

Загальні принципи імовірнісного розрахунку. Розрахунок ЧПАЗ для аварії типу – мала некомпенсована течя.

Общие принципы вероятностного расчета. Расчет ЧПАЗ для аварии типа - малая некомпенсируемая течь.

General principles of probabilistic calculation. The calculation of the CDF for a type of accident - small uncompensated leak.

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., Чепіженко А.А., Chepizhenko A.O.

Анотація: У статті продемонстровані загальні принципи імовірнісного розрахунку, що використовуються в ІАБ енергоблоків АЕС України. Розглянуто програмний інструмент для ІАБ під назвою SAPHIRE. Розраховані частоти виникнення кінцевих станів та частоти пошкодження активної зони під час аварії типу – мала некомпенсуєма тіч, для двох моделей з безпечним кінцевим станом :

- базова модель – “гаряча зупинка”;
- нова модель – “холодна зупинка”.

Ключові слова: дерево подій, дерево відмов, аварійні послідовності, мінімальні перетини, кінцевий стан, частота пошкодження активної зони.

Аннотация: В статье продемонстрированы общие принципы вероятностного расчета, используемых в ВАБ энергоблоков АЭС Украины. Рассмотрены программный инструмент для ВАБ под названием SAPHIRE. Рассчитаны частоты конечных состояний и частоты повреждения активной зоны при аварии типа - малая некомпенсируемая течь, для двух моделей с безопасным конечным состоянием:

- базовая модель - "горячий останов";
- новая модель - "холодный останов".

Ключевые слова: дерево событий, дерево отказов, аварийные последовательности, минимальные сечения, конечное состояние, частота повреждения активной зоны.

Abstract: The article demonstrates the general principles of probabilistic calculation used in the PSA of Ukrainian NPP power units. A software tool for PSA called SAPHIRE is considered. Were calculated frequencies of the final states and the frequencies of damage to the core in an accident of the type - small uncompensated leak, for two models with a safe final state:

- basic model - "hot stop";
- new model - "cold stop".

Key words: event tree, failure tree, alarm sequences, minimum sections, final state, core damage frequency.

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 ене-

ргоблоку АЕС і його систем в аварійних умовах [1]. Отримані матеріали у вигляді кількісних оцінок, що включають в себе частоти виникнення кінцевих станів та частоти пошкодження активної зони для розглянутої ВПА(вихідної події аварії), використовуються для аналізу і виявлення слабких місць в конструкції і експлуатації енергоблоку, які знижують рівень безпеки АЕС.

1 Основи розрахунку ймовірності кінцевих станів

Для визначення логічних співвідношень і розрахунку ймовірностей реалізації КС слід виконати наступні процедури:

1. Визначити з урахуванням результатів попереднього етапу порядок розміщення виділених частин в таблиці ДП. При цьому рекомендується використання причинно-наслідкового принципу, відповідно до якого системно-функціональні блоки, робота яких залежить від інших блоків або невиконання функцій яких може привести до менш тяжких наслідків за умови успішної роботи інших структурних одиниць, розміщуються в правих колонках таблиці ДП. Наприклад, системи або їх частини, які виконують захисні функції безпеки, які впливають на стан активної зони, розташовуються в лівих, а системи або їх частини, які виконують локалізуючі функції безпеки, - в правих колонках ДП. Як правило, першими в лівих колонках розміщуються забезпечуючі системи безпеки (рисунок 1).
2. Провести траєкторію проектного функціонування систем. Нанести на неї особливі точки, включаючи дії персоналу події, пов'язані з функціонуванням надлишкових систем.
3. Починаючи з крайньою зліва системи (частини системи), послідовно побудувати траєкторії, пов'язані з невиконанням функції кожної системи до потрапляння до відповідних кінцевих станів.

З метою забезпечення розробки детальних моделей для кількісної оцінки ймовірнісних показників безпеки АЕС при розглянутому ВПА виконується аналіз отриманої множини КС з порушенням безпеки АЕС, визначаються системні мінімальні перетини і формулюються задачі для подальших етапів ІАБ. Це необхідно тільки для виконання якісного аналізу АП.

Системні мінімальні перетини - це АП, для яких даний вид КС реалізується при меншому в порівнянні з іншими послідовностями кількості невиконаних функцій безпеки.

Проводиться якісний аналіз всіх логічних співвідношень з отриманої множини системних мінімальних перетинів з метою відшукування можливих залежностей між цими системами (міжсистемні залежності). В результаті виконання цього етапу з урахуванням аналізу міжсистемних залежностей формулюються задачі для розробки дерев відмов для проведення кількісної оцінки ймовірнісних показників безпеки.

Важливість КС визначається, перш за все, величиною його ймовірності. Більш ймовірні КС вважаються і більш небезпечними, і важливими.

Розрахунок ймовірності КС по виду ДП проводиться по його логічному (булеву) виразу відповідно до рисунку 1. Наприклад, ймовірність КС № 2, слідуючого внаслідок відмови системи "ATWS-B1B2B3" при успішній роботі попередніх систем "ATWS-G2" і "ATWS-E1E2" буде дорівнювати: $P_2 = P_{ATWS} \cdot P_{ATWS-B1B2B3}$, тобто, простому перемножуванню ймовірностей відмови систем, які увійшли в логічне вираження.

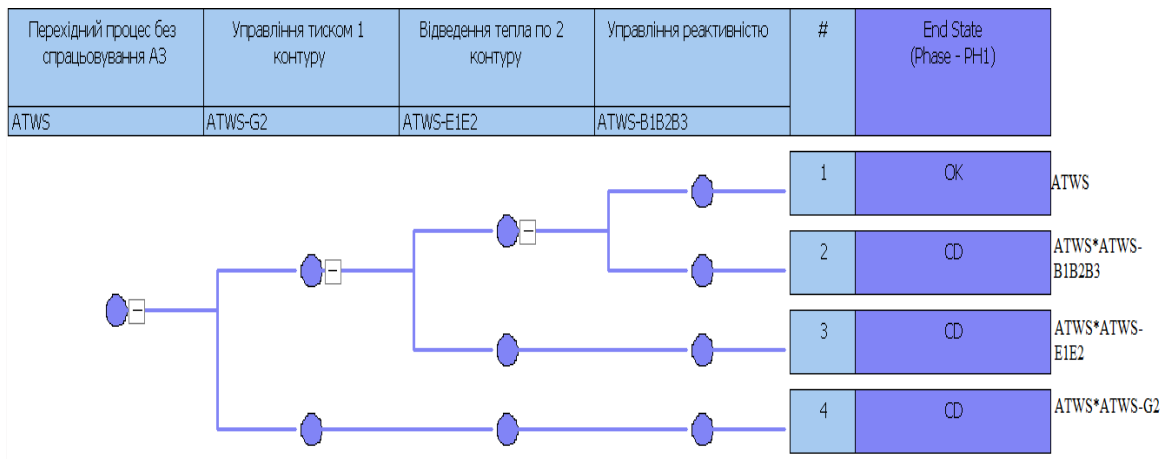


Рисунок 1 – ДП «Перехідний процес без спрацьовування АЗ реактора» Вид у програмі SAPHIRE 8.

2 SAPHIRE, як програмний інструмент для ІАБ. Основи розрахунку дерев відмов

2.1 Коротка характеристика програмного забезпечення SAPHIRE

SAPHIRE - це інтегрований програмний інструмент для ІАБ, який дає користувачеві можливість створювати і аналізувати ДВ і ДП. Остання версія SAPHIRE v.8.1.7.

SAPHIRE 8 має наступні основні складові:

- графічний і текстовий редактор для побудови ДВ і ДП;
- генерація мінімальних перетинів і їх кількісна оцінка;
- модулі аналізу значимості і невизначеностей;
- правила відновлення і аналіз кінцевих станів;
- можливості для аналізу відмови із загальних причин.

Для проведення даного дослідження обрано програмний засіб ІАБ SAPHIRE, який має найбільше поширення в Україні, є верифікованим та валідованим.

Цілями використання програмного забезпечення SAPHIRE в даній роботі є побудова ДП и ДВ і подальший розрахунок ЧПАЗ для базової и нової моделі.

2.2 Основи розрахунку дерев відмов в програмі Saphire 8

Для розрахунку ймовірності КС і в слідстві необхідного нам ЧПАЗ потрібно заздалегідь визначити ймовірність відмови систем, що формують верхні події. Наявність заздалегідь побудованих дерев відмов для даної ВПА в програмі Saphire 8, помітно спрощує це завдання. Необхідні дії для розрахунку ймовірності (частоти) відмови систем формують верхні події наступні:

Провести розрахунок ймовірностей відмови використовуючи заздалегідь побудовані ДВ [2], в програмі Saphire 8, в слідстві чого отримавши ймовірності відмови які і будуть використовуватися в подальшому при розрахунку наших ДП.

Використовуючи розраховані ймовірності відмови приступаємо до побудови спрощеного ДВ в моделі потрібного ДП, здійснюється це додаванням в порожнє ДВ, нової базової події з уже прорахованою раніше ймовірністю відмови, для тієї чи іншої верхньої події.

3 Генерація мінімальних перетинів

Останній етап якісного аналізу надійності систем безпеки полягає в поданні умови невиконання функцій системи у вигляді так званого безлічі мінімальних перетинів.

Мінімальний перетин - логічний добуток K первинних подій, що обумовлює відмову системи (властивість перетину). При цьому добуток ($K-1$) подій з цього набору K подій не повинно призводити до відмови системи (властивість мінімальності).

Іншими словами, мінімальним перетином називається сукупність первинних подій в системі, що володіють двома властивостями [3]:

1. спільна реалізація їх призводить до відмови системи;
2. настання будь-якої комбінації меншого числа подій не призводить до відмови системи.

Набір мінімальних перетинів(рисунок 2) системи однозначно визначений її деревом відмов і може бути отриманий вручну або за допомогою ЕОМ при використанні спеціальних алгоритмів вибору мінімальних перетинів. Суть алгоритмів полягає в отриманні булева виразу для умови відмови системи безпосередньо по дереву відмов і подальшої мінімізації цього виразу на основі правил алгебри логіки.

#	Prob/Freq	Total %	Cut Sets	
	2.582E-7	100	Displaying 8 of 8 Cut Sets.	
- 1	1.252E-7	48.49	S3 : 7	
	6.980E-3		S3-HSD	Small non-compensated LOCA
	3.107E-4		S3-B2D20	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
	5.774E-2		S3-B30	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
- 2	1.205E-7	46.68	S3 : 2	
	6.980E-3		S3-HSD	Small non-compensated LOCA
	1.727E-5		S3-E1E20	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
- 3	6.001E-9	2.32	S3 : 8	
	6.980E-3		S3-HSD	Small non-compensated LOCA
	3.107E-4		S3-B2D20	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
	2.767E-3		S3-E1E30	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
- 4	5.986E-9	2.32	S3 : 6	
	6.980E-3		S3-HSD	Small non-compensated LOCA
	3.107E-4		S3-B2D20	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
	2.760E-3		S3-G10	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
- 5	3.758E-10	0.15	S3 : 4	
	6.980E-3		S3-HSD	Small non-compensated LOCA
	3.107E-4		S3-B2D20	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY
	1.733E-4		S3-D40	BLANK BASIC EVENT FOR NEW ENTRY

Рисунок 2 – Частина мінімальних перетинів для дерева S3-1 згенерованих в програмі Saphire 8.

Мінімальні перетини є ключовими інструментами для кількісного аналізу моделей ІАБ. Однак мінімальні перерізи також надають якісну, упорядковану інформацію, яку доцільно використовувати для виявлення важливих відмов елементів, а також ситуацій, які можуть призводити до небажаних наслідків. Наприклад, група мінімальних перетинів, що складаються з одного елемента системи, описує відмови окремих елементів, результатом яких є відмова всієї системи.

4 Поняття частоти пошкодження активної зони

У загальному випадку під ЧПАЗ розуміється вираз правдоподібності того, що для розглянутого проекту і експлуатації реактора вихідна подія аварії призведе до пошкодження палива в реакторі. У стандартах по ІАБ [4] визначення ЧПАЗ конкретизується: ЧПАЗ - розрахункова (або очікувана) кількість випадків пошкодження активної зони реактора на одиницю часу.

Для загальної оцінки рівня безпеки використовується середньорічна ЧПАЗ, відповідно пропонується використовувати наступне визначення: ЧПАЗ - розрахункова кількість випадків пошкодження активної зони реактора на календарний рік експлуатації енергоблоку.

Таким чином, інтегральна ЧПАЗ повинна бути отримана на підставі наступної формули:

$$\text{ЧПАЗ} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_j} \text{ЧПАЗ}_{i,k}$$

де j - вихідна подія аварії; k - експлуатаційний стан енергоблоку.

При цьому необхідно забезпечити дотримання наступної умови: ЧПАЗ повинні бути унормовані на календарний рік і враховувати тривалість перебування енергоблоку в відповідному експлуатаційному стані.

При виконанні ІАБ АЕС України в імовірнісних розрахункових кодах (REVEAL; IRRAS; SAPHIRE) для оцінки ЧПАЗ застосовують такі розрахункові методи, як метод апроксимації рідкісних подій і метод розрахунку верхніх меж мінімальних перетинів.

У спрощеному вигляді, в термінах розрахункових кодів, апроксимація рідкісних подій може бути визначена наступним чином:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i$$

де C_i - ймовірність i -го мінімального перетину; n - кількість мінімальних перетинів в дереві відмов; P - ймовірність набору мінімальних перетинів для дерева відмов.

У деяких випадках метод апроксимації рідкісних подій може бути непридатний. В даному випадку необхідно використовувати метод розрахунку верхніх границь мінімальних перетинів. У термінах розрахункових кодів рівняння для верхньої межі мінімальних перетинів виглядає так:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - C_i)$$

В даній роботі для розрахунку ЧПАЗ буде використовуватися наступна формула:

$$\lambda_{\text{чпаз}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \prod_{j=1}^M P_{i,j}$$

де N - кількість мінімальних перетинів; M - кількість базових подій, що входять в i -е мінімальний перетин; λ_i - частота ВПА для i -го мінімального перетину; $P_{i,j}$ - ймовірність базової події;

5 Розрахункові оцінки по ДП. Розрахунок ЧПАЗ

Перед тим як приступити до розрахункової оцінки, потрібно уточнити декілька моментів, а саме загальну ймовірність з якою відбувається розрахунок в Saphire 8 і ймовірності (частоти) відмови систем, що формують верхні події:

Загальна ймовірність - $1.00E-15$

Частота виникнення ВПА $6.98E-03$ 1 / рік

В таблиці 5.1 представлені необхідні вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 5.1 Вихідні дані необхідні для розрахунку

Назва верхньої події	Позначення в Saphire	Імовірність відмови
Управління реактивністю	S3-A	$2.99E-06$
Управління реактивністю, забезпечення запасу теплоносія в 1 к.	S3-B2D2	$3.11E-04$
Відведення тепла по другому контуру	S3-E1E2	$1.73E-05$
Відведення тепла по другому контуру	S3-E1E3	$2.77E-03$
Управління реактивністю	S3-B3	$5.77E-02$
Управління тиском 1 контуру	S3-G1	$2.76E-03$
Забезпечення запасу теплоносія в 1 к.	S3-D3	$3.91E-05$
Забезпечення запасу теплоносія в 1 к.	S3-D4	$1.73E-04$
Розхолодження РУ в діапазоні низьких тисків 1 к.	T1-F1	$3.92E-04$
Управління реактивністю	ATWS-B1B2B3	$2.87E-05$
Відведення тепла по 2 контуру	ATWS-E1E2	$2.48E-06$
Управління тиском 1к.	ATWS-G2	$3.10E-04$

5.1 Розрахунок ймовірності (частоти) КС і ЧПАЗ для базової моделі

Наведено розрахунок тих кінцевих станів, які пов'язані з пошкодженням активної зони. У випадку ДП базової моделі, 1 і 3 кінцеві стани є безпечними.

Розрахунок буде проводитися на основі ДП для базової моделі, що побудоване в програмному середовищі Saphire 8 і представлено на рисунку 3.

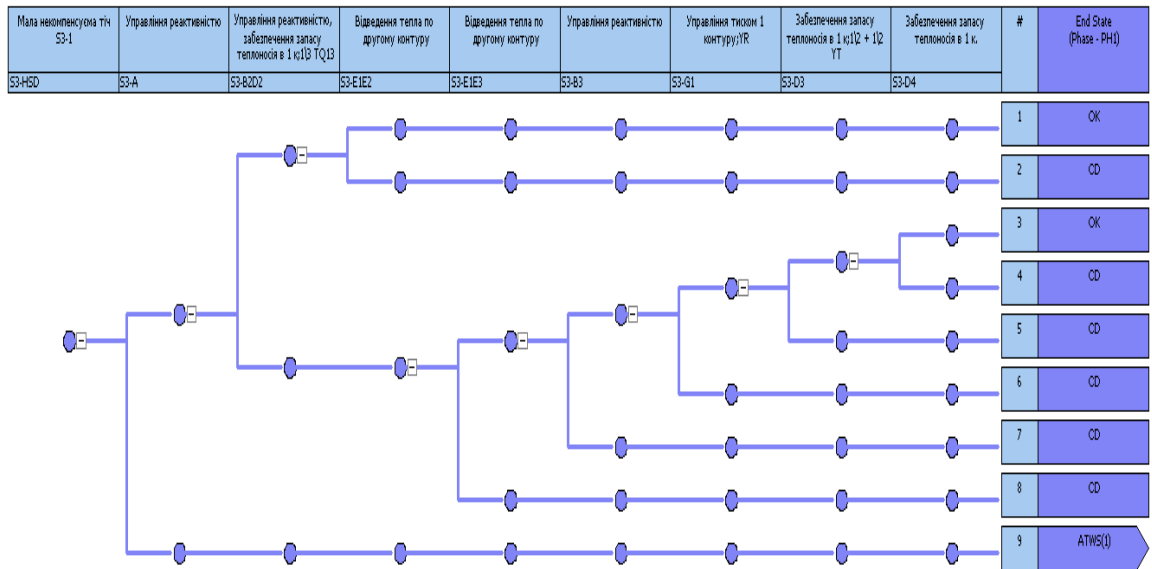


Рисунок 3 – S3-1 ДП «Мала некомпенсуєма тіч 1 контуру в межах ГО». Вид базової моделі в програмі Saphire 8.

2	S3-HSD*S3-E1E2=	1.21E-07
4	S3-HSD*S3-B2D2*S3-D4=	3.76E-10
5	S3-HSD*S3-B2D2*S3-D3=	8.48E-11
6	S3-HSD*S3-B2D2*S3-G1=	5.99E-09
7	S3-HSD*S3-B2D2*S3-B3=	1.25E-07
8	S3-HSD*S3-B2D2*S3-E1E3=	6.00E-09
9	S3-HSD*ATWS-B1B2B3*S3-A=	5.99E-13
9	S3-HSD*ATWS-E1E2*S3-A=	5.18E-14

Формула для розрахунку частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ) наступна:

$$\lambda_{\text{чпаз}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \prod_{j=1}^M P_{i,j}$$

$$\lambda_{\text{ЧПАЗ}} = (S3-HSD*S3-B2D2*S3-B3)+(S3-HSD*S3-E1E2) +(S3-HSD*S3-B2D2*S3-E1E3)+(S3-HSD*S3-B2D2*S3-G1)+(S3-HSD*S3-B2D2*S3-D4)+(S3-HSD*S3-B2D2*S3-D3)+(S3-HSD*ATWS-B1B2B3*S3-A)+(S3-HSD*ATWS-E1E2*S3-A) = 2.58E-07 \text{ 1 / рік.}$$

5.2 Розрахунок ймовірності (частоти) КС і ЧПАЗ для нової моделі

Наведено розрахунок тих кінцевих станів, які пов'язані з пошкодженням активної зони. У випадку ДП нової моделі, 1 і 4 кінцеві стани є безпечними.

Розрахунок буде проводитися на основі ДП для нової моделі, що побудоване в програмному середовищі Saphire 8 і представлено на рисунку 4.

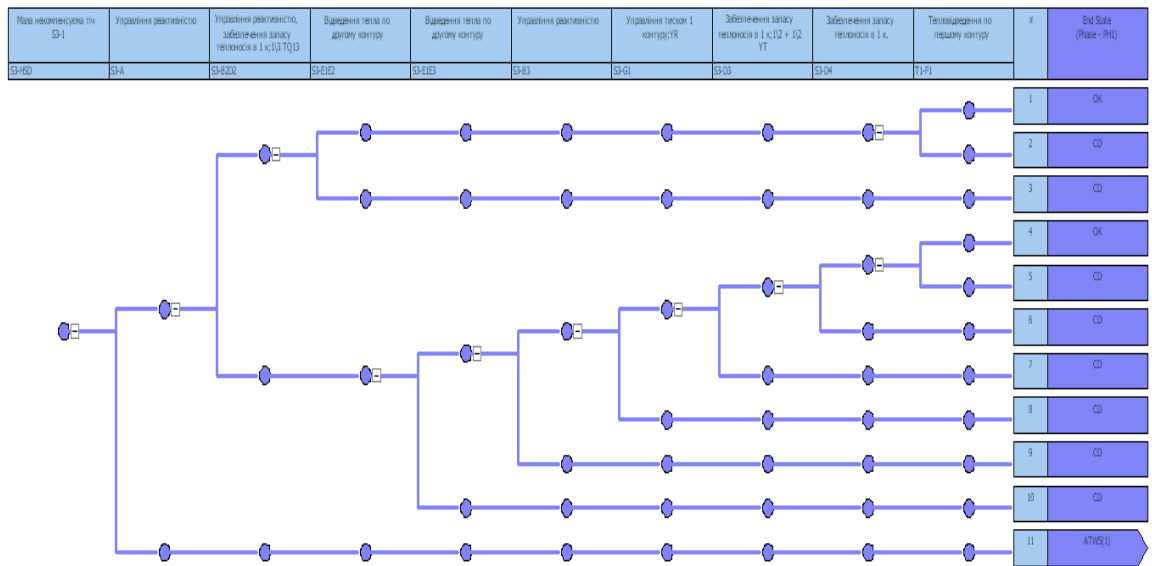


Рисунок 4 – S3-2 ДП «Мала некомпенсуєма тіч 1 контуру в межах ГО». Вид нової моделі в програмі Sapphire 8.

2	S3-HSD*T1-F1=	2.73E-06
3	S3-HSD*S3-E1E2=	1.21E-07
5	S3-HSD*S3-B2D2*T1-F1=	8.49E-10
6	S3-HSD*S3-B2D2*S3-D4=	3.76E-10
7	S3-HSD*S3-B2D2*S3-D3=	8.48E-11
8	S3-HSD*S3-B2D2*S3-G1=	5.99E-09
9	S3-HSD*S3-B2D2*S3-B3=	1.25E-07
10	S3-HSD*S3-B2D2*S3-E1E3=	6.00E-09
11	S3-HSD*ATWS-G2*S3-A=	6.48E-12
11	S3-HSD*ATWS-B1B2B3*S3-A=	5.99E-13
11	S3-HSD*ATWS-E1E2*S3-A=	5.18E-14

$$\lambda_{\text{ЧПАЗ}} = (S3-HSD*T1-F1) + (S3-HSD*S3-B2D2*S3-B3) + (S3-HSD*S3-E1E2) + (S3-HSD*S3-B2D2*S3-E1E3) + (S3-HSD*S3-B2D2*S3-G1) + (S3-HSD*S3-B2D2*T1-F1) + (S3-HSD*S3-B2D2*S3-D4) + (S3-HSD*S3-B2D2*S3-D3) + (S3-HSD*ATWS-G2*S3-A) + (S3-HSD*ATWS-B1B2B3*S3-A) + (S3-HSD*ATWS-E1E2*S3-A) = 2.99E-06 \text{ 1 / рік.}$$

Результати розрахунків для базової і нової моделей наведені нижче в таблицях 5.2,5.3

Таблиця 5.2 Результати розрахунків для базової моделі

Номер кінцевого стану	Частота виникнення, 1 / рік	ЧПАЗ, 1/рік
2	1.25E-07	2.58E-07
4	3.76E-10	
5	8.48E-11	
6	5.99E-09	
7	1.25E-07	
8	6.00E-09	
9	5.99E-13	
9	5.18E-14	

Таблиця 5.3 Результати розрахунків для нової моделі

Номер кінцевого стану	Частота виникнення, 1 / рік	ЧПАЗ, 1/рік
2	2.73E-06	2.99E-06
3	1.21E-07	
5	8.49E-10	
6	3.76E-10	
7	8.48E-11	
8	5.99E-09	
9	1.25E-07	
10	6.00E-09	
11	6.48E-12	
11	5.99E-13	
11	5.18E-14	

Висновки

Отримавши кількісні оцінки частот виникнення кінцевих станів і частот пошкодження активної зони для базової і нової моделі можна підсумувати наступне:

Відмінності в розрахунках частот виникнення КС і ЧПАЗ між базовим і новим ДП, перш за все, викликані необхідністю в розхолодженні нової моделі, як згадувалося раніше, додавання нової верхньої події (функції безпеки), пов'язаної з розхолодженням РУ, призвело до появи двох нових аварійних послідовностей і кінцевих станів (2 і 5) пов'язаних з невиконанням функції відведення тепла САОЗ НТ (при роботі по лінії TQ40). Невиконання даної функції безпеки, після вичерпання запасу теплоносія 2 контуру, призводить до пошкодження активної зони при низькому тиску. Частоти виникнення кінцевих станів 2 і 5 наступні 2.73E-06 і 8.49E-10 1 / рік.

Основний вклад в частоти виникнення даних КС вносять відмови насосів САОЗ НТ, наприклад у зв'язку з виникненням кавітації, або помилки персоналу під час відводу тепла за допомогою лінії планового розхолодження.

В цілому, за оцінкою оперативного персоналу, а так само за даними, отриманими з повномасштабного тренажеру [5], необхідний час на успішне виконання механічних дій по організації відведення тепла по лінії планового розхолодження становить 30 хвилин, але в той же час потрібно враховувати досвід, підготовку персоналу і рівень стресу. По [19] робота по підключенню і розхолодженні по ЛПР виконується в умовах помірно-

високого рівня стресу, що в тому чи іншому випадку може привести до виникнення помилок та в подальшому АП і КС.

Тому, при розрахунках для нової моделі при ВПА – мала некомпенсована течя, при реалізації нових АП і виникненню нових КС, спостерігається приріст ЧПАЗ для нової моделі порівняно з ЧПАЗ для базової моделі.

ЧПАЗ для базової моделі дорівнює значенню: $2.58E-07$ 1 / рік

ЧПАЗ для нової моделі дорівнює значенню: $2.99E-06$ 1 / рік

Тобто, приріст ЧПАЗ по даному ВПА через виникнення додаткових АП і КС складає 1058.91%.

Перелік посилань

1. IAEA Safety Series 50-P-4, "Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1)"
2. Моделі в SAPHIRE 8 розроблених на базі енергоблоку ЗАЭС.
3. Імовірнісний аналіз безпеки атомних станцій (ІАБ): Навчальний посібник / В. В. Бігун, О. В. Горбунов, І. М. Каденко та ін. - К., 2000. - 568 с.
4. Г. В. Громов, А. Е. Севбо. До питання визначення інтегральної частоти пошкодження активної зони.
5. ФБ-06 Книга 2 ІАБ ВІ НУМ Том 7 Аналіз надійності персоналу.

Комаров Юрій Олексійович, komarov@onu.ua

Комаров Юрій Алексеевич,

Комаров Yuriy,

Чепіженко Андрій Олександрович,

Чепиженко Андрей Александрович,

Cherizhenko Andrey.