

УДК 621.039.58

Р. Ш. Кальметьев, А. С. Филиппов, Д. В. Михайлович

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Анализ значимости и чувствительности результатов вероятностного анализа безопасности АЭС

Приведена основная цель анализа значимости и анализа чувствительности. Рассмотрены классы и типы анализа значимости и анализа чувствительности. Описаны методики анализа значимости и анализа чувствительности.

Ключевые слова: анализ значимости, анализ чувствительности, исходные данные, модель.

Целью анализа значимости является идентификация важных событий с точки зрения вероятностных показателей безопасности [1].

Целью анализа чувствительности является [1]:

1) Определение возможных зависимостей среди составляющих отказов, критериев успеха и ошибок оператора и влияния этих зависимостей на вероятностный показатель безопасности.

2) Моделирование предположений, которые могут потенциально влиять на результаты. События, рассматриваемые в анализе значимости [2]:

- аварийная последовательность;
- исходные события;
- системные отказы;
- компоненты отказов;
- отказы по общей причине;
- ошибки оператора.

Показатели, рассматриваемые в анализе значимости [2]:

- частота повреждения активной зоны;
- частота аварийной последовательности;
- неготовность системы.

Анализ чувствительности состоит из двух частей: анализ чувствительности исходных данных и анализ чувствительности модели. Анализ чувствительности исходных данных состоит в исследовании влияния результатов изменений в исходных данных (например, частотах инициаторов, составляющих интенсивностях отказов, вероятности ошибки оператора и т.д.) на результаты ВАБ. Чувствительность модели — степень влияния изменений модели на результаты ВАБ [2].

Анализ чувствительности выполняется для:

- событий по тестированию и восстановлению;
- ошибок оператора;
- отказов по общей причине;
- восстановления ошибок оператора;
- восстановления отказов оборудования.

Таким образом, результаты анализа значимости помогают выбрать те базовые события, которые больше всего влияют на вероятностные показатели безопасности. А анализ чувствительности помогает выбрать те базовые события, при которых относительно малые их изменения приводят к относительно большим изменениям вероятностных показателей безопасности.

1. Методика анализа значимости

Анализ значимости — это анализ результатов квантификации с точки зрения вкладов различных групп базовых событий, исходных событий, аварийных последовательностей и других объектов анализа в суммарную частоту повреждения активной зоны [3].

Существуют два класса анализа значимости:

- 1) качественный анализ значимости;
- 2) количественный анализ значимости.

Качественный анализ значимости — вероятностный показатель безопасности, который получается из логической структуры моделей ВАБ. Качественная оценка ВАБ обеспечивает критерии, необходимые для анализа значимости составляющих вкладов в риск.

Количественный анализ значимости — анализ составляющих вероятностного показателя безопасности, полученных в результате количественной оценки ВАБ.

В качестве показателей значимости используются следующие:

- показатель значимости Fussell–Vesely;
- инспекционный показатель значимости;
- линейный показатель значимости;
- нормированный показатель значимости;
- показатель увеличения риска;
- показатель снижения риска.

Показатели значимости для базовых событий

1) Показатель значимости Fussell–Vesely. Показатель значимости Fussell–Vesely (FV) события E определен как относительный вклад события в вероятностный показатель безопасности и может быть представлен следующим образом:

$$FV(E) = \frac{\sum_i P\{E \cap C_i\}}{CDF},$$

где C_i — набор событий, $\{E \cap C_i\}$ — набор минимальных сечений, который включает событие E , P — вероятность.

2) Инспекционный показатель значимости. Выражение вероятностного показателя безопасности в линейной зависимости от вероятности события E с соответствующими параметрами a и b :

$$PSI = aP\{E\} + b.$$

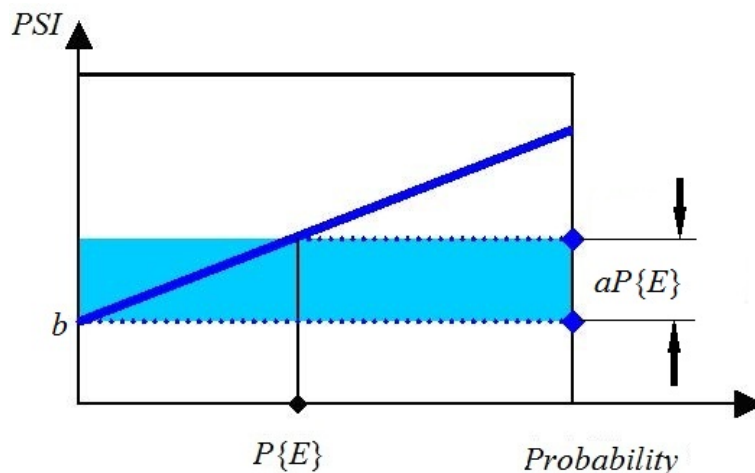


Рис. 1. Графическое представление контрольного показателя значимости

Контрольный показатель значимости (II) события E может быть определен следующим образом (рис. 1):

$$II(E) = aP\{E\}.$$

3) Линейный показатель значимости. Линейный показатель значимости события E определен как линейный вклад в вероятностный показатель безопасности.

Линейный показатель значимости события E может быть определен следующим образом:

$$LR(E) = \frac{aP\{E\}}{PSI}.$$

4) Нормированный показатель значимости. Нормированный показатель значимости события E определен как относительная зависимость вероятностного показателя безопасности от события. Нормированный показатель значимости может быть представлен как

$$NR(E) = \frac{\sum_i P\{E \cap C_i\}}{\sum_i P\{E \cap C_i\} + \sum_j P\{C_j\}},$$

где C_i — набор событий, $\{E \cap C_i\}$ — набор минимальных сечений, включающий событие E , C_j — набор минимальных сечений, не включающий событие E , P — вероятность.

5) Показатель возрастания риска. Показатель возрастания риска события E определен как вероятность выполнения верхнего события C при отказе события E . Показатель возрастания риска может быть представлен как (рис. 2):

$$RAW(E) = \frac{P\{C|E=1\}}{P\{C\}},$$

где C — верхнее событие, $E = 1$ — отказ события E , $P\{\cdot\}$ — условная вероятность.

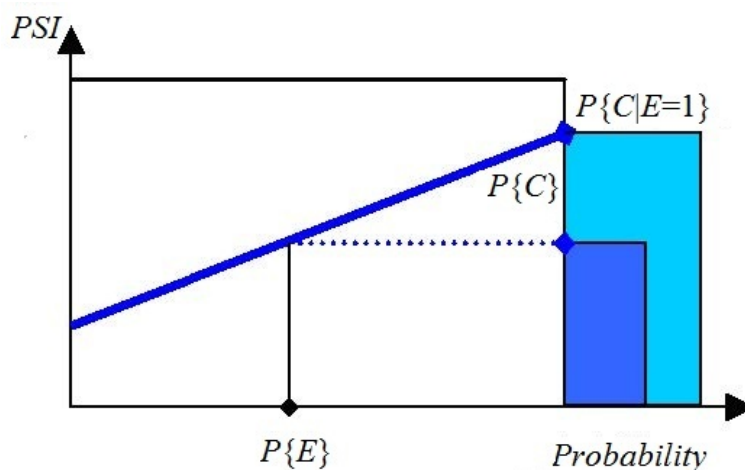


Рис. 2. Графическое представление показателя возрастания риска

6) Показатель снижения риска. Показатель снижения риска события E определен как вероятность выполнения верхнего события C при условии, что отказа события нет. Показатель снижения риска может быть получен следующим образом (рис. 3):

$$RRW(E) = \frac{P\{C\}}{P\{C|E=0\}},$$

где C — верхнее событие, $E = 0$ — отказа события нет, $P\{\cdot\}$ — условная вероятность.

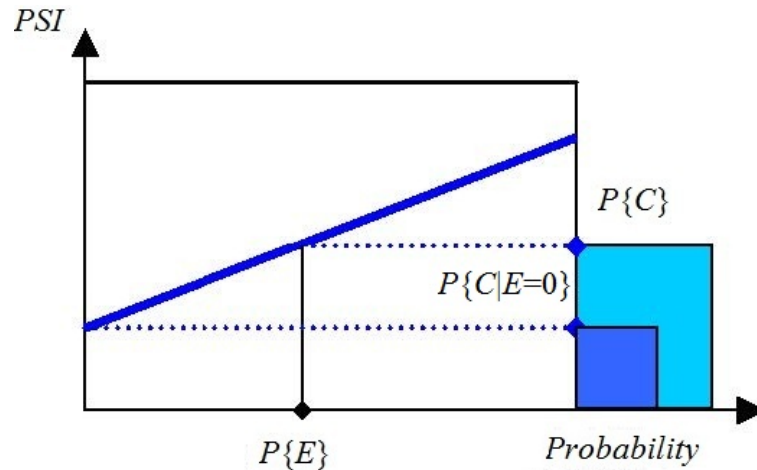


Рис. 3. Графическое представление показателя снижения риска

Показатели значимости для систем

1) Показатель значимости Fussell–Vesely системы S определен в условиях его влияния на риск при условии, что все компоненты системы являются или работоспособными или отказовыми. Пусть E_0 — верхнее событие и $P\{E_0|S=0\}$ представляет верхнее событие вероятностного показателя безопасности со всеми компонентами в системе S , являющейся работоспособной, и $P\{E_0|S=1\}$ представляет верхнее событие ВПБ со всеми компонентами системы S в состоянии отказа. Показатель значимости Fussell–Vesely системы определен как

$$FV(S) = 1 - \frac{P\{E_0|S=0\}}{CDF}.$$

2) Нормированный показатель значимости. Нормированный показатель значимости системы S определен как

$$NR(S) = 1 - \frac{\sum_i P\{S=0 \cap C_i\}}{\sum_i P\{C_i\}},$$

где C_i — набор минимальных сечений, $\{S=0 \cap C_i\}$ — набор минимальных сечений, который включает компоненты системы S , находящиеся в отказовом состоянии.

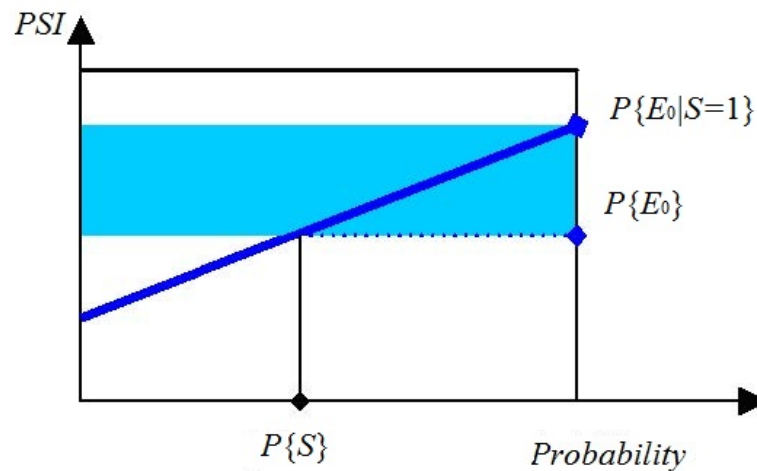


Рис. 4. Графическое представление показателя возрастания риска для системы

3) Показатель возрастания риска. Показатель возрастания риска системы S может быть определен как (рис. 4):

$$RAW(S) = P\{E_0|S=1\} - P\{E_0\}.$$

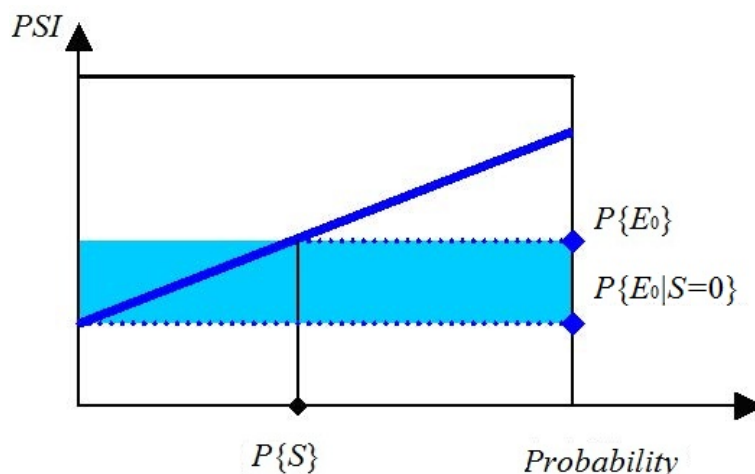


Рис. 5. Графическое представление показателя снижения риска для системы

4) Показатель снижения риска. Показатель снижения риска системы S может быть определен как (рис. 5):

$$RAW(S) = P\{E_0\} - P\{E_0|S=0\}. \quad (1)$$

2. Методика анализа чувствительности

Анализ чувствительности исследует влияние на конечные результаты ВАБ допущений, сделанных в моделях, и данных по поводу потенциально важных, но точно неизвестных факторов [3].

При анализе чувствительности изменение данных или модели может приводить как к снижению вероятности реализации сечений, так и к ее повышению.

Существует два основных типа чувствительности:

- чувствительность к данным и
- чувствительность к модели.

Количественные показатели чувствительности

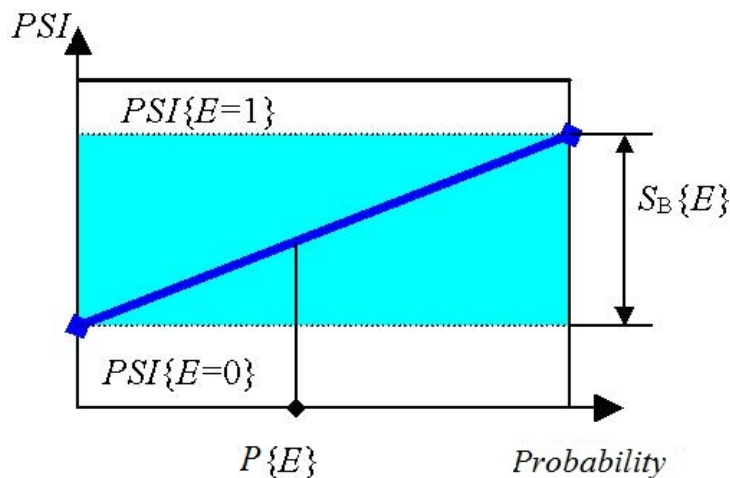


Рис. 6. Графическое представление чувствительности по Birnbaum

1) Показатель чувствительности по Birnbaum события E определен как скорость изменения вероятностного показателя безопасности относительно вероятности события E

(рис. 6):

$$S_B(E) = \frac{dPSI(E)}{dP\{E\}}.$$

2) Показатель чувствительности зависимых отказов или ошибки оператора определен как изменение меры чувствительности из-за изменения вероятности зависимого отказа:

$$S_d = PSI(P\{E|E_d\}, P\{E_d\}) - PSI(P\{E\}, P\{E_d\}),$$

где $P\{E|E_d\}$ — вероятность отказа E , зависящая от отказа, $P\{E\}$ — вероятность независимого отказа E , $P\{E_d\}$ — вероятность независимого отказа.

3) Показатель чувствительности параметра X может быть выражен как производная функции безопасности относительно X :

$$S(X) = \frac{dPSI(X)}{dX}.$$

Литература

1. PRA Procedures Guide: A Guide To The Performance Of Probabilistic Risk Assessment For Nuclear Power Plants. — NUREG/CR-2300. — January, 1983.
2. *Исламов Р.Т.* Аналитические и статистические методы анализа надежности систем и безопасности объектов атомной энергетики: Дис... доктора физико-математических наук. — М., 1995.
3. *Islamov R.* Development of Standard Probabilistic Risk Assessment Procedure Guides: Quantification Uncertainty and Sensitivity Analysis. Report for US Department of Energy. — 1998.

Поступила в редакцию 23.03.2011.