

## Систематизация методов оценивания рисков эксплуатации АЭС

*Представлен сравнительный анализ нормативных документов по оцениванию рисков эксплуатации АЭС. Рассмотрены количественные методы принятия решений в условиях риска, предложена систематизация методов оценивания риска для их выбора в зависимости от условий принятия решений.*

*Ключевые слова:* оценивание рисков, безопасность, систематизация.

**М. О. Єлисеєва, К. М. Маловик**

### Систематизация методів оцінювання ризиків експлуатації АЕС

*Наведено порівняльний аналіз нормативних документів щодо оцінювання ризиків експлуатації АЕС. Розглянуто кількісні методи прийняття рішень в умовах ризику, запропоновано систематизацію методів оцінювання ризику для їх вибору залежно від умов прийняття рішень.*

*Ключові слова:* оцінювання ризиків, безпека, систематизація.

Современная философия регулирования и обеспечения безопасности при эксплуатации АЭС как объектов повышенной опасности (ОПО) [1] основана на использовании риск-информированных подходов [2].

Главным направлением теории и практики обеспечения безопасной эксплуатации АЭС является решение комплекса вопросов по минимизации уровня риска [3]. На данный момент в Украине нет целостно отработанной методологии применения риск-информированных подходов, в том числе для АЭС, что обуславливает актуальность исследований в области оценивания рисков при принятии решений по безопасности АЭС [2, 3]. Одним из важных факторов повышения качества оценки уровня безопасности служит разработка методических рекомендаций по выбору методов оценивания рисков для применения оценок риска при принятии решений относительно безопасности ОПО.

Цель работы — систематизировать методы оценивания рисков при принятии решений по безопасности, для чего необходимо провести анализ нормативной базы по безопасности и оцениванию рисков ОПО, рассмотреть количественные методы принятия решений в условиях риска и их особенности.

Для оценки уровня безопасности АЭС применяются методы вероятностного анализа безопасности (ВАБ) [4, 5, 6]. Однако в использовании ВАБ существует ряд ограничений [7], что говорит о необходимости усовершенствования существующих вероятностных моделей для оценки уровня безопасности.

В табл. 1 приведена краткая характеристика содержания нормативных документов Украины и России, а также международных стандартов относительно современных методов оценивания рисков ОПО и их выбора.

Сравнительный анализ исследуемых задач при оценивании рисков ОПО показывает наличие перечня общих вопросов в современной нормативной базе [8, 9, 10].

Представленные в табл. 1 методы оценивания рисков имеют определенные недостатки: потребность в значительных временных затратах; зависимость точности оценок от полноты информации о вероятности возникновения того или иного события; отсутствие влияния динамики состояний работ- и ресурсоспособности ОПО; применение упрощенных моделей оценивания; малоисследовательность применения сложных сценариев функционирования ОПО; необходимость предварительного анализа чувствительности события низкой вероятности к серьезным катастрофическим последствиям.

Анализ нормативной базы оценивания рисков ОПО показывает, что рекомендуемые методы не позволяют получить достаточно достоверную оценку безопасности ОПО. Поэтому для повышения качества оценивания безопасности ОПО предлагается рассмотреть пути повышения достоверности оценок рисков при применении количественных методов.

Для системного анализа принимаемых решений в области оценивания рисков полезно привлечение идеи развития диаграммы Фармера о графической интерпретации и определении характеристических областей и зон техногенного риска, в частности исследование динамики кривых изориска с учетом влияния неопределенности состояний ОПО [11]. Так как принятие решений в условиях неопределенности связано с неизбежным риском, для его снижения необходим системный анализ риска, который предполагает использование различных методов получения количественных данных о безопасности ОПО при принятии решений.

Таблица 1. Краткая характеристика содержания нормативных документов по оцениванию рисков ОПО

Документ	Содержание	Исследуемые задачи
Методика визначення ризиків та їх прийнятих рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки [8]	Порядок проведения анализа опасности и оценки риска, методические принципы, термины и понятия анализа риска, критерии приемлемых рисков и их уровни	«Дерево» отказов, «дерево» событий; анализ видов и последствий отказов; обработка статистических данных об аварийности технологической системы, соответствующих специфике или виду деятельности; экспертные оценки вероятности возникновения события, выполненные по определенной методике; другие обоснованные методы оценки
РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов [9]	Указания по проведению анализа риска, методические принципы, термины и понятия анализа риска, общие требования к процедуре и оформлению результатов, основные методы анализа опасностей и риска аварий	Анализ «Что будет, если...?»; метод проверочного листа; анализ опасности и работоспособности; анализ видов и последствий отказов; анализ деревьев отказов и событий; количественный анализ риска
ISO / IEC 31010:2009. Менеджмент риска. Методики оценки риска [10]	Руководящие принципы выбора и применения систематических методик оценки риска	Анализ опасности и работоспособности (HAZOP); структурированная методика «Что, если...?» (SWIFT); анализ сценариев; анализ влияния на деятельность; анализ первоначальной причины; анализ характера и последствий отказов; анализ «дерева» неисправностей; анализ причины и последствия; анализ «дерева» решений; анализ надежности оператора; анализ схемы «галстук-бабочка»; имитационное моделирование методом Монте-Карло; Байесова статистика и сети Байеса; кривые FN (кривая Фармера); показатели риска; матрица последствий и вероятности; анализ затрат и выгод; многокритериальный анализ принятия решений (MCDA)

Таблица 2. Математический аппарат оценивания рисков

Математический аппарат	Причины риска				
	Неполнота информации	Стохастичность информации	Субъективное поведение ЛПП*	Нечеткость информации	Многокритериальность задачи
Теория вероятностей и математическая статистика [12]	+	+	—	+	—
Теория нечетких множеств [12]	—	+	+	+	—
Теория гиперслучайных величин [13]	+	+	+	+	+
Теория экспертного оценивания [14]	+	+	—	+	+

\*ЛПП — лицо, принимающее решение.

Качество принятия решений в большинстве случаев зависит от используемых методов выбора решений. Поэтому для повышения достоверности оценок риска ОПО при выборе математического аппарата [12, 13] рекомендуется учитывать причины рисков (табл. 2).

Анализ математического аппарата показал, что перспективным направлением исследований для усовершенствования вероятностных моделей оценивания безопасности является развитие и применение теории гиперслучайных величин.

Для оценивания рисков при принятии решений по безопасности объектов повышенной опасности рекомендуются количественные методы [12]. Количественные методы оценивания риска представлены в табл. 3.

Так как выбор метода оценки риска чаще всего зависит от компетентности лица, принимающего решения, и условий, в которых будет приниматься решение, для повышения качества оценивания рисков при принятии решений по безопасности объектов повышенной опасности предлагается соответственно систематизировать

Таблица 3. Количественные методы оценивания риска

Метод оценивания риска	Определение величины риска	Особенности
Неравенство Маркова	$R = P(X < a) < \frac{m_x}{a},$ где $m_x$ — математическое ожидание; $X$ — случайная величина; $a$ — число	
	$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot p_i - m_x^2,$ где $\sigma_x^2$ — дисперсия, определяет величину риска для дискретной величины $X$	
	$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - m_x^2,$ где $\sigma_x^2$ — дисперсия, определяет величину риска для непрерывной величины $X$	
Для равномерного распределения случайной величины	$P(x < a) = F(a); P(a < x) = \int_{-\infty}^a f(x) dx,$ где $P$ — вероятность того, что случайная величина $X$ будет меньше любого заданного значения $a$ ; $F(a)$ — функция распределения в точке; $f(x)$ — плотность распределения случайной величины $X$	Применяется в условиях стохастической информации; если факторы, определяющие риск, являются случайными, величина риска может определяться случайным событием, случайной величиной, функцией от случайных аргументов и плотностью. В зависимости от вида риска и имеющихся исходных данных величина риска может оцениваться вероятностью, дисперсией, математическим ожиданием, функцией и плотностью распределения
	$P(a \leq x \leq b) = F(b) - F(a); P(a \leq x \leq b) = \int_b^a f(x) dx,$ где $P$ — вероятность попадания случайной величины $X$ в интервал $[a; b]$	
Для гауссова закона	$P(a \leq x \leq b) = \Phi\left(\frac{b - m_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{a - m_x}{\sigma_x}\right),$ где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ — табулированная функция Лапласа; $P(a \leq x \leq b) = \int_b^a f(x) dx; \int_b^a f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}},$ где $f(x)$ — гауссов закон распределения случайной величины $X$	
Неравенство Чебышева	$P( x - m_x  \leq \varepsilon) \geq 1 - \frac{\sigma_x^2}{\varepsilon^2}; P( x - m_x  > \varepsilon) \leq \frac{\sigma_x^2}{\varepsilon^2},$ где случайная величина $X$ имеет конечную дисперсию $\sigma_x^2$ и математическое ожидание $m_x$ ; $\varepsilon$ — любое положительное число	
Z-модель	$Z = \sum_{i=1}^n k_i \cdot Z_i + Z_0; P = \frac{1}{1 + e^{-Z}},$ где $Z_i$ — частные показатели состояния объекта; $k_i$ — коэффициенты приоритетности частных показателей; $P$ — вероятность нахождения объектов исследуемом состоянии	

Метод оценивания риска	Определение величины риска	Особенности
Критерий Вальда*	$X_{\text{опт}}^B = \{x_k \in X \cap \alpha = \max_i \min_j a_{ij}\}$ , где $X$ – критерий крайнего пессимизма; $a_{ij}$ – элемент матрицы выигрышей	Применяется в условиях неопределенности состояния; если факторы, определяющие риск, четко не заданы (неопределены), т. е. нет информации о состоянии среды, то принимаемые решения будут обусловлены субъективным риском для ЛПР
Критерий Сэвиджа	$X_{\text{опт}}^C = \{x_k \in X \cap \max_i \min_j r_{ij}\}$ , где $X$ – критерий крайнего пессимизма; $r_{ij}$ – элемент матрицы рисков	
Критерий Гурвица	$X_{\text{опт}}^G = \{x_k \in X \max_i [\lambda \min_j a_{ij} + (1-\lambda) \max_j a_{ij}]\}$ , где $\lambda$ – весовой коэффициент, лежащий в интервале [0; 1]; $a_{ij}$ – элемент матрицы выигрышей	
Критерий Ходжа-Лемона	$X_{\text{опт}}^{X-L} = \{x_k \in X \cap \max [\lambda \sum a_{ij} q_i + (1-\lambda) \min a_{ij}]\}$ , где $\lambda$ – коэффициент, характеризующий степень доверия к используемым вероятностям состояния среды $q_{ij}$	
Критерий Гермейера	$X_{\text{опт}}^{\text{Герм}} = \{x_k \in X \cap \min_j a_{ij} q_{ij}\}$ , где $X$ – максиминный критерий	
Критерий Байеса	$X_{\text{опт}}^B = \{x_k \in X \cap a_k = \max \bar{a}_i\}$ , где $X$ – критерий оптимальности; $a_k = \max \bar{a}_i$ – максимальное математическое ожидание выигрышей	

\* $X_{\text{опт}}$  – оптимальная стратегия (решение).

представленные в табл. 3 количественные методы оценивания риска в зависимости от условий, в которых ЛПР принимает решение:

Характеристика условий	Рекомендуемые методы и критерии оценивания риска
Стохастическая необходимая информация	Определение риска математическим ожиданием случайной величины; по функции распределения случайной величины; по неравенству Чебышева; по закону распределения Гаусса; Z-моделью; матричными играми; по коэффициенту вариации; по неравенству Маркова
Неопределенность состояния среды	Критерий Байеса; Вальда; Сэвиджа; Гурвица; Ходжа-Лемона; Гермейера; Лапласа
Нечеткая необходимая информация	Нечеткими играми; на основе лингвистических переменных
Конфликтная ситуация	По принципу максимина
Многокритериальная задача	Оптимальными по Парето; определение коэффициентов приоритетных частных критериев: - по формуле Фишберна; - метод Уэя; - метод Саати

Представленная систематизация может способствовать повышению качества оценивания рисков таких ОПО, как АЭС, поскольку позволяет упорядочить методы оценивания риска для их выбора в зависимости от условий принятия решений.

Таким образом, можно сформулировать следующий подход к комплексному оцениванию рисков при принятии решений по безопасности ОПО:

- 1) получение и обработка данных для оценивания рисков;
- 2) анализ полученной информации о безопасности ОПО;
- 3) определение причин (факторов) и последствий риска;
- 4) выбор математического аппарата для оценивания риска;
- 5) анализ характера необходимой информации и определение условий, в которых ЛПР будет принимать решения;
- 6) выбор метода оценивания рисков на базе предложенной систематизации;
- 7) определение методики оценивания рисков;
- 8) анализ и регистрация полученных данных.

Предложенная последовательность действий при определении метода оценивания рисков ОПО может способствовать сокращению затрат ресурсов на определение необходимых методов и повысить достоверность оценивания рисков.

#### Выводы

Представленная систематизация методов оценивания рисков при принятии решений по безопасности АЭС может служить основанием для разработки требований

и методических рекомендаций относительно технической адекватности и стандартизации количественных методов оценивания, которые применяются для риск-информированного принятия решений.

### Список использованной литературы

1. Про об'єкти підвищеної небезпеки: Закон України // Відомості Верховної Ради (ВВР). — 2001. — № 15. — Ст. 73.
2. Севбо А. Е. Состояние и проблемы управления рисками при эксплуатации АЭС / А. Е. Севбо, А. В. Тарановский // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — № 4(52). — С. 49–55.
3. Маловик К. Н. Развитие научных основ повышения качества оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик сложных объектов: Монография / К. Н. Маловик. — Севастополь : СНУЯЭиП, 2013. — 332 с.
4. НП 306.2.141–2008. Загальні положення безпеки атомних станцій / ПП «Інженерні технології та розробки». — К. : Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. — 57 с. — (Норми та правила з ядерної безпеки).
5. Требования к содержанию отчета по анализу безопасности АС с реакторами типа ВВЭР на стадии выдачи разрешения на ввод в эксплуатацию : КНД 306.302–96. — К., 1997.
6. Системы управления и защиты ядерных реакторов / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская, Г. Джонсон, В. В. Елисеев, А. А. Сиора, В. В. Скляр, Л. И. Спектор, В. С. Харченко; Под ред. М. А. Ястребенецкого. — К. : Основа-Принт, 2011. — 768 с. — (Безопасность атомных станций).
7. Вероятностный анализ безопасности атомных станций: Учеб. пособие / В. В. Бегун, О. В. Горбунов, И. Н. Каденко, Е. Н. Письменный, А. Ю. Зенюк, Л. Л. Литвинский. — К., 2000. — 568 с.
8. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. — Затвердж. наказом М-ва праці та соціальної політики України 04.12.2002 № 637.
9. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — Утвержд. Госгортехнадзором России Постановлением от 10.07.2001 № 30. — Срок введения в действие 1.10.2001.
10. IEC 31010:2009. Risk management. Risk assessment techniques. — 176 p.
11. Маловик К. Н. Безопасность объектов критического применения. Развитие диаграммы Фармера / К. Н. Маловик, М. А. Елисеева // Стандарты и качество. — 2013. — № 7. — С. 40, 41.
12. Василевич Л. Ф. Количественные методы принятия решения в условиях риска / Л. Ф. Василевич, К. Н. Маловик, С. Б. Смирнов : Учеб. пособие. — Севастополь : СНУЯЭиП, 2006. — 232 с.
13. Горбань И. И. Теория гиперслучайных явлений / И. И. Горбань. — К., 2007. — 184 с.
14. Герасимов Б. М. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности: Монография / Б. М. Герасимов, М. М. Дивизинюк, И. Ю. Субач. — Севастополь : СНУЯЭиП, 2004. — 320 с.

### References

1. About objects of increased danger : The law of Ukraine // Supreme Council (VVR). — 2001. — № 15. — Article 73.
2. Sevbo A. E., Taranovsky A. V. Status and problems of risk management at operating NPPs // Nuclear and radiation safety. — 2011. — № 4 (52). — P. 49–55.
3. Malovik K. N. Development of scientific bases for raising the quality of estimation and forecasting of resource characteristics of complex objects : Monograph. — Sevastopol : SNUNEI, 2013. — 332 p.
4. NP 306.2.141–2008. General provisions on safety assurance of nuclear power plants. The state Inspectorate on nuclear regulation of Ukraine.
5. Requirements to the content of the safety analysis report for NPP with VVER-type reactors at the stage of issuing a commissioning permit». KND 306.302–96. — Kyiv, may, 1997.
6. Control and protection system of nuclear reactors / M. A. Yastrebenetsky, J. V. Rosen, S. V. Vynohradskaya, G. Johnson, V. V. Eliseev, A. A. Siora, V. V. Sklyar, L. I. Spector, V. S. Kharchenko; Ed. by M. A. Yastrebenetsky — K. : Osнова-Print, 2011. — 768 p.
7. Probabilistic analysis of safety of nuclear stations. Uch. manual / V. V. Runner, O. V. Gorbunov, I. N. Kadenko, E. N. Pismennii, A. Yu. Zenuk, L. L. Litvinskii. — Kyiv, 2000. — 568 p.
8. Methodology of determination of risks and their acceptable levels for the Declaration of safety of objects of increased danger // Approved Order of the Ministry of labour and social policy of Ukraine 04.12.2002 N 637.
9. RD 03-418-01. Methodical instructions on the risk analysis performance for hazardous industrial objects // Created and made the Scientific and technical Department and the state unitary enterprise STC «Industrial safety» with the participation of the branch offices of the Gosgortekhnadzor of Russia. Approved by Gosgortekhnadzor of Russia the Resolution of 10.07.2001 № 30. — Period of the introduction of 1.10.2001.
10. IEC 31010:2009. Risk management. Risk assessment techniques. — 176 p.
11. Malovik K. N., Eliseeva M. A. Objects Safety critical applications. Development of chart farmer // Magazine «Standards and quality». On competition of a scientific degree. — Moscow : LLC «RIA «Standards and quality», 2013. — № 7. — P. 40, 41.
12. Vasilevich L. F., Malovik K. N., Smirnov S. B. Quantitative methods for decision making under conditions of risk // Textbook. manual. — Sevastopol: SNUNEI, 2006. — 232 p.
13. Gorban I. I. Theory of Hyper-random phenomena. — Kyiv, 2007. — 184 p.
14. Gerasimov B. M., Dvyzynyuk M. M., Subach I. Y. Decision support Systems: design, application, evaluation of effectiveness : Monograph. — Sevastopol : SNUNEI, 2004. — 320 p.

Получено 11.12.2013.