquad (2)$$

где $R(h)$ – частный риск, создаваемый доминирующим последствием события h; $\overline{P}(h)$ – вероятность (частота) появления доминирующего последствия; $V(h)$ – масштаб доминирующего последствия, выраженный в количественной форме.

Допустим, что произошло событие h. Выбранный консервативный путь отражения h приведет к возникновению доминирующего последствия величины $V(h)$. Осуществление намеченного в проекте технической системы способа парирования h является сложным событием, зависящим от технического состояния системы. Обозначим это событие символом S, а вероятность его осуществления символом $P(S)$. Событие S может произойти только вместе с событием h. Считая эти события независимыми, вероятность $\overline{P}(h)$ появления доминирующего последствия можно записать, как произведение вероятностей событий:

$$\overline{P}(h) = P(h) \cdot P(S), \tag{3}$$

где $P(h)$ – вероятность появления события h.

Подставляя (3) в (2), получим оценку частного риска в виде:

$$R(h) = P(h) \cdot P(S) \cdot V(h). \tag{4}$$

Тогда, принимая события $h_1, h_2, ..., h_N$ за несовместные события, что обычно и бывает на практике, получим оценку общего или агрегированного риска эксплуатации сложной технической системы:

$$R_{\text{общ}} = \sum_{k=1}^{N} P(h_k) \cdot P(S_k) \cdot V(h_k). \tag{5}$$

Вычисление частных рисков по формуле (4) или общего риска по формуле (5) сопряжено со значительными трудностями, связанными с необходимостью обработки больших объемов информации для определения вероятностей исходных событий $P(h_1), P(h_2), ..., P(h_N)$, вероятностей отказов элементов технической системы на пути протекания доминирующих аварий, чтобы получить $P(S_k)$ и масштабов последствий $V(h_k)$. Кроме того, сложная система представляет собой множество взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов и подсистем, составляющих нераздельное целое, обеспечивающих выполнение системой некоторой сложной функции. Расчеты показателей надежности таких больших структур представляют собой

теоретическую и практическую проблему.

Расчёты показателей надёжности сложных технических систем можно выполнить:

1) с помощью основных теорем теории вероятностей;

2) путем составления и решения системы дифференциальных уравнений, описывающих марковский процесс перехода системы из одного состояния в другое состояние;

3) путем эквивалентных преобразований расчётной схемы с использованием формул теории вероятностей и марковских моделей;

4) на основе топологического анализа технологической схемы на связность;

5) на основе формирования логической функции отказа с помощью диаграммы, называемой «деревом» отказов;

6) путём статистического моделирования случайного процесса перехода системы от состояния к состоянию (метод Монте-Карло). На выбор метода расчёта надёжности сложных систем влияют: законы распределения времени безотказной работы элементов, режимы работы объекта в целом и элементов, восстанавливаемость и невосстанавливаемость элементов, способы резервирования.

Изложение основного материала исследования. Наибольшее распространение в инженерной практике оценивания надёжности сложных систем получили логико-вероятностные методы. Практическое применение логико-вероятностного метода и других, перечисленных методов, даже для систем, состоящих из не более 20 элементов, оказывается громоздкой процедурой. А сложная техническая система состоит из тысяч элементов. Несмотря на то, что перечисленные основные методы расчета сложных систем обладают высоким уровнем универсальности, их прямое применение на практике затруднено. В связи с этим, для расчета показателей надежности сложных систем определенного типа на практике сочетают различные подходы и создают специализированное программное обеспечение. Один из таких специализированных подходов вычисления вероятностей отказов систем приведен в работе [6] и состоит в следующем.

Логическая модель безотказной работы системы представляется в виде структурной схемы, составляемой из ограниченного числа типовых базисных геометрических образов. Рассматриваются классы моделей безотказной работы систем, образующих структурные схемы определенного вида. Эти виды

базисных конфигураций представлены на рисунке.

В качестве базисных элементов структурной схемы допускается использовать простые элементы и сложные элементы, представляющие специфические по надежности подсистемы. Расчетные формулы, соответствующие базисным структурам, имеют следующий вид:

$$\left.\begin{array}{c} Q(g_1)=1-(1-q_1)(1-q_2);\ \ Q(g_2)=q_1q_2;\ \ Q(g_3)=1-(1-q_2q_3)(1-q_1)(1-q_4); \\ Q(g_4)=(1-q_1)q_4q_5+q_1[1-(1-q_4)(1-q_2)]\cdot[1-(1-q_3)(1-q_5)]; \\ Q(g_5)=(1-q_1)\cdot q_5q_6q_7+q_1[1-(1-q_5)(1-q_2)]\cdot[1-(1-q_6)(1-q_3)]\cdot[1-(1-q_7)\times \\ \times(1-q_4)];\ \ Q(g_6)=(1-q_1)q_6q_7q_8+q_1[1-(1-q_6)(1-q_2)]\cdot[1-(1-q_7)(1-q_3)]\times \\ \times[1-(1-q_8)\cdot(1-q_4)]\cdot[1-(1-q_9)(1-q_5)];\ \ Q(g_7)=(1-q_1)[1-(1-q_6)(1-q_2q_3)]\times \\ \times[1-(1-q_7)(1-q_5q_4)]+q_1[1-(1-q_6)(1-q_2)]\cdot[1-(1-q_7)(1-q_5)]. \end{array}\right\}, \quad (6)$$

где $q_i, (i=1,2,...,9)$ − вероятность отказа i элемента; $Q(g_k), (k=1,2,...,7)$ − вероятность отказа k базисной конфигурации.

Привлекательность данного подхода обусловлена тем, что из совокупности базисных элементов и конфигураций, обладающих определенными свойствами, можно создавать структурные схемы, моделирующие безотказную работу систем. Принципиальная трудность расчета вероятности отказа объекта, представленного структурной схемой, состоит в распознавании базисных конфигураций на ЭВМ и исключения их из структурной схемы путем замены на один простой элемент с собственным значением вероятности отказа.

После исключения из схемы всех базисных конфигураций в схеме останется единственный элемент с собственным значением вероятности отказа, что и определяет результат расчёта вероятности отказа объекта. Такая организация структурных моделей и способа расчёта их вероятностей отказов позволяет рассматривать структурные схемы с десятками тысяч элементов. Кроме того, пополнение множества базисных топологий, представленных на рис. 1, позволит адаптировать подход к расчету рисков различных технических систем.

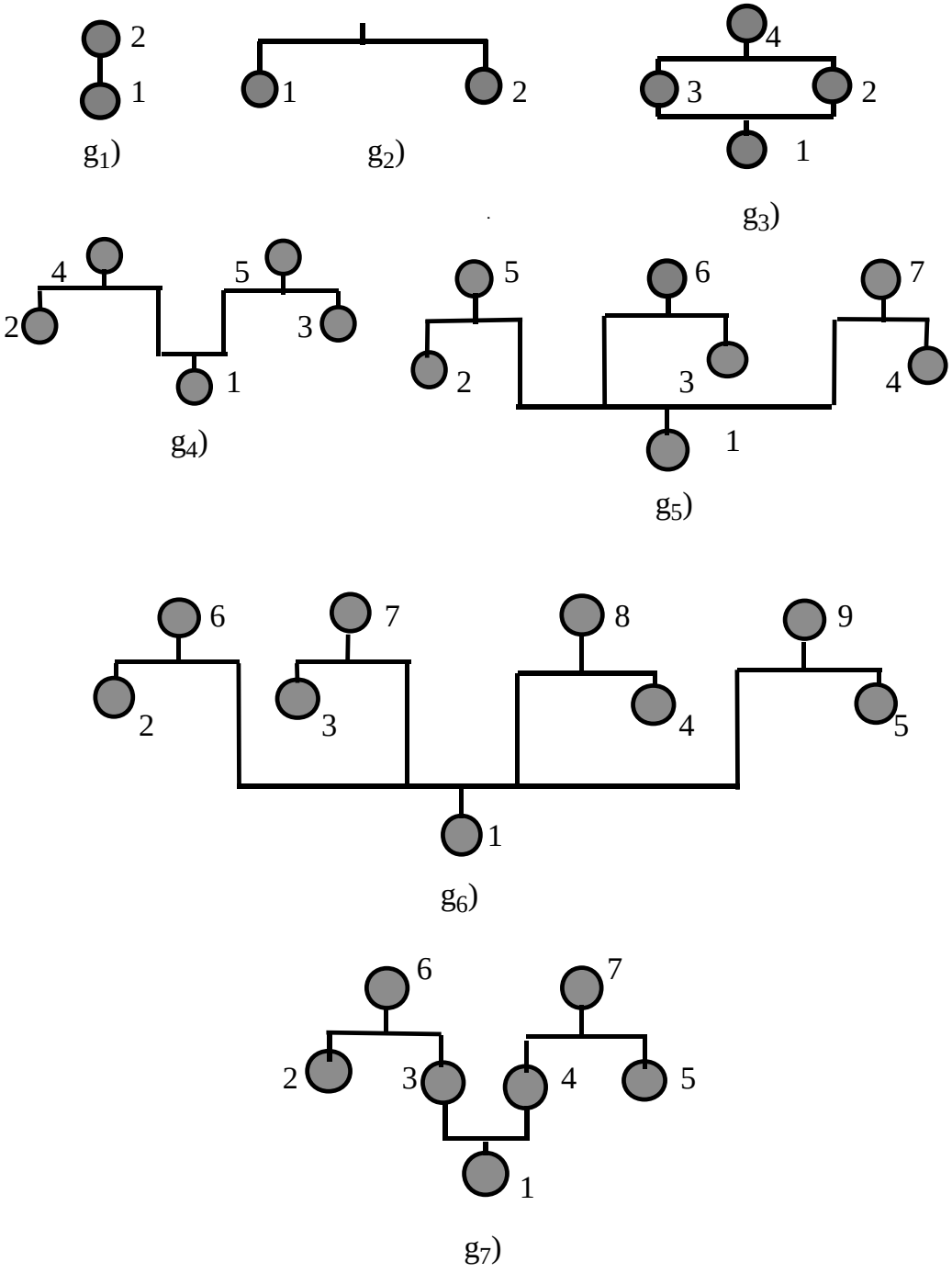

Рисунок – Базисные конфигурации структурных схем: g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7
(1 ÷ 9 − идентификаторы элементов)

Однако прямое применение этого объектно-ориентированного топологического метода к расчету вероятностей аварий затруднительно из-за того, что сложная техническая система состоит из функционально обособленных систем, каждая из которых характеризуется своим набором критериев отказов, и определить один критерий сразу для всех функциональных систем не представляется возможным.

Поэтому сложную техническую систему предварительно необходимо декомпозировать на функционально обособленные системы и для каждой из их составить соответствующие структурные схемы расчета вероятности отказа. Кроме того, необходимо еще составить логическую модель всех доминирующих путей протекания аварий. Тогда может быть применен предлагаемый топологический метод расчета вероятностей отказов больших функционально обособленных систем.

Выводы. Таким образом, создание объектно-ориентированного инструментария вычисления общего и частных рисков от эксплуатации опасных объектов химико-технологического комплекса весьма трудоемко, как в отношении сбора, хранения и обработки статистической информации, так и в отношении расчета показателей надежности сложных систем. Количественное определение масштабов доминирующих последствий также не является в большинстве случаев простой задачей, что требует иногда проведения специальных исследований. Тем не менее, на сегодня весьма актуально создание информационно-аналитических систем для решения задач рискового технико-экономического менеджмента при организации процесса эффективного и устойчивого функционирования, как отдельных объектов, так и производственно-хозяйственных комплексов химической промышленности, оказывающих существенное влияние на социальную сферу и окружающую природную среду.

Список литературы: **1.** *Маршалл В.* Основные опасности химических производств: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с. **2.** *Брушлинский Н.Н., Кафидов В.В., Козлачков В.И.* Системный анализ и проблема пожарной безопасности народного хозяйства. − М.: Стройиздат, 1988. – 412 с. **3.** *Сергиенко И.В.* Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – Киев: Наук. думка, 1985. – 323 с. **4.** *Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г., Махутов Н.А.* Теория риска и технологии обеспечения безопасности: Подход с позиций нелинейной динамики // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Ч. 1. – 1998. – Вып. 11. − С. 26 − 41. **5.** *Кук Д., Бейз Г.* Компьютерная математика. – М.: Наука, 1990. − 270 с. **6.** *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1975. −180 с. **7.** *Хаджинов В.В., Иванченко П.И.* О построении информационно-аналитической системы для решения задач ликвидации и предупреждения чрезвычайных ситуаций // Электрон. моделирование. – 1999. − № 4, Т. 21. – С. 81 − 90. **8.** *Зевин. Л.И., Зевин С.Л., Инкулис В.В.* Методика расчета и анализа структурной надежности блоков атомных электрических станций. // Проблемы машиностроения. – 2002. − № 2, Т. 5. – С. 34 – 37.

Поступила в редколлегию 23.10.07