

О применении теории нечетких множеств для оценки неопределенностей вероятностного анализа безопасности АЭС

Рассмотрены вопросы практического применения теории нечетких множеств для оценки неопределенностей вероятностного анализа безопасности АЭС как альтернативы статистическим методам. Представлено сравнение результатов оценок вероятности и неопределенности отказа функции безопасности, выполняемой пассивной частью системы аварийного охлаждения активной зоны реактора, методом теории нечетких множеств и методом Монте-Карло.

Ключевые слова: неопределенность, теория нечетких множеств, нечеткое число, функция безопасности.

О. М. Дибач

Про застосування теорії нечітких множин для оцінки невизначеностей імовірнісного аналізу безпеки АЕС

Розглянуто питання практичного застосування теорії нечітких множин для оцінки невизначеностей імовірнісного аналізу безпеки АЕС як альтернативи статистичним методам. Порівняно результати оцінок імовірності та невизначеності відмови функції безпеки, виконуваної пасивною частиною системи аварійного охолодження активної зони, методом теорії нечітких множин та методом Монте-Карло.

Ключові слова: невизначеність, теорія нечітких множин, нечітке число, функція безпеки.

© А. М. Дыбач, 2015

Решение проблемы оценки и учета неопределенностей вероятностного анализа безопасности (ВАБ) [1–3] является обязательным условием практического применения вероятностных методов при принятии решений, влияющих на безопасность АЭС [4, 5].

Используемые с этой целью математические методы [6] упрощенно можно классифицировать по двум группам:

1. *Статистические методы.* Это методы теории вероятностей (метод Монте-Карло, метод латинского гиперкуба и др.), которые базируются на том, что неточности задания входных параметров имеют вероятностный характер, т. е. их значения имеют определенную функцию распределения плотности вероятности с соответствующими числовыми характеристиками. Комбинации с помощью генератора случайных чисел вероятностных значений входных параметров приводят к функциям распределения плотности вероятности возможного значения результирующего параметра, когда его отклонения носят также вероятностный характер.

2. *Аналитические методы.* Это методы, основанные на различных математических теориях: метод обобщенной теории возмущений, метод чувствительности, метод квантильных оценок, метод теории нечетких множеств.

В настоящее время статистические методы являются доминирующими при выполнении оценки неопределенностей ВАБ. Их алгоритмы и математические модели хорошо проработаны и реализованы в вероятностных расчетных кодах (SAPHIRE, RiskSpectrum и др.). Однако статистические методы обладают следующими недостатками [7]:

необоснованным в ряде случаев представлением неточности входных параметров как случайных величин;

необоснованным зачастую принятием функции распределения плотности вероятности (в большинстве случаев предполагается нормальное или логнормальное распределение);

сложностью применения в случае неопределенностей, которые не связаны с неточностью входных параметров.

Аналитические методы можно рассматривать в качестве альтернативы традиционным статистическим методам. При этом использование аналитических методов для оценки неопределенностей ограничено ввиду необходимости адаптации математических теорий для решения практических задач ВАБ. Среди них наиболее перспективным видится применение теории нечетких множеств (Fuzzy Sets). Вопросы применения теории нечетких множеств в анализе надежности систем и построении деревьев отказов находят свое развитие в зарубежных публикациях [8, 9], в этом же направлении ведутся работы в Одесском национальном политехническом университете [10].

В данной статье представлен практический пример использования теории нечетких множеств для оценки неопределенностей ВАБ, а также сравнение полученных результатов с методом Монте-Карло.

Основы теории нечетких множеств. Основоположителем теории нечетких множеств Л. Заде сформулирован принцип несовместимости, согласно которому сложность системы и точность, с которой ее можно проанализировать традиционными методами, находятся в состоянии взаимного противоречия: «...чем ближе мы подходим к решению проблем реального мира, тем очевиднее, что при увеличении сложности системы наша способность делать точные и уверенные заключения о ее поведении уменьшаются до определенного порога, за которым точность и уверенность становятся почти взаимоисключающими понятиями» [10]. Этот принцип стал одной из главных предпосылок появления в 1965 году нечеткой математики и ее базы — теории нечетких множеств.

Методы, базирующиеся на теории нечетких множеств, относятся к методам оценки и принятия решений в условиях неопределенности, причем вместо распределения вероятности применяется распределение возможности, описываемое функцией принадлежности нечеткого числа. Использование этих методов предполагает формализацию входных параметров в виде вектора интервальных значений (нечеткого интервала), попадание в каждый интервал которого характеризуется некоторой степенью неопределенности. На основе исходной информации, опыта и интуиции можно количественно охарактеризовать границы (интервалы) возможных значений параметров и области их наиболее возможных (предпочтительных) значений.

Нечетким множеством A в некотором непустом пространстве X называется множество пар $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\}$, где $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$ — функция принадлежности нечеткого множества A . Эта функция приписывает каждому элементу x степень его принадлежности нечеткому множеству A .

Ряд подходов, позволяющих применить нечеткие числа (нечеткую логику) к деревьям отказов в процессе выполнения ВАБ, описан в [8, 9]. Один из них, называемый нечеткой вероятностью (Fuzzy Probability), заключается в представлении вероятностей базовых событий (БС) вероятностной модели в виде нечетких чисел, применении математических операций над ними и получения результирующей функции принадлежности. После дефазификации (выделения единственного значения выходной переменной логической модели из множества возможных значений по её функции принадлежности) можно определить точечное значение вероятности отказа всей системы и границы области неопределенности.

Практическое применение метода нечетких множеств. Сравнение результатов расчета методом теории нечетких множеств и методом Монте-Карло. Выполним оценку вероятности отказа выполнения системой возложенных на нее функций и неопределенности ее расчета с применением метода нечетких множеств на примере пассивной части системы аварийного охлаждения активной зоны (далее — ГЕ САОЗ) для энергоблока ВВЭР-1000. В вероятностном

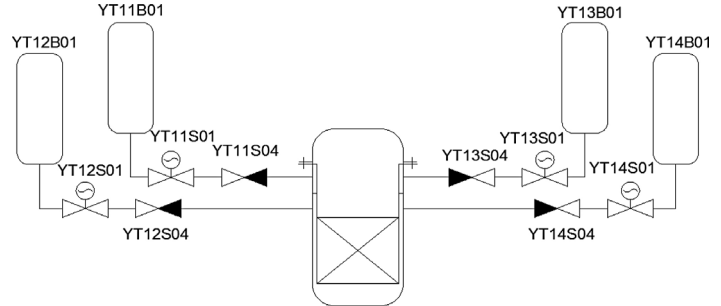


Рис. 1. Упрощенная схема ГЕ САОЗ для построения ДО

анализе безопасности ГЕ САОЗ выполняет функцию ввода в 1-й контур и обеспечения запаса теплоносителя в 1-м контуре [12].

Для построения дерева отказов (ДО) технологическую схему ГЕ САОЗ можно представить упрощенно (рис. 1), исходя из следующих предположений по критериям успеха системы:

- подача раствора борной кислоты в 1-й контур обеспечивается не менее чем из двух гидроемкостей (по одной ГЕ в верхнюю и нижнюю камеры смешения реактора);

- попадание азота из любой ГЕ в 1-й контур исключается.

ДО ГЕ САОЗ (рис. 2) состоит из 9 базовых событий, параметры надежности однотипного оборудования приняты одинаковыми [12].

Приведем пример оценки вероятности отказа выполнения функции безопасности ГЕ САОЗ и неопределенности ее расчета *методом нечетких множеств* с применением программного средства R (пакет FuzzyNumbers). R — язык программирования для статистической обработки данных [13].

Полагая вероятности отказов БС нечеткими числами, применим к их функциям принадлежности (рис. 3) правила сложения и умножения вероятностей событий (принята трапециевидальная функция принадлежности БС, что соответствует [8, 9]). В результате получим функцию принадлежности

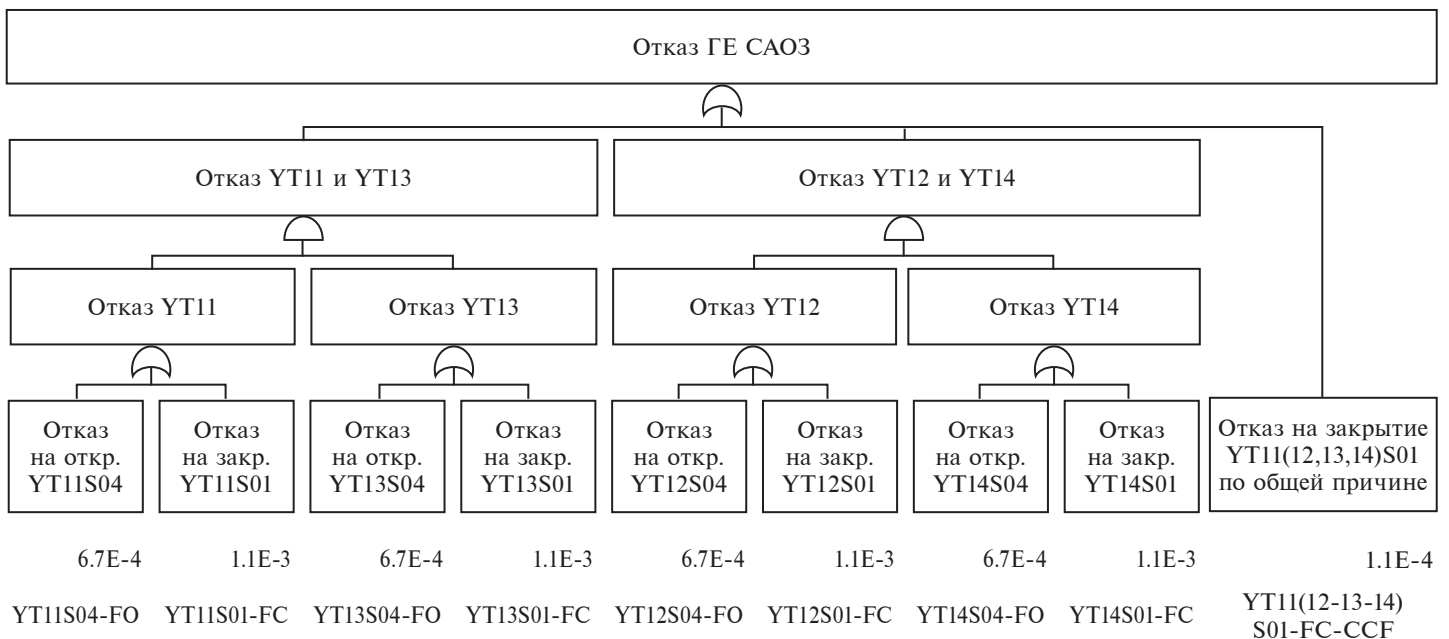


Рис. 2. Дерево отказов ГЕ САОЗ

Таблица 1. Параметры базовых событий ДО ГЕ CAO3

Обозначение БС	Описание БС	Вероятность отказа	Тип распределения	Фактор ошибки	Среднее значение
YT11(12,13,14)S01-FC-CCF	Отказ запорных арматур по общей причине	1,066E-004	Логнормальный	1,211	1,067E-004
YT11(12,13,14)S04-FO	Отказ на открытие обратного клапана	6,660E-004	Логнормальный	1,77	6,588E-004
YT11(12,13,14)S01-FC	Отказ на закрытие запорных арматур	1,070E-003	Логнормальный	1,21	1,070E-003

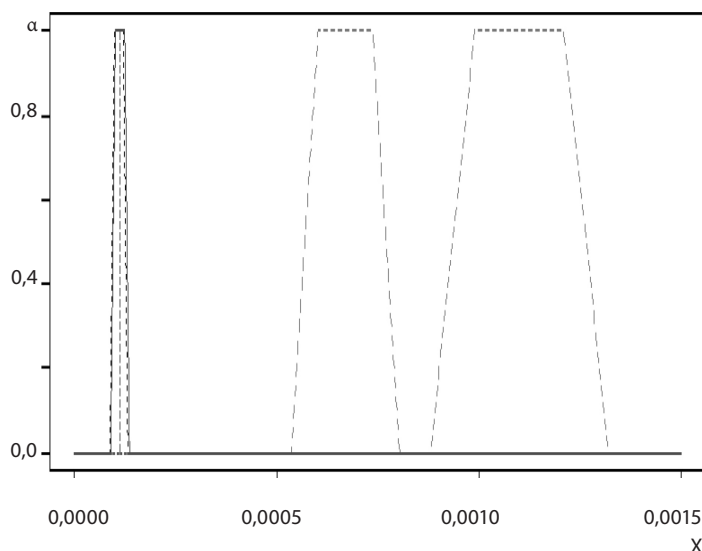


Рис. 3. Функции принадлежности БС:

α — значение функции принадлежности, x — вероятность отказа БС; параметры функции принадлежности задаются с учетом достоверности входных данных

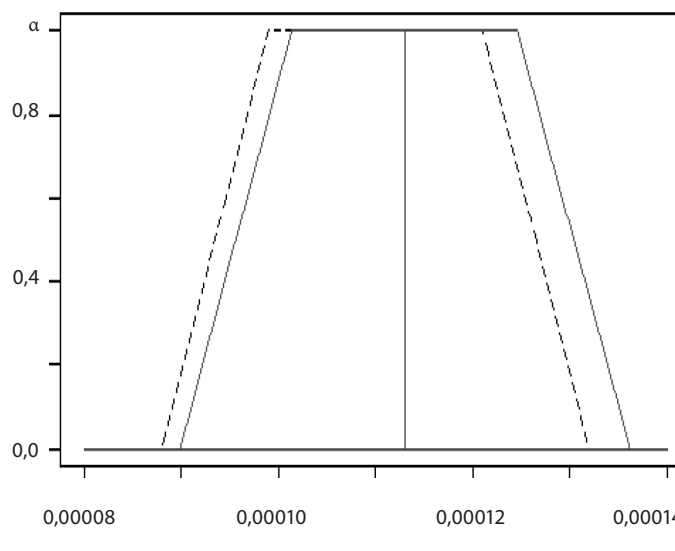


Рис. 4. Результирующая функция принадлежности результатов расчетов

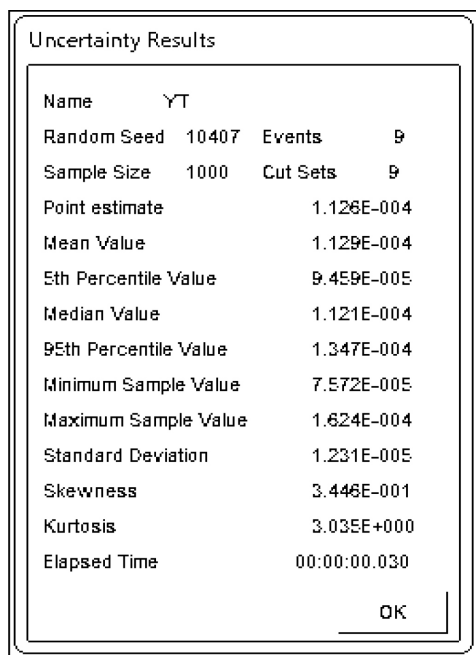


Рис. 5. Результаты анализа неопределенностей расчета ДО ГЕ CAO3 методом Монте-Карло (код SAPHIRE)

для всего ДО (рис. 4). Следует отметить, что определяющим является БС с отказом арматур YT11(12,13,14)S01 по общей причине. После дефазификации получаем точечное значение суммарной вероятности отказа выполнения функции безопасности ГЕ CAO3, равное $1,15E-04$, интервал неопределенности — $9,00E-05...1,38E-04$.

Просчитав ДО ГЕ CAO3 в коде SAPHIRE с использованием метода Монте-Карло, получим следующие результаты (рис. 5): точечное значение суммарной вероятности отказа выполнения функции безопасности — $1,126E-04$, границы доверительного интервала — $9,459E-05...1,347E-04$.

Результаты расчета ДО ГЕ CAO3 методом теории нечетких множеств (код R) и методом Монте-Карло (код SAPHIRE) свидетельствуют о хорошей сходимости точечных значений вероятности и неопределенности отказа выполнения ГЕ CAO3 возложенной функции безопасности.

Выводы

Применение метода нечетких множеств для оценки неопределенностей ВАБ возможно в качестве альтернативы традиционным статистическим методам. При этом вероятности базовых событий вероятностной модели задаются

в виде нечетких чисел с соответствующими функциями принадлежности; дальнейшие математические операции над ними позволяют получить результирующую функцию принадлежности, из которой определяется точечное значение рассчитанного параметра и границы его области неопределенности.

По результатам выполненных оценок методом теории нечетких множеств (код R) и методом Монте-Карло (код SAPHIRE) на примере ГЕ САОЗ подтверждена сходимость точечных значений вероятности отказа выполнения системой функции безопасности и величины неопределенностей оценок.

Список использованной литературы

1. Дыбач А. М. Методологические основы анализа и учета неопределенностей вероятностного анализа безопасности АЭС / А. М. Дыбач // Ядерная та радіаційна безпека. — К., 2014. — Вип. 4 (64). — С. 8—16.
2. Применение риск-информированных подходов в инспекционной деятельности / Г. В. Громов, А. М. Дыбач, А. Е. Севбо, М. Х. Гашев, В. С. Бойчук // Ядерная та радіаційна безпека. — К., 2010. — Вип. 3 (47). — С. 9—15.
3. Abrahamsson M. Uncertainty in Quantitative Risk Analysis. Characterisation and Methods of Treatment // Report 1024. — (ISSN: 1402-3504, ISRN: LUTVDG/TVBB-1024-SE).
4. Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making / U. S. Nuclear Regulatory Commission. — 2009. — (NUREG-1855, Vol. 1).
5. A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process. — Vienna : IAEA, 2011. — (INSAG-25).
6. Ковалевич О. М. Необходимые аспекты решения проблемы погрешностей и неопределенностей / О. М. Ковалевич, А. Н. Румянцев // Ядерная та радіаційна безпека. — 2009. — № 4(54). — С. 26—33.
7. Костерев В. В. О математических моделях для обработки неопределенностей. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3803>.
8. Singer D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis // Fuzzy Sets and Systems. — Vol. 34, Iss. 2. — 1990. — P. 145—155.
9. Cheng Yue-Lung. Uncertainties in Fault Tree Analysis // Journal of Science and Engineering, 2007. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/3-1/3-1-3.pdf>
10. Оценка надежности основного оборудования с применением экспертных методов / Харабет А. Н., Зотеев О. Е., Зотеев В. О., Чулкин О. А. // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. «Повышение безопасности и эффективности атомной энергетики». — Одесса, 2014.
11. Zadeh, L. A. Fuzzy sets. Information and Control Theory. — Dept. Electrical Engineering and Electronics Res. Lab., Univ. California, 1965. — P. 338—353.
12. Звіт ДНТЦ ЯРБ про науково-дослідну роботу «Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВВЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів». Етап 2 : Модель та її технічний опис. — К. : ДНТЦ ЯРБ, 2010.
13. Manuals for R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics. Version 3.1.2 (2014-10-31). [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.r-project.org/>

References

1. Dybach, A. M. (2004), “Methodological Basis for Analysis and Accounting of NPP Probabilistic Safety Analysis Uncertainties” [Metodologicheskiye osnovy analiza i ucheta neopredelennosti veroyatnostnogo analiza bezopasnosti AES], Yaderna ta radiatsiina bezpeka (Nuclear and Radiation Safety), No. 4 (64), pp. 8—16. (Rus)
2. Gromov, G. V., Dybach, A. M., Sevbo, A. E., Gashev, M. Kh., Boichuk, V. S. (2010), “Application of Risk-Informed Approaches in Inspections” [Primeneniye risk-informirovannykh podkhodov v inspektionnoi deyatel'nosti], Yaderna ta radiatsiina bezpeka (Nuclear and Radiation Safety), No. 3 (47), pp. 9—15. (Rus)
3. Abrahamsson, M., Uncertainty in Quantitative Risk Analysis. Characterisation and Methods of Treatment, Report 1024, ISSN: 1402-3504, ISRN: LUTVDG/TVBB-1024-SE.
4. NUREG-1855, Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making, Vol. 1, U. S. Nuclear Regulatory Commission (2009).
5. INSAG-25, A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process, IAEA, Vienna (2011).
6. Kovalevich, O. M., Romyantsev, A. N. (2009), “Necessary Aspects to Solve the Issue of Errors and Uncertainties” [Neobkhodimyye aspekty resheniya problem pogreshnostey i neopredelonnostey], Yaderna ta radiatsiina bezpeka (Nuclear and Radiation Safety), No. 4 (54), pp. 26—33. (Rus)
7. Kosterev V. V., “On mathematical models for treatment of uncertainties” [O matematicheskikh modelyakh dlya obrabotki neopredelonnostey], available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3803>. (Rus)
8. Singer, D. (1990), “A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis”, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 34, Issue 2, pp. 145—155.
9. Cheng Yue-Lung (2007), “Uncertainties in Fault Tree Analysis”, Journal of Science and Engineering, available at: <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/3-1/3-1-3.pdf>.
10. Kharabet, A. N., Zoteev, O. E., Zoteev, V. O., Chulkin, O. A. (2014), Reliability assessment of basic equipment using expert methods [Otsenka nadezhnosti osnovnogo oborudovaniia s primeneniem ekspertnykh metodov], Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference “Improvement of Safety and Effectiveness of Nuclear Energy”, Odessa. (Rus)
11. Zadeh, L. A. (1965), Fuzzy Sets, Information and Control Theory, Dept. Electrical Engineering and Electronics Res. Lab., University of California, pp. 338—353.
12. Development of Level 1 PSA Model for Internal Initiators for WWER-1000/320, Stage 2: Model and Its Technical Description [Rozrobka imovirnisnoi modeli analizu bezpeky AES iz VVER-1000/320 1-go rivnya stosovno vnutrishnikh initsiatoriv, Etap 2: Model ta ii tekhnichniy opys], SSTC NRS R&D Report, Kyiv (2010). (Ukr)
13. “Manuals for R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics, Version 3.1.2 (2014-10-31)”, available at: <http://www.r-project.org/>.

Получено 10.02.2015.