

Методичні засади побудови дерев подій для імовірнісного аналізу безпеки

Методические основы построения деревьев событий для вероятностного анализа безопасности

Methodological foundations for constructing event trees for probabilistic safety analysis

Науковий керівник - доц. каф. Атомних електричних станцій, доктор техн. наук
Комаров Ю.О., Комаров Ю.А., Komarov Yu.O.

Студент групи ТЯ-1506 - Чепіженко А.О., Чепиженко А.А., Chepizhenko A.O.

Анотація: У статті продемонстровані методи побудови дерев подій (ДП), що використовуються в ВАБ енергоблоків АЕС України. Розглянуто процес побудови ДП на прикладі середньої течії першого контуру. Проаналізовано підхід побудови ДП, запропоновано застосування тренажерів для побудови та уточнення структури ДП.

Ключові слова: безпека АЕС, дерево подій, функції безпеки, аварійні послідовності, критерій успіху.

Аннотация: В статье продемонстрированы используемые в ВАБ энергоблоков АЭС Украины методы построения деревьев событий (ДС). Рассмотрен процесс построения ДС на примере средней течи первого контура. Проанализирован подход построения ДС, предложено применение тренажеров для построения и уточнения структуры ДС.

Ключевые слова: безопасность АЭС, дерево событий, функции безопасности, аварийные последовательности, критерий успеха.

Annotation: The article demonstrates the methods of constructing event trees (ET) used in PSA of Ukrainian NPP power units. The process of constructing a ET is considered on the example of the average leak of the primary circuit. The approach of constructing the ET is analyzed, the use of simulators for the construction and refinement of the ET structure is proposed.

Keywords: NPP safety, event tree, safety functions, emergency sequences, success criterion.

Введення

Імовірнісний аналіз безпеки (ІАБ) атомних електричних станцій є одним з основних інструментів (поряд з детерміністським аналізом) оцінки безпеки атомних електростанцій (АЕС). Використовуючи накопичені в Україні і інших країнах статистичні дані по дефектах устаткування і порушень в роботі АЕС, ІАБ дозволяє на підставі імовірнісних розрахунків оцінити рівень безпеки атомних станцій, що знаходяться в експлуатації, а також споруджуваних.

Актуальність застосування ІАБ для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) АЕС визначається можливостями ІАБ прогнозувати і демонструвати поведінку енергоблоку АЕС і його систем в аварійних умовах [1]. Отримані матеріали у вигляді кількісних оцінок використовуються для аналізу і виявлення слабких місць в конструкції і експлуатації енергоблоку, які знижують рівень безпеки АЕС. Надалі на підставі цього аналізу будуть виконані коригувальні заходи, ефективність яких також може бути визначена за допомогою ІАБ. Наприклад, недоліки в інструкції з ліквідації аварій (ІЛА) можуть вести до помилкових дій персоналу в ході розвитку аварійної ситуації. Після внесення необхідних змін до ІЛА ймовірність помилок персоналу зменшиться, що буде відображено в кількісній оцінці відповідних аварійних послідовностей, і в кінцевому рахунку вплине на рівень безпеки АЕС [2, 3].

Одним з основних моментів реалізації ІАБ є ймовірнісне моделювання розвитку аварійних послідовностей (АП), що виникають в результаті настання тієї чи іншої вихідної події аварії (ІСА).

Для ВАБ АЕС України моделювання АП реалізовано методом малих дерев подій (ДП) і великих дерев відмов (ДВ). При такому підході залежності між захисними і забезпечуючими системами в явному вигляді моделюються тільки на рівні ДВ. На рівні ДП в явному вигляді моделюються тільки феноменологічні, або функціональні залежності. Нижче представлений аналіз процедури і приклад реалізації зазначеного методу.

1. Процедура побудови дерева подій

Дерева подій (EventTree) є графічними моделями, які впорядковують і відображають події протікання аварії (виконання функцій безпеки (ФБ) або роботу систем) згідно з вимогами по ослабленню вихідних подій. Вони показують, як зреагують системи АЕС на дане ВПА, чи будуть виконані при цьому ФБ, умови безпечної експлуатації і що станеться в результаті, як відобразиться вихідна подія на ядерно небезпечному об'єкті [4, 5].

Кожне дерево подій включає діаграму станів (граф) і таблицю, поставлені в однозначну відповідність один до одного. Діаграма станів (граф) являє собою систему горизонтальних і вертикальних ліній, що розвивається зліва направо вздовж послідовно складених елементів таблиці. У лівій крайній комірці таблиці вказується ВПА або його умовне позначення, в наступних - проміжні події або їх умовні позначення. Розгалуження горизонтальної лінії відбувається в точках роботи будь-якої ФБ. У разі успіху ФБ отримуємо верхню гілку розвилки, в разі відмови - нижню. У правій частині діаграми у відповідних гілок вказуються можливі кінцеві стани (endstate).

Розробка ДП починається складанням переліку ФБ, виконання яких забезпечує проектне протікання даної аварії (для проектних ВПА) або зменшення її наслідків (для запроектованих ВПА). У підсумку повинен бути отриманий перелік необхідних ФБ, визначені набори виконують їх систем безпеки (СБ) і функцій персоналу, визначені критерії їх успішного виконання і виявлені функціональні залежності між ними. Для складання такого переліку можуть бути використані ті ж джерела інформації, що і для етапу класифікації ВПА. Крім того, можуть бути проведені додаткові розрахункові аналізи процесів для уточнення критеріїв виконання ФБ в разі непроектного протікання аварії.

У загальному випадку повинні розглядатися ФБ, важливі з точки зору пошкодження активної зони, а саме [6]:

- управління реактивністю (ФБ-1);
- підтримку запасу теплоносія 1 контуру (ФБ-2);
- розхолодження по 2 контуру (ФБ-3);
- забезпечення тривалого відводу залишкових тепловиділень по 1 контуру (ФБ-4);
- захист цілісності контайнменту (ФБ-5);
- видалення радіоактивності з атмосфери контайнменту (ФБ-6);
- підтримку цілісності кордонів I контуру - управління тиском (ФБ-7).

Залежно від розв'язуваної задачі (ІСА) перераховані ФБ зазвичай уточнюються (діляться) на менш або більш загальні. Поєднання і послідовність їх також залежать від завдання.

Побудова ДП являє собою ітеративний процес, який вимагає взаємодії з наступними елементами ІАБ:

- теплогідравлічні розрахунки і аналіз критеріїв успіху;

- визначення та групування вихідних подій;
- аналіз надійності персоналу.

Побудову ДП починають з формування таблиці дерева. При цьому важливим фактором є порядок і послідовність розміщення ФБ в таблиці проміжних подій. Значною мірою він визначає конфігурацію дерева і може вплинути на зручність і трудомісткість його побудови і подальшого кількісного аналізу. При виборі порядку розміщення ФБ слід керуватися принципами:

1) причинно-наслідковим - відповідно до якого функції без-небезпеки, виконання яких залежить від виконання інших функцій, розміщуються в правих колонках таблиці щодо останніх;

2) тимчасовим - відповідно до якого незалежні функції безпеки розташовуються в порядку черговості їх виконання в часі.

Для розробки діаграми ДС необхідно виконати наступні процедури:

- 1) сформуванню таблицю ФБ, визначивши раціональну послідовність їх розміщення із застосуванням причинно-наслідкового і тимчасового принципів;
- 2) провести траєкторію проектного протікання аварії, яка відображає виконання всіх необхідних ФБ; нанести на цю траєкторію особливі точки, зокрема дії персоналу, якщо такі потрібні;
- 3) починаючи з крайньої зліва ФБ послідовно побудувати траєкторії, пов'язані з невиконанням кожної функції до потрапляння до відповідних кінцеві стану; при такій побудові потрібен аналіз можливих залежностей між функціями з позиції їх впливу на кінцеві стану;
- 4) сформуванню таблицю кінцевих станів, виконавши їх класифікацію за видами пошкодження АЕС; в загальному випадку розглядаються такі види кінцевих станів:
 - кінцевий стан з перевищенням проектних викидів L, що виникають внаслідок невиконання тільки однієї або декількох локалізуючих ФБ;
 - кінцевий стан з важким пошкодженням активної зони R, воз-виникаючі в результаті невиконання тільки однієї або декількох захисних ФБ. На попередньому етапі аналізу безпеки за відсутності розрахунків процесів в реакторної установки доцільно консервативно прийняти, що невиконання будь-якої з захисних ФБ викличе тяжке ушкодження (плавлення) активної зони реактора;
 - кінцевий стан з перевищенням максимального проектного аварійного викиду радіоактивних продуктів в навколишнє середовище RL, що виникають в результаті спільного невиконання захисних R і локалізують L функцій безпеки.

У розрахункових кодах, що застосовуються для чисельної оцінки розроблених ДП, розглядаються кінцеві стану з пошкодженням активної зони - CD і безпечні кінцеві стану - ОК.

Сучасні розрахункові коди (такі як SAPHIRE, RiskSpectrum) визначають ймовірності АП, позначених як CD, тому, застосовуючи консервативний підхід, кінцеві стану R, L і RL, рекомендовані методикою побудови ДП, слід позначати як CD, або як спеціальний трансфер (зв'язок) з новим ДП, розробленим для ІАБ другого рівня (враховує кінцеві стани R, L і RL).

2. Побудова ДС на прикладі середньої течії першого контуру.

2.1 Коротка характеристика ВПА і ознаки аварії [7]

В даному розділі розглядаються події, що призводять до неізолюваним течам головного циркуляційного контуру (ГЦК) в межах гермозони еквівалентним діаметром в діапазоні від 50 мм до 70 мм включно для енергоблоку №1 ВП «Южно-Українська АЕС» з реакторною установкою ВВЕР-1000 (В- 302). Аварія характеризується швидким спадом тиску 1 контуру до уставок АЗ-1 і технологічних захистів 1 контуру (ТЗ-1).

Основні ознаки аварії [8]:

- Різке зниження тиску в активній зоні: формування АЗ-1 і ТЗ-1 по зниженню і швидкості зниження тиску відбувається протягом перших 16÷30 сек., В залежності від конкретного розміру течії;
- Різке (протягом 1,5÷2,5 хв) спорожнення компенсатора тиску (КД);
- Різке і значне зростання тиску, температури, активності і вологості під оболонкою.

2.2 Функції і системи, що впливають на стан активної зони [7]

Основними функціями безпеки, необхідними для даного класу аварій, є ФБ-1, ФБ-2, ФБ-3, ФБ-4.

ФБ-1 виконується успішним спрацьовуванням АЗ в початковий момент аварії і введенням бору системою аварійного охолодження активної зони (САОЗ) високого тиску (ВТ) - ТТ10,20,30D01 або гідроємностей (ГЕ) САОЗ на наступному етапі.

ФБ-2 потрібно на початковій стадії аварії і виконується автоматично роботою на контур по крайній мере 1 з 3-х каналів САОЗ ВТ (ТТ10,20,30D01) в діапазоні високих тисків і 2 з 4 ГЕ САОЗ в діапазоні середніх тисків.

ФБ-3 виконується нормальними (або аварійними, в разі відмови нормальних систем) системами 2-го контуру в режимі розхолодження.

ФБ-4 виконується роботою каналів САОЗ низького тиску (НТ) (ТН-10,20,30D01) в 2-х режимах: в режимі розхолодження по лінії планового розхолодження і в режимі компенсації течії.

Дерево подій для даного ВПА наведено на рисунку 1. Перелік необхідних, (або які можуть знадобитися), ФБ і систем, які виконують (або можуть виконати) зазначені функції представлений нижче в Табл. 2.1.

Функція "Управління тиском другого контуру" (ФБ-7) в розглянутому ВПА є допоміжною функцією, визначальною лише конкретну конфігурацію систем 2-го контуру при роботі їх в режимі розхолодження.

Таблиця 2.1

Перелік необхідних ФБ і систем, важливих для безпеки

№	Назва системи	Функції безпеки	Критерії успішного виконання ФБ	Спосіб управління	Час роботи системи
1	АЗ-І	Аварійна зупинка реактора	Формування сигналу АЗ 1 підсистемою аварійного захисту і введення стрижні в СУЗ в активну зону	Автоматично при досягненні уставки АЗ-1 або оператор	Швидкодіюча система
2	САОЗ ВТ (підсистема ТЈ10/30)	Введення бору	Подача розчину бору 1 з 3-х каналів САОЗ ВТ (підсистема ТЈ10 / 30)	Автоматично	Близько 0,5 години при роботі з бака ТЈ10В01
3	САОЗ ВТ (підсистема ТЈ10/30)	Підтримка запасу теплоносія 1 в діапазоні високіх і середніх тисків	Подача розчину бору 1 з 3-х каналів САОЗ ВД (підсистема ТЈ10 / 30)	Автоматично	До моменту зниження Р1к нижче 40 кгс / см ²
4	ГЕ САОЗ	Підтримка запасу теплоносія 1 в діапазоні середніх і низьких тисків	Робота 1/2 + 1/2 ГЕ САОЗ	Автоматично в діапазоні тисків 1 контуру нижче 60 кгс / см ²	До моменту зниження Р1к нижче 18 кгс / см ²
5	БРУ-К	Відведення тепла по 2 контуру в режимі розходження	Робота 1-го БРУ-К в режимі розходження	За участю оператора	Протягом всього часу роботи ПГ
6	БРУ-А	Відведення тепла по 2 контуру в режимі розходження	Робота 1-го БРУ-А в режимі розходження	За участю оператора	Протягом всього часу роботи ПГ
7	Система допоміжної живильної води	Відведення тепла по 2 контуру (в частині підживлення ПГ)	Робота 1 каналу системи	Автоматично при зниженні рівня в 1-му ПГ	Протягом всього часу роботи ПГ

№	Назва системи	Функції безпеки	Критерії успішного виконання ФБ	Спосіб управління	Час роботи системи
8	Система аварійної живильної води	Відведення тепла по 2 контуру (в частині підживлення ПГ)	Робота 1 каналу системи	За участю оператора	Протягом всього часу роботи ПГ
9	Перший канал САОЗ НТ (підсистема ТН) в режимі підживлення Другий канал САОЗ НТ по лінії планового розхолодження	Довготривале відведення тепла по 1-му контуру і забезпечення запасу теплоносія в діапазоні низьких тисків	1/3 каналів САОЗ НД в режимі роботи і лінійного розхолодження 1/3 каналів САОЗ НД в режимі роботи з бака і прямка ГО	За участю оператора Автоматично	Тривалий час (До 24 годин)

2.3 Опис АП та характеристика кінцевих станів

АП №1 - є проектний хід розвитку аварії з успішним виконання всіх необхідних ФБ; Кінцевий стан характеризується досягненням РУ безпечного стабільного стану "холодної зупинки".

АП №2 - невиконання будь-якої з функцій підживлення або довготривалого відведення тепла по 1 контуру системою САОЗ НД призводить до зростання тиску і пошкодження активної зони під високим тиском.

АП №3 - Невиконання (або несвоєчасне виконання) функції розхолодження РУ по 2 контуру призводить до "зависання" тиску 1 контуру вище напору насосів САОЗ НТ і відповідно неможливості виконання функцій підживлення або довготривалого відведення тепла по 1 контуру. Кінцевий стан характеризується ушкодженням зони під високим тиском.

АП №4 - відмова ГЕ веде до оголення зони незважаючи на проектну роботу всіх інших систем. САОЗ ВД (ТJ10 / 30D01) не може забезпечити виконання функції довготривалої підживлення 1 контуру. Кінцевий стан характеризується ушкодженням зони під високим тиском.

АП №5 - відмова САОЗ ВТ (ТJ10 / 30D01) веде до пошкодження зони при високому тиску через втрату функції забезпечення запасу теплоносія в діапазоні високих тисків 1 контуру. АП №6 - перехідний процес без спрацьовування АЗ-1 (АТWS).

ВПА (S1) Середня теча 1 контур	Управління реактивністю	Забезпечення запасу теплоносія і управління реактивністю в діапазоні високих тисків		Розхолодження по 2 контур	Довготривале відведення тепла по 1к. і підживлення активної зони в діапазоні низьких тисків	№	Кінцевий стан
	A3-1	TJ10(20,30)D 01 від баків TJ10B01 і TH10(20,30) B01	ГЕ САОЗ	(1/2 ВПЕН +1/4 БРУ-К) или (1/3 АПЕН + 1/4 БРУ-А)	САОЗ НТ по лінії планового розхолодження і 2-й канал в режимі вприскування		
	Автомат ично	1/3 каналів	1/2+ 1/2	Оператор	2/3 оператор		
S1	A1	B3D2	D3	E1E3	FD4		

	1	OK
	2	CD-HRN
	3	CD-HR
	4	CD-HR
	5	CD-HR
	6	ATWS

Рисунок 1 –Дерево подій для ВПА S1 "Середні течі 1-го контуру (Ду 50-70 мм)
енергоблоку №1 ОпПівденно-Українська АЕС реакторної установки з РУ ВВЕР-1000 (В-
302) **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

3. Аналіз підходу побудови ДС

При побудові ДС, яке засноване на бінарному логічному відображенні АП, представляється важливим встановити відповідність між фізичним станом активної зони реактора (тобто, пошкоджена або може призвести до пошкодження) і дискретним станом систем / елементів (відмовили або не відмовили, функціонують або не функціонують) , включаючи тимчасові залежності (раннє або пізніше вимоги на роботу системи). Така відповідність моделюється на підставі критеріїв успіху, які однозначно визначають вимоги до характеристик системи і її конфігурацій, що є необхідними і достатніми умовами для успішного виконання необхідних ФБ в контексті окремого сценарію протікання аварії [9]. Отже, повинні бути встановлені специфічні критерії успіху для кожної системи, яка виконує ФБ або забезпечуючі функції.

Визначення первинних критеріїв успіху або критеріїв успіху СБ є важливим завданням при виконанні ІАБ, оскільки такі критерії успіху задають «верхні» події ДП або ДВ.

Визначення критеріїв успіху може бути засноване як на результатах теплогідрравлічного аналізу, так і інших задокументованих інженерних аналізів (таких як аналіз проектних аварій) або експертної оцінки. Крім визначення критеріїв успіху, теплогідрравлічний аналіз (розрахунок) використовується для визначення параметрів, необхідних для моделювання АП та надійності персоналу.

Теплогідравлічні розрахунки виконуються з використанням специфічних розрахункових кодів, таких як RELAP5, MELCOR, ATHLET. Робота в таких кодах вимагає спеціального навчання, інтерфейс не є призначений для користувачо-орієнтованим (вихідні дані задаються через спеціальний файл вручну по введеному формату), результати розрахунку отримують у вигляді таблиць і графіків. Зазначені обмеження ускладнюють оперативно змінювати дії персоналу в аналізованій АП, оперативно відстежувати зміни станів елементів і систем для валідації розробленого ДС.

В даний час в практику тренувань персоналу АЕС включаються тренування на повномасштабному тренажері (ПМТ) відповідного енергоблоку. ПМТ і інші тренажери систем АЕС значно допомагають в освоєнні різних експлуатаційних процедур, в тому числі аварійних, а значить рідкісних і які неможливо відпрацювати на реальному обладнанні. У дослідницьку практику супроводу експлуатації АЕС все частіше включаються так звані аналітичні тренажери (АТ).

Вимоги до програмного забезпечення та математичної моделі тренажерів зазвичай включають вимоги про те, що тренажер повинен відповідати прототипу (енергоблоку або робочого місця, пульта / щиту управління і т.д.) і забезпечувати моделювання всіх режимів нормальної експлуатації, режимів порушення умов нормальної експлуатації, аварійних режимів, оперативне управління якими здійснюється з даного прототипу [10].

Реакція тренажера на поставлені інструктором вихідні події, автоматичні дії систем управління, на правильні чи неправильні дії оператора, прийняття або неприйняття заходів повинна бути аналогічна реакції прототипу і не повинна суперечити фізичним законам (збереження маси, імпульсу, енергії). При цьому тренажер зазвичай дозволяє моделювати заданий сценарій з урахуванням дій систем, автоматики і дій персоналу.

У зв'язку з вищевикладеним пропонується задіяти тренажери (в основному ПМТ і АТ) для процедури аналізу АП та уточнення ймовірності помилок персоналу в даній ВПА. Даному підходу буде присвячена наступна стаття.

Висновки

1. В даний час ВАБ в основному розглядається як засіб для загальної оцінки проекту АЕС з точки зору безпеки, оцінки збалансованості проекту по відношенню до ІСА, надійності обладнання і персоналу (їх взаємодії). ВАБ є прекрасним засобом для визначення так званих слабких місць проекту і служить для оцінки впливу планованих змін проекту на поточний рівень безпеки.

2. Основним інструментом моделювання АП є метод малих ДС і великих ДО, який добре зарекомендував себе у вітчизняній практиці виконання ВАБ. Основою моделювання АП з побудовою ДС є результати теплогідравлічних розрахунків, виконаних з використанням яких кодів, як RELAP5, MELCOR, ATHLET.

3. Для полегшення процесу моделювання АП та побудови, уточнення ДС, а також уточнення значень ймовірності помилки персоналу, запропоновано використовувати повномасштабні або аналітичні тренажери відповідного енергоблоку АЕС.

Перелік посилань

1. IAEA SafetySeries 50-P-4, ProceduresforConductingProbabilisticSafetyAssessmentsofNuclearPowerPlants (Level 1)"
2. Розробка і застосування ймовірнісної оцінки безпеки рівня 1 для атомних електростанцій. Спеціальне керівництво з безпеки № SSG-3. Норми МАГАТЕ з безпеки.

3. Розробка та застосування ймовірнісної оцінки безпеки рівня 2 для атомних електростанцій. Спеціальне керівництво з безпеки № SSG-4. Норми МАГАТЕ з безпеки.
4. Імовірнісний аналіз безпеки атомних станцій (ВАБ): Навчальний посібник / В. В. Бігун, О. В. Горбунов, І. М. Каденко та ін. - К., 2000. - 568 с.
5. Острейковскій В.А., жбурляє Ю.В. Безпека атомних станцій. Імовірнісний аналіз. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 352 с.
6. Проект оцінки безпеки енергоблоку №1 ПУАЕС. Аналіз аварійних послідовностей (Моделювання дерев подій). Керівництво по проекту SUPG-4.
7. Південно-Українська АЕС. Енергоблок №1. Звіт з періодичної переоцінки безпеки. Фактор безпеки №6. Імовірнісний аналіз безпеки. Книга 2. ВАБ 1 рівня на номінальному рівні потужності. Том 5. Моделювання аварійних послідовностей. ЕР03-2009.722 / 2.ОД.2.
8. Технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку №1 ЮУ АЕС з реактором ВВЕР-1000 (В-302).
9. Південно-Українська АЕС. Енергоблок №1. Звіт з періодичної переоцінки безпеки. Фактор безпеки №6. Імовірнісний аналіз безпеки. Книга 2. ВАБ 1 рівня на номінальному рівні потужності. Том 4. Аналіз критеріїв успіху для ВАБ 1-го рівня. ЕР03-2009.722 / 2.ОД.2.
- 10.СТП 0.18.023-2003 Вимоги до технічних засобів навчання персоналу АЕС. Система підготовки персоналу НАЕК «Енергоатом».