

УДК 621.039.58

*Г. А. Ершов, д-р. техн. наук, проф.; Ю. Л. Ермакович, канд. техн. наук;**М. А. Парфентьев**(ФГУП СПб «Атомэнергопроект»)**В. Б. Морозов, канд. техн. наук; Г. В. Токмачев, канд. техн. наук**(ФГУП «Атомэнергопроект»)*

Моделирование отказов по общей причине при проведении вероятностного анализа безопасности АЭС

Атомная электростанция представляет собой сложную человеко-машинную систему, характеризующуюся различными детерминированными и случайными зависимостями между ее элементами. Комплексное исследование безопасности такого объекта обеспечивается аппаратом вероятностного анализа безопасности (ВАБ), позволяющим оценить вероятность и размеры радиационных воздействий на население, персонал АЭС и окружающую среду, т. е. риск от АЭС. Одной из важнейших задач ВАБ является анализ и количественная оценка различных зависимостей, влияющих на безопасность АЭС.

Ряд важных зависимостей анализируется в рамках специальных разделов ВАБ. К ним можно отнести анализ функциональных взаимосвязей, регламентных действий персонала, влияния внешних и внутренних воздействий, таких как пожары, затопления, землетрясения, падения самолетов на площадку АЭС и др.

Однако практика показывает, что существует еще целый ряд зависимостей, которые не охвачены указанным анализом. К таким зависимостям относятся отказы по общей причине (ООП), обусловленные возникновением событий, имеющих стохастический характер и являющихся следствием таких корневых причин, как повторяющиеся человеческие ошибки при проектировании, сооружении и эксплуатации резервируемых объектов или неблагоприятное воздействие окружающей среды. Значимость ООП обусловлена тем, что они могут приводить к множественным отказам резервируемого оборудования и, как следствие, к невыполнению одной или нескольких функций безопасности при авариях на АЭС.

Всю совокупность факторов, которые могут вызвать одновременное проявление повторяющихся дефектов, «заложенных» в резервируемом оборудовании и приводящих к возникновению ООП, можно разделить на две категории [1].

К первой категории относятся факторы, обусловленные близким размещением основного и резервируемого оборудования и вызванные тепломеханическими (например, аномальной температурой или повышенной вибрацией), электрическими (например, электромагнитными помехами), радиационными, химическими или биологическими причинами.

Остальные виды инициаторов ООП связаны или с действиями эксплуатационного и ремонтного персонала АЭС (например, неточной калибровкой резервируемых элементов), или с наличием поперечных связей, рассматриваемых при проектировании АЭС как незначимые для безопасности. Примерами таких связей являются соединительный трубопровод, который может стать механизмом распространения завоздушивания резервируемого оборудования гидравлических систем, и аналогичный электрический кабель, который может быть причиной короткого замыкания в резервируемых электротехнических устройствах.

Очень важным обстоятельством, приводящим к ООП, является то, что оборудование, подверженное ООП, должно иметь некоторые факторы общности, т. е. одинаковые одну или несколько характеристик. К их числу обычно относят: тип элемента; изготовителя однотипных элементов (более значимый фактор, чем предыдущий); выполняемую функцию; место расположения; внутренние условия (например, давление или наличие коррозионно-активных жидкостей); исходное состояние (например, открытое или закрытое положение клапана); одинаковые процедуры проверок работоспособности или технического обслуживания.

Необходимость учета ООП как при проведении анализа надежности систем, важных для безопасности, так и при выполнении ВАБ предписывается нормативными документами российского надзорного органа [2] и МАГАТЭ [3].

Результаты выполненных ВАБ показывают, что вклад ООП в частоту повреждения активной зоны (ЧПЗ) может быть весьма большим. Так, для различных шведских АЭС вклад ООП находится в диапазоне 15...90 %, причем для современных АЭС с высокой кратностью резервирования систем безопасности этот вклад наиболее значителен [4], а надежность некоторых современных систем АЭС может практически полностью определяться ООП [5].

Несмотря на достаточно распространенное мнение, что ООП являются выдумкой теоретиков ВАБ, результаты ООП подкрепляются эксплуатационной статистикой. На АЭС США приблизительно 8,5 % всех отказов связаны с воздействием общей причины, причем 1,3 % от общего числа событий составляют отказы всех элементов

группы, подверженной воздействию общей причины [6]. Несмотря на относительно малый процент таких отказов, они оказывают определяющее влияние на безопасность американских АЭС, так как сразу приводят к отказу соответствующей системы. Такой вывод сделан после рассмотрения почти 32 тысяч отказов, зарегистрированных за 16 лет эксплуатации АЭС США.

Международная база данных ICDE включает, как минимум, 668 событий, относящихся к ООП, 69 из них заключались в отказе полностью всей группы элементов [7]. Наиболее часто отказывают по общей причине различные виды арматуры, центробежные насосы и дизель-генераторы.

Наиболее «громкими» ООП [8] на АЭС с ВВЭР являются авария на Ровенской АЭС (Украина) в 1982 году с разгерметизацией горячих коллекторов на четырех парогенераторах из-за массового разрушения шпилек (54 из 80) и отказы двух пар дизель-генераторов на Кольской АЭС в 1993 году, приведшие к полному обесточиванию двух энергоблоков. Широкий резонанс имели два инцидента на АЭС «Салем» в США в 1983 году, когда по аварийному сигналу ни один стержень аварийной защиты не упал в активную зону реактора, работавшего на пониженном уровне мощности (причина — некачественная смазка в размыкателях). Показательным является отказ всех восьми задвижек системы аварийного охлаждения реактора на Игналинской АЭС (Литва) при открытии во время проверки в 1989 году из-за неправильной настройки моментных муфт. Из недавних ООП, выявившихся при реагировании системы безопасности на инициирующее событие, можно упомянуть инцидент на первом энергоблоке шведской АЭС Forsmark 25 июля 2005 года, когда при внешнем обесточивании отказали два из четырех установленных дизель-генераторов.

Многофакторность общих причин определяет принципиальную невозможность разработки для каждой из них отдельной модели, детерминированно описывающей причинно-следственный механизм отказа группы резервированных элементов. Поэтому для моделирования ООП принято использовать стохастические параметрические модели. При этом ООП задаются в виде базовых (первичных) событий, вероятности возникновения которых определяются с помощью параметрических моделей и обрабатываются наравне с независимыми отказами по правилам Булевой алгебры.

При этом возможно использование двух способов моделирования.

При первом способе события ООП одновременно двух, трех, четырех и более однотипных элементов изображаются непосредственно на графе (дереве отказов или схеме функциональной целостности (СФЦ)). Такой способ применяется, например, при использовании для целей ВАБ программного комплекса SAPHIRE.

При использовании второго способа (если это обеспечивается соответствующим программным комплексом) строится граф, включающий только события независимых отказов. Затем на графе выделяются группы элементов, подверженных ООП. Для каждой такой группы выбирается тот или иной параметрический закон и задаются параметры этого закона. Преобразование исходного графа, вычисление вероятностных характеристик элементов делается автоматически.

Покажем, как реализуется второй способ с помощью рис. 1—3.



Рис. 1. Принципиальная схема элементарной системы

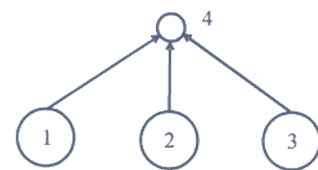


Рис. 2. Исходная СФЦ системы

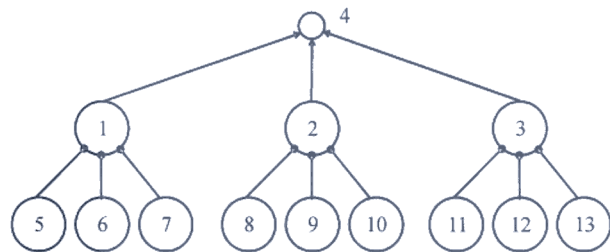


Рис. 3. СФЦ системы, модифицированная с учетом ООП:

5—13 — события, обусловленные:

5 — ООП элементов 1 и 2; 6 — ООП элементов 1 и 3; 7 — ООП элементов 1, 2 и 3; 8 — ООП элементов 2 и 1; 9 — ООП элементов 2 и 4; 10 — ООП элементов 2, 3 и 1; 11 — ООП элементов 3 и 1; 12 — ООП элементов 3 и 2; 13 — ООП элементов 3, 1 и 2

На рис. 1 приведена принципиальная схема элементарной системы, состоящей из трех элементов. Предположим, что выходная функция системы выполняется при работе любого из трех элементов. Тогда для системы может быть построена схема функциональной целостности (СФЦ), изображенная на рис. 2 (при условии, что элементы системы отказывают только по независимым причинам). Предположим, что элементы системы могут отказывать и по общей причине. Тогда исходная СФЦ должна быть преобразована к виду, изображенному на рис. 3.

Вероятности отказа событий 5—13, отображенных на рис. 3, вычисляются на основе одной из известных параметрических моделей. В идеале такая модель должна быть простой, универсальной, корректной, а также обеспечивать четкое определение параметров и совместимость с существующими источниками данных. Сложностью удовлетворения всей совокупности требований объясняется наличие большого количества разнообразных параметрических моделей, в которых отдается приоритет тем или иным достоинствам.

Наиболее часто для количественной оценки вероятностей ООП используются *эмпирические модели β-фактора, греческих букв и α-фактора* [1, 9—11], хотя существует и целый ряд других, например, биномиальная модель [4].

Самой простой является *модель β-фактора*, в которой значение параметра β равно отношению вероятности ООП всей группы ($O_{1-n}^{ООП}$) к суммарной вероятности отказа одного элемента этой группы (Q_i^{tot})

$$\beta = \frac{O_{1-n}^{ООП}}{Q_i^{tot}} \quad (1)$$

При этом вероятность отказа элемента по независимой причине определяется по выражению:

$$Q_i^{нез} = (1 - \beta) Q_i^{tot} \quad (2)$$

Основной недостаток модели — излишний консерватизм при оценке глубоко резервированных структур.

| Параметр модели β-фактора [10] | | Параметры модели греческих букв [11] | | Параметры модели α-фактора [11, 12] | | Параметры биномиальной модели [4] | |
|--------------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
| β | 0,03—0,17 | β | (2,11—7,96)E-2 | α ₂ | (1,7—4,37)E-2 | μ | (6,55—12,6)E-4 |
| | | γ | (3,9—603)E-3 | α ₃ | (0,821—480)E-4 | ω | (1,01—2,67)E-3 |
| | | | | | | ρ | 0,251—0,306 |

Модель греческих букв, являющаяся модификацией модели β-фактора, основана на использовании условных вероятностей множественных отказов различной размерности при условии, что отказал один элемент в группе. Следует отметить, что существуют трудности получения оценок параметров, определяющих вероятности множественных отказов большой размерности. Это обстоятельство вызывает значительный разброс оценок этих параметров и является одним из основных недостатков модели греческих букв.

Процедура оценок параметров эмпирической модели ООП несколько упрощается при использовании вероятностей событий множественных отказов в системе вместо вероятностей отказов элементов, что реализовано в модели α-фактора, рекомендованной руководством МАГАТЭ [9] для использования в ВАБ. Одним из достоинств этой модели в отличие от двух предыдущих является независимость ее параметров от стратегии проверок систем безопасности, применяемой на АЭС, являющихся источником исходных статистических данных. В то же время при разработке программы для ВАБ расчетные формулы должны учитывать возможность использования различных стратегий проверок.

Из полуэмпирических моделей наибольшее распространение получила биномиальная модель, которая описывает событие отказа как последствие воздействий, влияющих на отдельные элементы и на всю систему в целом. Предполагается, что существует два вида воздействий: нелетальные и летальные. В случае возникновения нелетального воздействия отказы элементов являются условно независимыми и их число описывается биномиальным распределением. При этом момент любого множественного отказа синхронизирован. При летальных воздействиях все элементы отказывают с условной вероятностью, равной единице.

В таблице приведены справочные данные о диапазоне изменения численных значений параметров различных моделей ООП для группы из трех центробежных насосов с электроприводом, подверженных ООП, и для одновременной стратегии проверок резервированных элементов.

Из сопоставления рис. 2 и 3 следует, что первый способ учета ООП сопряжен с возрастанием размеров графической модели и, соответственно, с возрастанием трудоемкости моделирования. Поэтому на практике используют второй из описанных способов.

Как известно, исключение предпосылок к возникновению ООП уже на стадии проектирования и строительства АЭС сопряжено с большими трудностями, в том числе и материальными. Приходится включать в состав АЭС дополнительные системы, дублирующие друг друга, но основанные на разных физических принципах, например, дополнительно к обычной системе аварийной защиты реактора устанавливают систему быстрого ввода

бора. Если использование такого способа невозможно, то в состав АЭС включается аналогичное оборудование, но выпущенное различными производителями. Отсюда следует, что при проектировании АЭС и выполнении ВАБ важно корректно рассчитать величину вклада ООП в частоту повреждения активной зоны без ее переоценки или недооценки.

Одним из способов решения данной задачи является обеспечение адекватности используемых параметрических моделей ООП. Все широко используемые на практике модели ООП разрабатывались в «докомпьютерную» эпоху. Расчеты выполнялись вручную. Это вынуждало ученых прибегать к различного рода упрощениям, практически неизбежным в то время. К моменту появления ПЭВМ имевшиеся параметрические модели были уже общепризнанными, и их реализовали в программных комплексах, по существу, без какой-либо доработки.

Как показали недавние исследования, выполненные авторами настоящей статьи [13], названное обстоятельство приводит к некорректному расчету величины вклада ООП в ЧПЗ. Так, при использовании широко известной программы Risk Spectrum и модели β-фактора величина вклада ООП в ЧПЗ зависит от способа соединения (в смысле надежности) элементов в группе ООП. При последовательном соединении элементов учет ООП приводит к повышению (!) надежности системы, а при параллельном — к уменьшению.

Этот факт объясняется тем, что при разработке модели β-фактора было принято одно, чисто вероятностное, допущение:

$$Q_i^{tot} = Q_i^{нез} + Q_i^{ООП}, \quad (3)$$

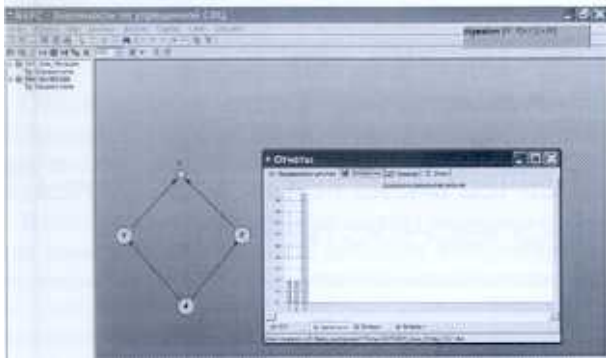
где $Q_i^{нез}$ — вероятность отказа элемента по независимым («собственным») причинам; $Q_i^{ООП}$ — вероятность отказа элемента по общей (общим) с другими элементами причине; Q_i^{tot} — суммарная вероятность отказа элемента.

На «инженерном» языке это допущение формулируется так — вероятность отказа элемента по независимым и общим причинам равна сумме вероятностей этих отказов.

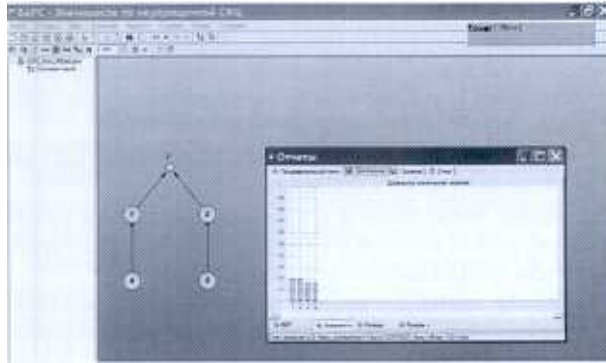
Принятие данного допущения правомочно только при одном из двух условий:

если события, входящие в формулу (3), несовместны; если элементы системы имеют очень высокую надежность.

Согласно [14] несколько событий являются несовместными, если появление любого из них исключает появление каждого из остальных. Очевидно, что в нашем случае это условие неприменимо. Следовательно, использовать выражения (1)—(3) можно только при условии высокой надежности элементов.



а)



б)

Рис. 4. Диаграммы значимостей элементов системы при построении графа:
а — с использованием традиционной модели β -фактора; *б* — с использованием точной модели

В тех же случаях, когда надежность элементов относительно невысока, следует использовать точные выражения:

$$Q_i^{tot} = Q_i^{нез} + Q_i^{ООП} \quad (4)$$

$$Q_i^{tot} = \frac{Q_i^{нез}}{1 - \beta(1 - Q_i^{нез})}, \quad (5)$$

$$Q_i^{ООП} = \frac{Q_i^{tot} - Q_i^{нез}}{1 - Q_i^{нез}} \quad (6)$$

Часто приходится встречаться с возражениями против использования формул (4)–(6). Основной довод состоит в том, что оборудование АЭС является высоконадежным, и ошибкой вычислений по формулам (1)–(3) можно пренебречь. На наш взгляд, этот подход уязвим, так как может приводить к заметному завышению относительного вклада ООП в значение ЧПЗ для некоторых структур.

На рис. 4, *а* приведены диаграммы относительных вкладов независимых отказов и ООП, рассчитанные с помощью выражений (1)–(3), т. е. при использовании традиционной модели β -фактора четвертый столбец иллюстрирует вклад ООП в вероятность отказа элементарной системы, состоящей из двух элементов.

На рис. 4, *б* приведены аналогичные диаграммы, полученные с помощью выражений (4)–(6), т. е. с исполь-

зованием точной модели. Здесь четвертый и пятый столбцы соответствуют вкладу ООП в вероятность отказа этой же системы.

На диаграммах хорошо видно, как различаются величины вкладов ООП при использовании приближенного и точного способов расчета и как завышен вклад ООП в отказ системы в первом случае.

В заключение отметим два обстоятельства. Во-первых, все сказанное относится и к другим параметрическим моделям ООП, т. е. они также требуют корректировки. Во-вторых, мощность современных ПЭВМ позволяет отказаться от тех допущений, которые использовались при ручных расчетах, практически без ущерба для времени моделирования и в то же время обеспечивает большую точность расчетов.

В настоящее время авторами статьи разрабатывается программный комплекс «БАРС», предназначенный для использования в ходе ВАБ АЭС. Расчет вероятностей ООП и их вкладов в ЧПЗ в данном комплексе осуществляется на основе описанных новых подходов и моделей.

Список литературы

1. Procedure for Analysis of Common-Cause Failures in Probabilistic Safety Analysis. NUREG/CR-5801, US NRC, США, 1993. — 38 с.
2. РБ-024–02. Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницирующих событий (при работе блока в режиме выработки электроэнергии во внешнюю сеть). — М.: Госатомнадзор Российской Федерации, 2002. — 24 с.
3. Determining the quality of probabilistic safety assessment (PSA) for applications in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1511, МАГАТЭ, 2006. — 172 с.
4. Токмачев Г. В. Учет зависимых отказов оборудования в вероятностных анализах безопасности АЭС // Атомная техника за рубежом. — 1990. — № 3. — С. 10–16.
5. Токмачев Г. В., Подколзина Л. В., Лобанок О. И. Оценка надежности информационно-вычислительной системы с функцией представления параметров безопасности Балаковской АЭС // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2006. — № 4. — С. 52–63.
6. Marshall F. M., Rasmuson D. M., Mosleh A. Common Cause Failure Susceptibilities at Nuclear Power Plants // Сб. тр. междунар. конф. PSAM4, 13–18 сент. 1998 г. — Нью-Йорк, США, 1998. — Т. 1. — С. 213–218.
7. Tirira J., Werner W. Lessons Learnt from Data Collected in the ICDE Project // Сб. тр. междунар. конф. PSAM7-ESREL'04, 14–18 июня 2004 г. — Берлин. — Т. 1. — С. 82–87.
8. Аварии и инциденты на атомных электростанциях. Учебное пособие / Под общ. ред. С. П. Соловьева. — Обнинск: ИАТЭ, 1992. — 290 с.
9. Procedures for conducting common cause failure analysis in probabilistic safety assessment, IAEA-TECDOC-648, МАГАТЭ. — 1992. — 35 с.
10. Procedures for Treating Common-Cause Failures in Safety and Reliability Studies. NUREG/CR-4780, US NRC, США, 1988. — 186 с.
11. Common-Cause Failure Parameter Estimations. NUREG/CR-5496, US NRC, США, 1998. — 369 с.
12. Tokmachev G. Issues Related to Development of VVER Specific Data Base on CCFs // Сб. тр. междунар. конф. PSAM4, 13–18 сент. 1998 г. — Нью-Йорк, США. — 1998. — Т. 1. — С. 207–212.
13. Отчет о НИР. Разработка предложений по использованию модели Бета-фактора при моделировании отказов по общей причине. — Санкт-Петербург: ФГУП «СПбАЭП», 2006. — 43 с.
14. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. — М.: Высшая школа, 2000. — 480 с.