

## О подходе к созданию системных средств оценки вероятностей базисных событий техногенной опасности

Предложен подход к созданию базы знаний (БЗ) специализированной экспертной системы (ЭС). Данная ЭС предназначена для оценивания вероятностей базисных событий техногенной опасности и используется при оперативном мониторинге ситуаций на потенциально-опасных объектах. БЗ содержит сведения о причинных факторах риска и их влиянии на вероятности базисных событий. Технология приобретения знаний носит гибридный характер, содержит экспертные оценки и вычислительные процедуры. Эффективность технологии заключается в снижении трудоемкости создания БЗ.

О. М. Серебровский

### Про підхід до створення системних засобів оцінки вірогідності базисних подій техногенної небезпеки

Запропоновано підхід до створення бази знань (БЗ) спеціалізованої експертної системи (ЕС). Дана ЕС призначена для оцінювання вірогідності базисних подій техногенної небезпеки. ЕС використовується при оперативному моніторингу ситуацій на потенційно-небезпечних об'єктах. БЗ містить відомості про причинні фактори ризику та їх вплив на вірогідності базисних подій. Технологія одержання знань носить гібридний характер, містить експертні оцінки і обчислювальні процедури. Ефективність технології полягає в зменшенні трудомісткості створення БЗ.

Одна из основных задач кризисных центров — предотвращение аварий и ЧП на потенциально-опасных объектах (ПОО). В эффективно функционирующих кризисных центрах парадигма «кто виноват и что делать?» вытесняется формулой «какова вероятность возможной аварии и какие причины необходимо устранить для ее предотвращения?». К необходимым предпосылкам успешного предотвращения относятся: отслеживание текущих ситуаций на ПОО; оценка степени их опасности; предсказание развития опасности и анализ ее причин. Модельно-алгоритмическим базисом решения этих проблем является вероятностный анализ безопасности (ВАБ), разработанный применительно к наиболее опасным и технически сложным ПОО — объектам атомной энергетики [1], [2], [3]. Передовые технологии ВАБ распространяются Международным агентством по атомной энергетике (МАГАТЭ) во все заинтересованные страны бесплатно.

Особенность данного программно-методического комплекса заключается в его универсальности касательно приложений — ВАБ может быть применен для оценок и прогноза техногенной опасности различных классов ПОО. Основными моделями, используемыми в ВАБ, служат логико-вероятностные модели «дерево отказов» (ДО) и «дерево событий» (ДС). Выходной информацией, полученной в результате применения этих моделей, является оценка вероятности возникновения аварии, которая сравнивается с ее допустимым значением и по результатам сравнения делается заключение о степени возникшей опасности. Входной информацией для ДО и ДС являются вероятности элементарных нежелательных событий (базисных событий), т. е. формирование оценок вероятностей базисных событий есть необходимая предпосылка для применения вероятностно-го анализа безопасности.

Базисные события (БС) представляют собой:

- отказы отдельных элементов опасных объектов;
- ошибки персонала;

события, источниками которых являются различные влияния внешней среды (природной и социальной).

Для оценок вероятностей БС используются: статистические данные; «живой» ВАБ; экспертные системы.

**Статистические данные** о БС применяются при оценках безопасности проектируемых, новых и модернизируемых объектов, но они не информативны для оценок текущих ситуаций.

**«Живой» ВАБ** — Living Probabilistic Safety Assessment (LPSA) [4] предназначен для оперативного оценивания изменений, происходящих на ПОО при отказах оборудования и его замене. Кроме того, LPSA позволяет оценивать вероятности БС с учетом наработки оборудования. Слабым местом LPSA является недостаточная адекватность описания связей между текущими ситуациями на ПОО и вероятностями БС, возможных в данных ситуациях. Это выражается в том, что при количественных оценках вероятностей БС принимается во внимание влияние только одного причинного фактора — «наработка». Комплексное влияние совокупности причинных факторов на вероятности БС не учитывается. Для уменьшения этого недостатка можно использовать оценки экспертов. Однако широкое применение экспертных оценок при оперативном мониторинге текущих ситуаций на ПОО ограничено недостатком высококвалифицированных экспертов. Поэтому актуальна задача создания системных средств приобретения и хранения экспертных знаний о ситуациях, возможных на ПОО,

и их влияниях на техногенную опасность для дальнейшего использования этих знаний при оперативном оценивании вероятностей БС [5], [6]. Данная работа является продолжением исследований в решении данной задачи.

**Экспертные системы (ЭС)**, предназначенные для оценивания вероятностей БС, специализированы по определенным типам аварий и классам ПОО. Они функционируют как подсистемы в технологическом процессе поддержки принятия решений по предотвращению аварий на ПОО. Можно выделить два режима функционирования ЭС: режим «приобретения знаний» и режим «консультации». В режиме «приобретения знаний» происходит накопление знаний о возможных ситуациях и об их влиянии на возникновение БС. В режиме «консультации» выполняются идентификация возникшей конкретной ситуации и затем оценивание вероятностей БС, соответствующих данной ситуации. При этом используются сведения о ситуации, полученные в результате мониторинга ПОО. Вычисленные оценки вероятностей БС экспортируются в традиционные процедуры ВАБ (в качестве исходных данных) для оценок вероятностей возможных аварий и ЧП.

Создание ЭС (в частности, ее базы знаний) — трудоемкий процесс. Это осложняет внедрение ЭС в технологию ВАБ. Однако при определенных ограничениях (допустимых и логичных) можно добиться существенного сокращения объема базы знаний (БЗ), упрощения правил вывода и соответственного снижения трудозатрат при создании ЭС ВАБ. Одним из подходов к созданию подобных ЭС является метод экспертных оценочных шкал (МЭОШ), который детально описан в работах [7], [8]. Здесь приведем только его кратчайшее изложение.

**Сущность МЭОШ** заключается в том, что вероятность БС оценивается на основании причинных факторов, влияющих на риск. База знаний (БЗ) экспертной системы, создаваемая с помощью МЭОШ, включает в себя описания: факторов опасности; ситуаций, возможных на ПОО; влияний факторов на вероятности БС. Каждый фактор описан множеством его возможных значений, которые упорядочены по степени их влияния на возникновение БС. Описание ситуаций абстрагировано от всех характеристик, не влияющих на возникновение опасности. Влияние факторов описывается функциями влияния (ФВ). ФВ фактора  $X$  на вероятность возникновения БС «а» есть соответствие между возможными значениями фактора  $X$  и вероятностями БС «а». ФВ фактора  $X$  формируются при условии, что все остальные факторы принимают значения своих норм. Таким образом, для каждой пары [фактор  $X_j$ , БС «а<sup>r</sup>»] в БЗ формируются  $n_j$  кортежей следующего вида:

$$(r, j, x_i, f_j^r(x_i)), \quad (1)$$

где  $r \in \{R\}$  — множество индексов БС;  $j \in \{J\}$ , где  $\{J\}$  — множество индексов факторов, влияющих на БС;  $n_j$  — количество возможных значений фактора  $X_j$ ;  $x_i$  — одно из возможных значений  $X_j$ ;  $f_j^r(x_i)$  — значение функции влияния фактора  $X_j$  на БС «а<sup>r</sup>», когда  $X_j = x_i$ .

Такая БЗ дает возможность выполнять оценки вероятностей БС, возникающих в результате одновременного влияния совокупности факторов. Простое правило вывода может быть представлено следующим выражением:

$$P(a) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - f_j^a(x_j^t)], \quad (2)$$

где  $P(a)$  — вероятность БС «а» в ситуации, когда  $X_j = x_j^t (j = \overline{1, k})$ ;  $f_j^a(x_j^t)$  — значение функции влияния фактора  $X_j$  на БС «а», когда  $X_j = x_j^t$ .

Простота описанного правила вывода является следствием того, что при формировании БЗ в нее включаются не зависящие между собой факторы. Главная трудность построения БЗ заключается в формировании функций влияния.

**Формирование функций влияния (ФВ).** Сформировать ФВ фактора  $X$  на БС «а» означает установить для каждого возможного значения  $x_i$  фактора  $X$  определенную оценку вероятности возникновения БС «а» в ситуации, когда  $X = x_i$ , а все остальные факторы принимают значения своих норм. Источниками формирования ФВ являются: данные статистики; результаты испытаний, обработанные с помощью моделей отказов [9], [10]; экспертные оценки. При формировании ФВ возникают следующие проблемы:

в ряде случаев статистических данных о вероятностях БС недостаточно для формирования ФВ по всему спектру значений факторов;

модели отказов используются только в случаях, когда БС являются отказами технических элементов и узлов; кроме того, не всегда реально можно проводить испытания при всех интересующих значениях факторов;

эксперты, даже квалифицированные в предметной области и хорошо знающие проблему, часто затрудняются в установлении конкретных оценок вероятностей БС, однако те же эксперты достаточно уверенно делают сравнительные оценки возможностей возникновения БС при различных отдельных значениях фактора, особенно при использовании метода парных сравнений [11].

В данной работе предлагается подход приобретения знаний о функциях влияния причинных факторов техногенного риска, основанный на **комбинированном использовании метода парных сравнений, моделей отказов и данных статистики.**

Рассмотрим фактор  $X$ , возможные значения которого  $\{x_i\} (i = \overline{1, n})$ . Допустим, что априори известно значение ФВ фактора  $X$  при  $X = x_1$ . Обозначим его  $f(x_1)$ . Стоит задача: определить все остальные значения ФВ фактора  $X$  на основании мнения эксперта о сравнительной эффективности влияния фактора  $X$  при его различных значениях. Для этого применяются парные сравнения, выполняемые по методу анализа иерархий [11].

Таблица 1. Субъективные суждения об относительной важности влияния на БС «а» различных значений фактора  $X$  (матрица парных сравнений)

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_n$
$x_1$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	...	$\frac{1}{8}$
$x_2$	3	1	$\frac{1}{2}$	...	$\frac{1}{6}$
$x_3$	5	2	1	...	$\frac{1}{4}$
...	...	...	...	...	...
$x_n$	8	6	4	...	1

Эксперт выполняет парные сравнения значений фактора  $X$  по критерию степени его влияния на вероятность БС «а», заполняя табл. 1, с помощью шкалы относительной важности:

<b>Оценка относительной важности в баллах .....</b>	<b>Вербальная оценка эксперта</b>
1 .....	Равная важность
3 .....	Умеренное превосходство одного над другим
5 .....	Существенное или сильное превосходство
7 .....	Значительное превосходство
9 .....	Очень сильное превосходство
2, 4, 6, 8 .....	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями
<b>Обратные величины приведенных выше оценок .....</b>	Если при сравнении двух значений $x_i$ и $x_{i+1}$ получено одно из указанных выше чисел (например 5), то при сравнении $x_{i+1}$ и $x_i$ получим обратную величину (т. е. 1/5)

Сравнивается относительная важность левых элементов табл. 1 с элементами верхней строки. Если элемент слева важнее, чем верхний элемент, то в клетку (на пересечении строки и столбца) заносится число от 1 до 9, в зависимости от суждения эксперта о степени важности левого элемента относительно верхнего элемента.

В противном случае (если верхний элемент важнее левого) в клетку заносится обратное число (дробь). Относительная важность элемента, сравниваемая с самим собою, равна 1. Поэтому диагональ табл. 1 содержит только единицы. Обратными величинами заполняются симметричные клетки.

Результатом всех парных сравнений является заполненная табл. 1, которая называется *матрицей парных сравнений* (МПС). В МПС могут содержаться противоречивые экс-

пертные оценки, т. е. внутренняя несогласованность. Поэтому после составления МПС стандартными программными средствами за конечное число шагов выполняется ее проверка на согласованность [11]. Если элементы матрицы не согласованы, эксперту предлагается скорректировать свои оценки. Если проверка на согласованность дала положительный результат, то на этом участие эксперта заканчивается.

Полученная МПС обладает тем свойством, что ее собственный вектор характеризует приоритетность (по критерию влияния на БС «а») возможных значений фактора  $X$ . Вычисление собственного вектора МПС выполняется по стандартным алгоритмам линейной алгебры.

Обозначим компоненты вычисленного вектора через  $\eta_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ). Каждая компонента характеризует приоритетность соответствующего значения фактора  $X$  по критерию влияния на возникновение БС «а». Без доказательства принимаем допущение: вероятность возникновения БС «а» под влиянием фактора  $X$  пропорциональна приоритету влияния фактического значения фактора  $X$ . Покажем это на примере. Допустим, что вычислены приоритеты влияния возможных значений фактора  $X$ :  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ . Выберем два различных значения фактора  $X$ :  $x_\alpha$  и  $x_\beta$  ( $1 \leq \alpha, \beta \leq n$ ). Тогда вероятность БС «а» при  $X = x_\beta$  будет больше вероятности БС «а» при  $X = x_\alpha$  во столько раз, во сколько приоритет  $\eta_\beta$  больше  $\eta_\alpha$ , т. е.

$$P_{X=x_\beta}(a) = P_{X=x_\alpha}(a) \frac{\eta_\beta}{\eta_\alpha} \tag{3}$$

В частности, при  $\alpha = 1, \beta = i$

$$P_{X=x_i}(a) = P_{X=x_1}(a) \frac{\eta_i}{\eta_1} \tag{4}$$

В терминах функций влияния данное выражение имеет вид

$$f(x_i) = f(x_1) \frac{\eta_i}{\eta_1} \tag{5}$$

Таблица 2. Перечень процедур приобретения знаний о функциях влияния причинных факторов на вероятности базисных событий (БС)

№ п/п	Наименование процедуры	Исполнитель процедуры
1	Формирование совокупности причинных факторов техногенной опасности, установление их возможных значений	Эксперт, инженер по знаниям
2	Парные сравнения значений фактора по критерию относительной важности влияния на БС, получение матрицы парных сравнений (МПС)	Эксперт
3	Проверка согласованности матрицы парных сравнений	Стандартное программное обеспечение метода анализа иерархий
4	Расчет собственного вектора матрицы парных сравнений (вектора приоритетов влияния значений фактора)	Стандартное программное обеспечение метода анализа иерархий
5	Вычисление опорного значения функций влияния:	
	5.1. При наличии статистических данных о вероятности БС в подобной ситуации	Инженер по знаниям
	5.2. При отсутствии статистики	Процедуры моделей отказов
6	Вычисление всех значений функций влияния на основе опорного значения и приоритетов значений фактора	Программное обеспечение, реализующее выражение (5)

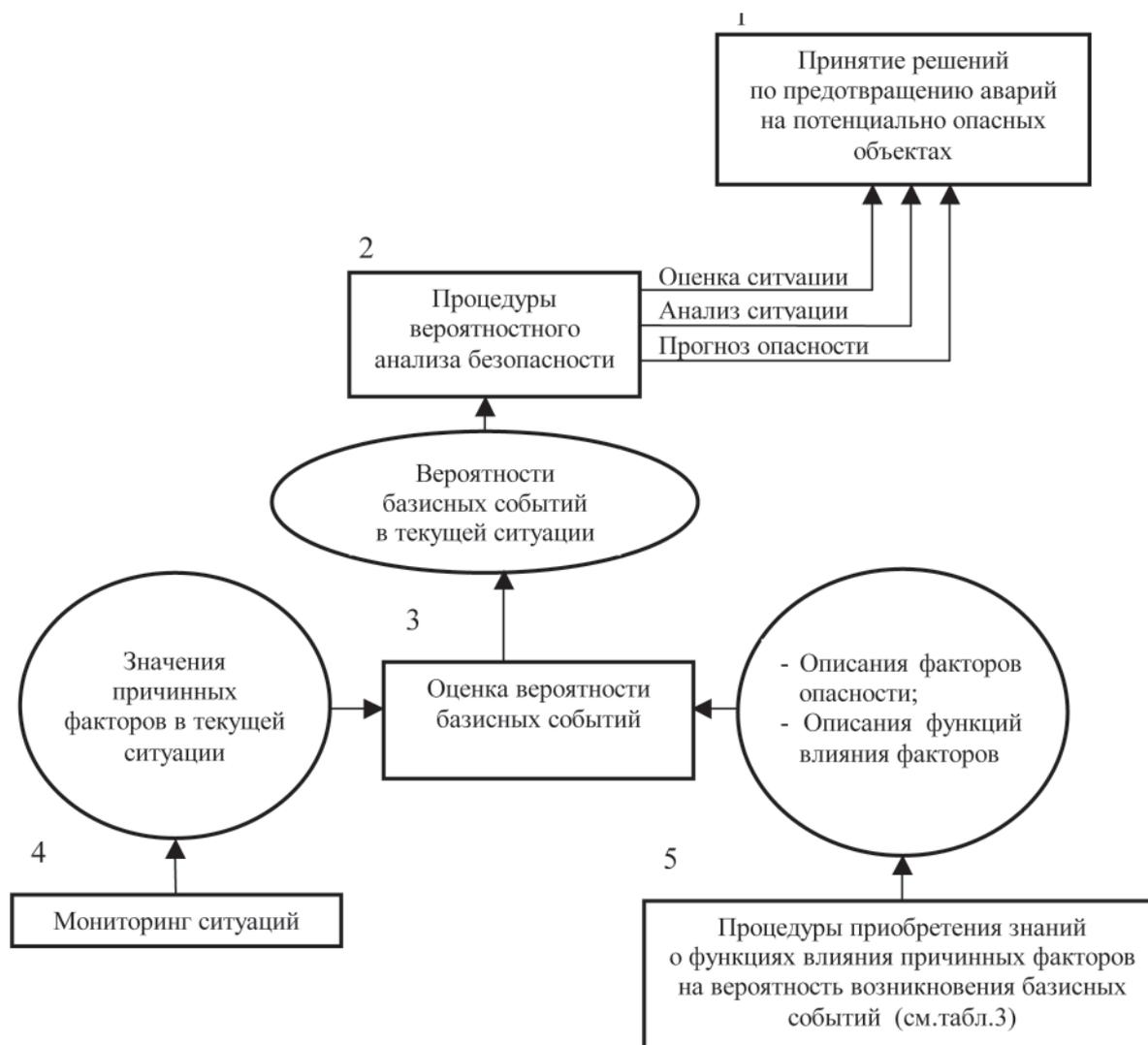


Рис.1. Схема взаимодействия процедур приобретения и использования экспертных знаний о влияниях факторов опасности на базисные события

Последнее выражение позволяет сформировать ФВ для всех значений фактора  $X$ , опираясь при этом на одно априорно известное значение  $f(x_1)$ , которое назовем опорным значением (ОЗ). Процедура установления ОЗ включает в себя те же средства, которые используются для определения оценок вероятностей БС: использование данных статистики, модели отказов и экспертные оценки. Для каждой пары [БС-Фактор] достаточно установить только одно ОЗ с тем, чтобы затем по описанной технологии определить все остальные значения ФВ. Таким образом, поставленная задача решена.

В табл. 2 приведен перечень процедур приобретения знаний о функциях влияния причинных факторов на вероятности базисных событий, а на рис. 1 — схема взаимодействия процедур оценки БС и процедур ВАБ в технологическом процессе поддержки принятия решений по предотвращению аварий на ПОО.

В режиме «приобретения знаний» выполняется комплекс процедур (см. блок 5 и табл. 2), формирующих базу знаний о причинных факторах опасности и о функциях их влияния на возникновение различных БС.

В процессе мониторинга (блок 4) фиксируются текущие значения факторов, описывающих контролируруемую ситуацию.

Оценка вероятности БС (блок 3) состоит из двух шагов: определения значений функций влияния, соответствующих текущим значениям факторов (используя экспертную БЗ); вычисления оценок вероятностей БС согласно выражению (2) на основании полученных значений функций влияния.

В блоке 2 выполняются процедуры оценки и анализа контролируемой ситуации, а также прогноза возникновения аварии на ПОО. Процедуры реализуются средствами ВАБ на основании вероятностей БС, импортируемых из блока 3.

В блоке 1 реализуется человеко-машинный процесс принятия решений, направленных на снижение риска, который имеет место на ПОО в момент проведения на нем сеанса ВАБ. В частности, вырабатываются решения по предотвращению прогнозируемых аварий.

## Выводы

Предложен подход создания базы знаний (БЗ) специализированной экспертной системы (ЭС) для оценивания вероятностей возникновения элементарных нежелательных событий (базисных событий).

Подобная ЭС, внедренная в автоматизированный контур традиционного анализа безопасности, заменяет экспертов при оперативном мониторинге ситуаций на потенциально-опасных объектах.

БЗ содержит знания о причинных факторах риска и об их влиянии на вероятности возникновения базисных событий.

Технология приобретения знаний носит гибридный характер и состоит из различного типа процедур: экспертных оценок относительной важности отдельных значений причинных факторов; вычислительных процедур; использования моделей отказов и статистических данных. При этом эксперту не требуется делать оценки значений вероятностей БС, а нужно только проводить парные сравнения значений фактора по критерию его влияния на вероятность БС.

Технология значительно уменьшает объем БЗ, упрощает правило вывода и снижает трудоемкость формирования БЗ.

## Литература

1. Бегун В. В., Горбунов О. В., Каденко И. Н. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ). — К.: НТУ «КПИ», 2000. — 568 с.
2. Швыряев Ю. В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. — М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1992. — 264 с.

3. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. — М. Машиностроение, 1984. — 528 с.

4. Living Probabilistic Safety Assessment (LPSA) IAFA Vienna 1999 IAFA TECDOC. — 1006 ISSN. — 48 pp.

5. Серебровский А. Н. Экспертные системы оперативной оценки техногенной опасности // Математические машины и системы. — 2007. — № 3, 4. — С. 139–144.

6. Серебровский А. Н. Проблемы прогнозирования техногенной опасности // Наук.-метод. семинар «Декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки як засіб регулювання безпеки регіону (держави)».

7. Серебровский А. Н. Об одном методе вероятностного анализа безопасности потенциально-опасных объектов // Мат. машины и системы. — 2002. — № 1. — С. 41–48.

8. Serebrovsky A. N. Models and Algorithms of Probabilistic safety assessment of potentially hazardous objects // Вестник нац. техн. унта «ХПИ». — 2007. — № 6 (Материалы «6-th International Conference on Information System Technology and Application». Kharkiv, May 23–25, 2007). — P. 127–134.

9. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Основные положения. Модели отказов.

10. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. — К.: Логос, 2002. — 486 с.

11. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 305 с.