

Впровадження в Україні сучасних підходів до оцінки пошкоджуваності елементів енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів

- **Сахно Олександр Володимирович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0131-3570>
- **Рижов Дмитро Іванович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0068-5009>
- **Шугайло Олександр Петрович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1044-0299>
- **Павлів Євген Андрійович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3299-8824>
- **Хамровська Леся Володимирівна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0443-2348>

Імовірнісний аналіз безпеки всіх рівнів повинен розглядати повний спектр вихідних подій для всіх станів реакторної установки, включно з таким екстремальним зовнішнім впливом, як землетрус.

Одними з вихідних даних для розроблення імовірнісного аналізу безпеки від сейсмічних впливів є результати аналізу пошкоджуваності конструкцій, систем та елементів енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів. Сейсмічна пошкоджуваність окремих конструкцій, систем та елементів може бути виражена кривою, яка показує умовну ймовірність їх відмови для заданого рівня сейсмічного впливу. З урахуванням розробленої ДП «НАЕК «Енергоатом» та прийнятої Держатомрегулюванням «Концепції виконання імовірнісної оцінки частоти пошкодження активної зони і частоти граничного аварійного викиду від сейсмічного впливу для енергоблоків АЕС України» для цілей імовірнісного аналізу безпеки від сейсмічних впливів енергоблоків АЕС України застосовується підхід, що полягає в синтезі оцінки граничної сейсмостійкості конструкцій, систем та елементів АЕС і імовірнісного аналізу безпеки. У статті розглянуто особливості аналізу пошкоджуваності конструкцій, систем та елементів енергоблоків АЕС України за цим підходом.

Ключові слова: атомна електростанція, імовірнісний аналіз безпеки, сейсмічний вплив, пошкоджуваність, крива пошкоджуваності.

© Сахно О. В., Рижов Д. І., Шугайло О-р П., Павлів Є. А., Хамровська Л. В., Підгаєцький Т. В., 2022

Вступ

Відповідно до загальноприйнятого у світі підходу та вимог нормативно-правових актів національної нормативної бази України з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) [1]-[3], виконання комплексного та всебічного аналізу безпеки АЕС базується на застосуванні детерміністичного та імовірнісного методів. Використання реалістичного підходу та специфічних (характерних для певної АЕС) вихідних даних під час імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) дозволяє визначити сценарії відмов та отримати числову оцінку фактичних ризиків від експлуатації АЕС за такими, встановленими в НП 306.2.141-2008 [1], критеріями безпеки, як частота пошкодження активної зони (ЧПАЗ), частота граничного аварійного викиду (ЧГАВ). Також в ІАБ виконується оцінка частоти пошкодження палива (ЧПП) в басейні витримки згідно з вимогами НП 306.2.162-2010 [2]. Необхідність обов'язкового врахування сейсмічних впливів (СВ) в ІАБ визначена вимогами НП 306.2.162-2010 [2] і НП 306.2.208-2016 [3], а виконання відповідного аналізу для кожного з енергоблоків АЕС, що експлуатуються в Україні, передбачено Комплексною (зведеною) програмою підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій [4] (захід «Разработка Сейсмического ВАБ»).

Першими практичними кроками в цьому напрямі стало впровадження систем сейсмологічного моніторингу майданчиків АЕС з метою уточнен-

ня та переоцінки рівня сейсмічної безпеки. Після завершення додаткових досліджень сейсмічних характеристик майданчиків АЕС і отримання поверхових спектрів відгуку для будівель і споруд АЕС, склались передумови для практичної реалізації робіт з ІАБ від СВ (СІАБ) енергоблоків АЕС України.

Особливості оцінки сейсмічної безпеки імовірнісним методом

Імовірнісна оцінка СВ на безпеку АЕС є однією з найбільш трудомістких задач у переліку аналізів безпеки через необхідність урахування особливостей СВ, що відрізняють їх від інших внутрішніх і зовнішніх небезпек. Зокрема:

СВ є загальною причиною відмов і одночасно впливають на всі елементи АЕС, включно з іншими енергоблоками майданчика;

СВ спричиняють вихідні події, що не розглядались в ІАБ для внутрішніх подій;

сценарії для обраних рівнів СВ можуть враховувати взаємний вплив систем охолодження басейну витримки та перевантаження палива і реактора;

під час аналізу сценаріїв, на відміну від прийнятої методології ІАБ, враховуються відмови пасивних елементів і інтерфейсів.

Стосовно процедури виконання аналізу, СІАБ є розширенням класичної методології побудови дерев подій та дерев відмов, що використовуються в ІАБ щодо внутрішніх вихідних подій. Основні складові СІАБ проілюстровано на рисунку 1.

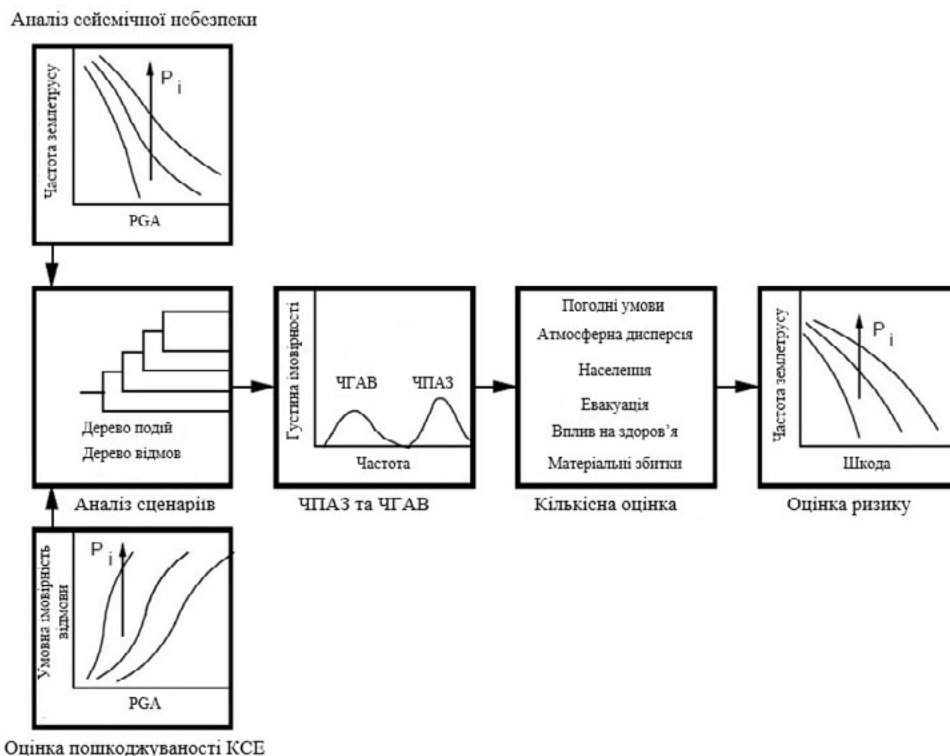


Рисунок 1 – Принципова схема процедури виконання СІАБ

На відміну від класичного ІАБ щодо внутрішніх вихідних подій, аналіз сценаріїв якого базується на випадкових відмовах систем елементів та обладнання, для СІАБ землетрус є новою причиною відмов. Як параметр надійності конструкцій, систем та елементів (КСЕ) в СІАБ крім випадкової відмови, яку визначено в ІАБ внутрішніх подій, урахується значення умовної ймовірності відмови КСЕ для заданих рівнів СВ.

Для отримання цих вихідних даних необхідно: визначити у вигляді кривих сейсмічної небезпеки частоту виникнення землетрусу певної інтенсивності (наприклад, певного значення пікового прискорення ґрунту – PGA) для кожного з діапазонів, на які поділено можливі СВ, що потребує виконання аналізу сейсмічної небезпеки майданчика АЕС;

визначити у вигляді кривих пошкоджуваності КСЕ ймовірність пошкодження / відмови КСЕ від землетрусу певної інтенсивності для кожного з діапазонів, на які поділено можливі СВ, що потребує виконання оцінки пошкоджуваності КСЕ.

Отже, оцінка пошкоджуваності (розрахунок кривих пошкоджуваності окремих КСЕ) є необхідним кроком формування вихідних даних для виконання СІАБ.

Загальна модель пошкоджуваності від сейсмічних впливів

Рівень коливання ґрунту є випадковою величиною, яка може бути повністю описана ймовірнісним розподілом. Проте, існує невизначеність в оцінці параметрів цього розподілу, точної форми цього розподілу та відповідного характеру відмови КСЕ. Аналіз міжнародного досвіду показує, що переважна більшість СІАБ наразі виконана з використанням моделі пошкоджуваності, яка ґрунтується на центральній граничній теоремі теорії ймовірностей щодо логнормального характеру розподілу добутку кількох слабо залежних випадкових величин незалежно від виду розподілу окремих змінних [5], [6].

Відповідно до цієї моделі, рекомендованої керівництвом Міжнародного агентства з ядерної енергії (МАГАТЕ) [7], стійкість КСЕ до СВ у діапазоні прискорень ґрунту A , може бути виражена за допомогою стійкості КСЕ до медіанного значення прискорення A_m , і двох випадкових величин:

$$A = A_m \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_U, \quad (1)$$

в якій ε_R і ε_U відображають, відповідно, наявні невизначеність медіанного значення пікового прискорення ґрунту (peak ground acceleration – PGA) і похибку моделювання СВ. Передбачається, що обидві величини ε_R і ε_U логнормально

поширюються зі стандартними логарифмічними відхиленнями β_R і β_U відповідно. Тоді:

β_R – алеаторна невизначеність (стандартне логарифмічне відхилення сейсмостійкості від її середнього значення, яке характеризує випадковість сейсмічного процесу);

β_U – епістемічна невизначеність (стандартне логарифмічне відхилення, причиною якого є похибка визначення середнього значення сейсмостійкості через неточності фізико-математичної моделі сейсмічного процесу і відгуку КСЕ на цей процес).

Формулювання пошкоджуваності за формулою (1) і припущення щодо логнормального розподілу дозволяють спростити розробку кривих пошкоджуваності з урахуванням імовірнісного характеру СВ:

$$F(a) = \Phi(u), \quad (2)$$

де $F(a)$ – умовна ймовірність відмови КСЕ за СВ рівня a ;

$\Phi(u)$ – кумулятивна функція стандартного нормального розподілу (розподілу Гауса) від стандартизованої нормальної змінної (u).

У разі точного знання виду відмови КСЕ та параметрів, що описують стійкість до PGA (тобто, врахування тільки алеаторної невизначеності β_R), співвідношення між F та відповідним рівнем PGA a визначає медіану (довірча ймовірність 50 %) криву пошкоджуваності КСЕ:

$$F(a)_{median} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{A_m} \right)}{\beta_R} \right]. \quad (3)$$

Якщо моделювання враховує епістемічну невизначеність β_U , пошкоджуваність стає випадковою величиною. За будь-якого значення PGA a умовна ймовірність відмови КСЕ F змінюється від 0 до 1, що відображено суб'єктивним / довірчим розподілом густини ймовірності та може бути виражено зворотною кумулятивною функцією стандартного розподілу Гауса (Φ^{-1}) довірчої ймовірності Q :

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{A_m} \right) + \beta_U \cdot \Phi^{-1}(Q)}{\beta_R} \right]. \quad (4)$$

На рисунку 2 показані криві пошкоджуваності КСЕ з довірчою ймовірністю 5 %, 16 %, 50 % (медіанне значення), 84 % та 95 %.

Отже, процедура побудови кривих пошкоджуваності зводиться до визначення таких вихідних параметрів, як стійкість КСЕ до медіанного значення PGA (медіанна стійкість) A_m та відхилення β_R і β_U .

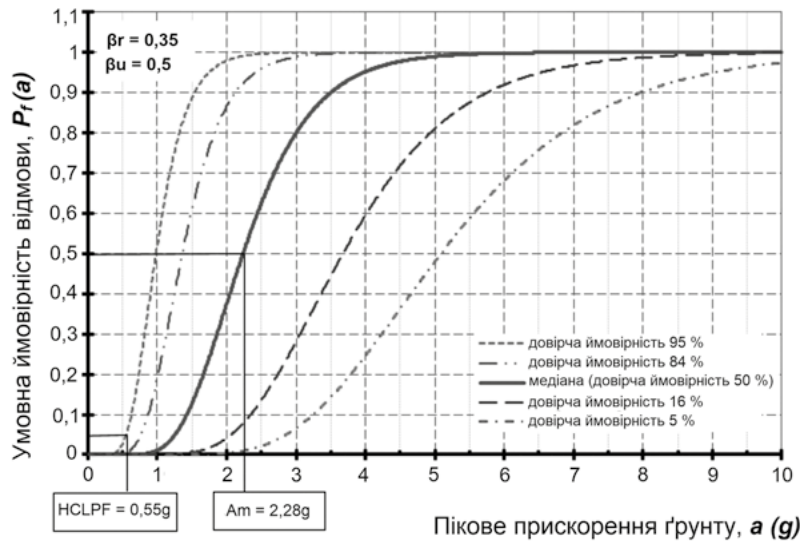


Рисунок 2 – Криві пошкоджуваності з різними рівнями довірчої імовірності

Підходи до визначення параметрів кривих пошкоджуваності

Рекомендації до визначення параметрів кривих пошкоджуваності в класичній постановці наведені, зокрема, у керівництвах МАГАТЕ [7], [8]. Відповідно до положень зазначених керівництв [7], [8], ці параметри можуть бути розраховані за допомогою методів масштабування або моделювання.

Метод масштабування (рисунок 3) використовує результати існуючих аналізів відгуку на сейсмічну дію, та криві пошкоджуваності визначаються відносно параметрів коливання (прискорення)

ґрунту. Значення A_m та логарифмічні відхилення β_R і β_U знаходяться окремо для кожного з параметрів, що впливають на сейсмостійкість. Ці значення потім об'єднуються за законом логнормального розподілу, щоб отримати підсумкове значення A_m і оцінити відхилення β_R і β_U , що необхідні для побудови кривих пошкоджуваності КСЕ.

Під час проведення аналізу пошкоджуваності методом моделювання (рисунок 4) виконується новий поглиблений аналіз КСЕ, і криві пошкоджуваності визначаються відносно параметрів локального відгуку КСЕ, але зрештою перераховуються (нормалізуються) на параметри сейсмічного впливу на ґрунті.

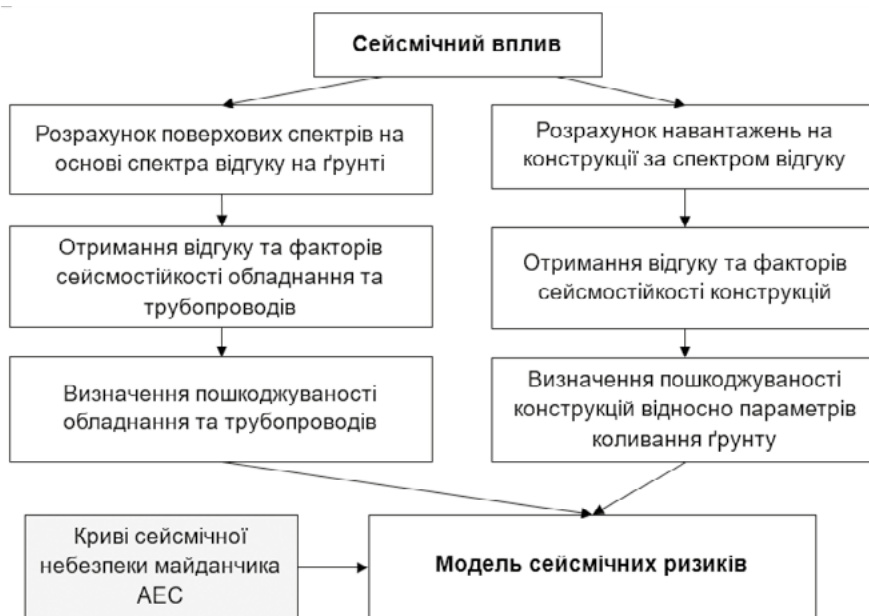


Рисунок 3 – Блок-схема визначення параметрів кривих пошкоджуваності КСЕ методом масштабування (на основі [6])



Рисунок 4 – Блок-схема визначення параметрів кривих пошкоджуваності КСЕ методом моделювання (на основі [6])

Детальний опис виконання аналізу пошкоджуваності цими методами наведений у документі [6], приклади їх використання для визначення параметрів сейсмічної пошкоджуваності КСЕ АЕС в [9].

Обидва методи є універсальними, проте потребують використання значної кількості спе-

цифічних вихідних даних. Це, зокрема, відомості про реальні землетруси і їх наслідки, експериментальні дані, дані результатів аналізів, а також виконання складних розрахунків для кожного окремого КСЕ, що розглядається в СІАБ (див. таблицю 1).

Таблиця 1 – Перелік основних специфічних вихідних даних, необхідних для визначення параметрів кривих пошкоджуваності розрахунковими методами [6]

Вихідні дані	Параметри для визначення вихідних даних
Вид відмови	<ul style="list-style-type: none"> - крихке руйнування; - втрата функціонування; - пластичний розрив; - малоциклічна втома; - відмови від пошкодження / руху ґрунту; - відмови внаслідок руйнування будівель та споруд.
Пластичність КСЕ	<ul style="list-style-type: none"> - форма гістерезисної петлі «сила-зміщення»; - зсув частоти конструкції; - період та тривалість коливання ґрунту.
Варіабельність відгуку конструкції	<ul style="list-style-type: none"> - невизначеність відгуку через різницю між фактичним і теоретичним спектром СВ; - нерівномірність коливань фундаменту; - невідповідність між фактичним затуханням і проєктним; - ефект взаємодії «ґрунт-конструкція».
Відгук елементів з урахуванням їх опор	<ul style="list-style-type: none"> - спектральна модель / форма спектра; - некогерентність переміщення ґрунту; - затухання (демпфування); - похибка моделювання; - ефект взаємодії «ґрунт-конструкція»; - орієнтація у просторі.

Для більшості енергоблоків АЕС України такі специфічні вихідні дані (або значна їх частина) наразі відсутні, а їх отримання потребує багато часових, людських та матеріальних витрат.

З метою оптимізації цих витрат, раніше для цілей аналізу сейсмічної безпеки енергоблоків АЕС України було прийнято концепцію виконання імовірнісної оцінки ЧПАЗ і ЧГАВ від сейсмічного впливу [10], яка регламентує використання комбінованого (гібридного) методу, що полягає в синтезі детерміністичної оцінки граничної сейсмостійкості КСЕ АЕС і подальшого імовірнісного аналізу отриманих результатів. Цей підхід був розроблений спеціалістами інституту «Electric Power Research Institute» (EPRI) та успішно реалізований на багатьох енергоблоках АЕС США [6].

Оцінка пошкоджуваності КСЕ АЕС комбінованим методом

Особливістю комбінованого методу є визначення пошкоджуваності КСЕ за параметром граничної сейсмостійкості HCLPF (high confidence of low probability of failure – висока достовірність низької імовірності відмови). Відповідно до положень документа [7], параметр HCLPF враховує як невизначеність сейсмічного процесу, так і похибку розрахунків сейсмостійкості, та є значенням прискорення ґрунту, за якого умовна імовірність відмови становить менше 5 % з рівнем достовірності 95 % (рисунок 5).

З огляду на співвідношення на рисунку 4, параметр HCLPF може бути співставний зі значенням медіанної стійкості A_m [11]:

$$HCLPF = A_m \cdot e^{-1,65(\beta_U + \beta_R)}. \quad (5)$$

Звідси:

$$A_m = \frac{HCLPF}{e^{-1,65(\beta_U + \beta_R)}} \text{ або } A_m = HCLPF \cdot e^{1,65(\beta_U + \beta_R)}. \quad (6)$$

Для визначення HCLPF використовується детерміністичний метод граничної сейсмостійкості, який є загальноприйнятим у світовій практиці аналізу стійкості КСЕ АЕС до сейсмічних впливів. В Україні обсяги та процедури оцінки сейсмостійкості КСЕ енергоблоків АЕС регламентуються галузевими методичними документами експлуатуючої організації [11], [12].

Отже, питання знаходження медіанного прискорення A_m зводиться до визначення величини HCLPF. Зважаючи на існуючий досвід та наявні для більшості енергоблоків АЕС України результати виконання оцінки сейсмостійкості КСЕ (зокрема розраховані методом граничної сейсмостійкості значення HCLPF), це суттєво спрощує процедуру побудови кривих пошкоджуваності.

Щодо визначення в межах комбінованого методу відхилень β_R і β_U зауважимо, що наразі існує низка даних щодо вже виконаних робіт з оцінки пошкоджуваності КСЕ АЕС різних країн світу, що, серед іншого, містять визначені параметри пошкоджуваності для різних типів КСЕ (трубопрово-

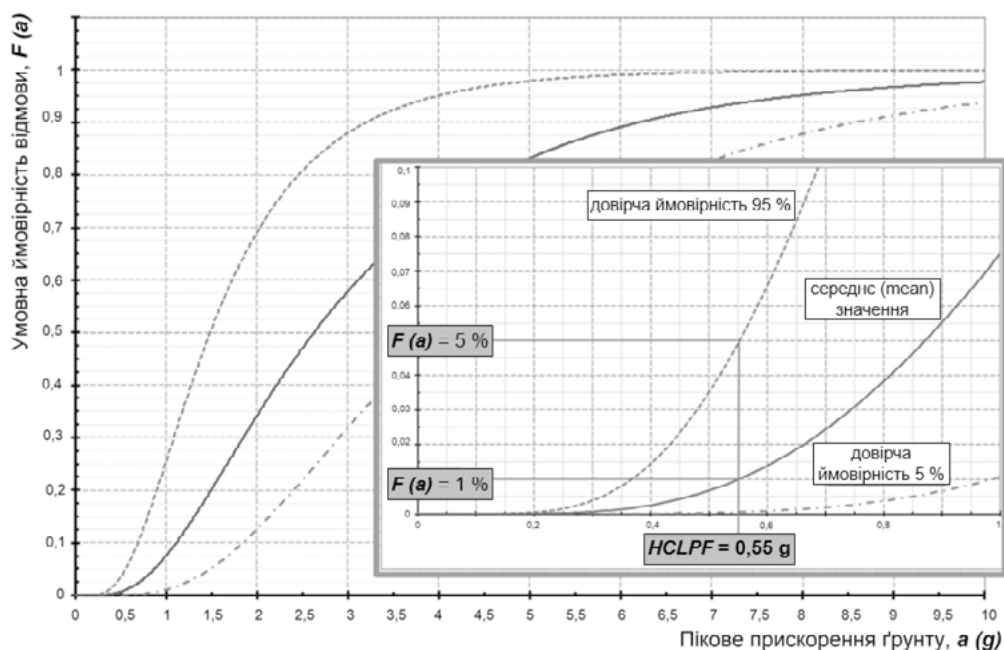


Рисунок 5 – Співвідношення HCLPF та сейсмічної пошкоджуваності КСЕ АЕС (крива з довірчою ймовірністю 95 % та усереднена крива)

дів, баків, арматури, електрообладнання, будівель і споруд тощо). Проведений спеціалістами EPRI аналіз світового досвіду виконання робіт з оцінки сейсмічної безпеки АЕС показав, що використання результатів аналізу пошкоджуваності КСЕ АЕС за вказаними значеннями відхилень β_R і β_U дозволяє оцінити вклад СВ в інтегральні ЧПАЗ і ЧГАВ енергоблоків АЕС з рівнем достовірності, достатнім для попереднього визначення КСЕ, що мають домінуючий вплив на безпеку АЕС [6].

З урахуванням зазначеного та керівництв МАГАТЕ [7], з метою забезпечення необхідної точності і достовірності результатів оцінки пошкоджуваності КСЕ АЕС та СІАБ загалом, підхід до виконання СІАБ енергоблоків АЕС України з використанням регламентованого Концепцією [10] комбінованого методу визначення пошкоджуваності КСЕ передбачає таку процедуру:

розробка попереднього СІАБ, під час якого пошкоджуваність КСЕ енергоблока АЕС визначається з використанням значення A_m , отриманого за формулою (6), та значень відхилень β_R і β_U з документа [6];

у разі виявлення за результатами попереднього СІАБ таких КСЕ, що мають значний вплив на інтегральні значення ЧПАЗ, ЧПП і ЧГАВ, має проводитись уточнення параметрів їх пошкоджуваності A_m , β_R і β_U методом масштабування та/або моделювання (зазначені вище) та переоцінка ЧПАЗ, ЧПП і ЧГАВ з використанням уточнених даних.

Впровадження комбінованого методу для виконання СІАБ енергоблоків АЕС України

Описані вище підходи були використані для оцінки пошкоджуваності КСЕ в межах СІАБ енергоблоків АЕС України. Пілотним енергоблоком для виконання таких робіт був визначений енергоблок № 1 ВП ЗАЕС [4].

Оскільки нормативна база України (зокрема документи [1]-[3]) встановлює лише загальні вимоги до виконання аналізу безпеки енергоблоків АЕС стосовно СВ, з метою формування детальних вимог щодо методології виконання СІАБ ВП ЗАЕС було розроблено Технічне керівництво [13]. За результатами проведення державних експертиз ЯРБ [14], [15], а також комплексного аналізу міжнародними експертами RISKAUDIT, було забезпечено відповідність положень Технічного керівництва [13] сучасній світовій практиці та міжнародним керівництвам (зокрема, відповідність процедури визначення пошкоджуваності КСЕ положенням комбінованого методу). На основі цих оцінок Держатомрегулюванням було погоджено використання Технічного керівництва [13] як методичного документа для виконання СІАБ енергоблоків №№ 1 – 3 ВП ЗАЕС.

Отриманий на ВП ЗАЕС досвід виконання СІАБ дозволив експлуатуючій організації розробити

відповідний галузевий стандарт [16], що регламентує обсяг і процедуру виконання СІАБ енергоблоків АЕС України. За основу для розробки стандарту [16] було прийнято Технічне керівництво [13], з урахуванням положень керівництв МАГАТЕ [7], [8], а також змін і доповнень унаслідок зворотного зв'язку від досвіду виконання СІАБ енергоблоків №№ 1 – 3 ВП ЗАЕС. Серед іншого, у стандарті [16] деталізовані окремі положення процедури аналізу пошкоджуваності КСЕ із застосуванням комбінованого методу відповідно до розглянутих вище підходів.

За положеннями погодженого Держатомрегулюванням стандарту [16] виконано низку робіт з СІАБ енергоблоків №№ 4 – 5 ВП ЗАЕС. Відповідні звітні матеріали, розроблені за результатами цих робіт, наразі проходять державну експертизу ЯРБ.

Висновки

Аналіз пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС проводиться з метою формування вихідних даних для розроблення СІАБ. У статті описані положення теорії сейсмічної пошкоджуваності, за якими умовна ймовірність відмови КСЕ для заданого рівня сейсмічного впливу описується сімейством кривих пошкоджуваності. Показано, що процедура побудови кривих пошкоджуваності зводиться до визначення стійкості до медіанного прискорення ґрунту A_m та відхилень β_R і β_U .

Виконано аналіз сучасних світових підходів до отримання зазначених параметрів, детально розглянуто комбінований метод визначення A_m з використанням результатів детерміністичної оцінки граничної сейсмостійкості КСЕ та його переваги для АЕС України. Показано можливість використання для аналізу пошкоджуваності КСЕ АЕС України значень відхилень β_R і β_U , отриманих за результатами вже виконаних робіт з оцінки сейсмічної безпеки інших АЕС.

Також наведено інформацію щодо застосування описаних у статті підходів у керівних документах експлуатуючої організації стосовно виконання СІАБ енергоблоків АЕС України.

Список використаної літератури

1. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. 57 с.
2. НП 306.2.162-2010. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2010. 12 с.

3. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2016. 58 с.

4. Комплексна (зведена) програма підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій: постанова Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 № 1270. *Офіційний вісник України*. 2011. № 96. Ст. 3504.

5. NUREG/GR-0008. Validation of Seismic Probabilistic Risk Assessments of Nuclear Power Plants. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. Washington D.C., 1994, 131 p.

6. EPRI Report 3002000709. Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide. *Electric Power Research Institute Final Report*. Palo Alto, CA, 2013. 448 p.

7. IAEA Tecdoc-1937. Probabilistic safety assessment for seismic events. *IAEA Technical Report Series*. Vienna: IAEA, 2020, 97 p.

8. IAEA Tecdoc-1487. Advanced nuclear plant design options to cope with external events. *IAEA Technical Report Series*. Vienna: IAEA, 2006, 222 p.

9. Kennedy R. P., Campbell R. D. Reliability of Pressure Vessels and Piping Under Seismic Loads. *Pressure Vessel and Piping Technology, a Decade of Progress, American Society of Mechanical Engineers*. 1985. pp. 857-874.

10. Концепция выполнения вероятностной оценки частоты повреждения активной зоны и частоты предельного аварийного выброса от сейсмического воздействия для энергоблоков АЭС Украины. К.: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2011. 20 с.

11. DITI 300/376-RU/R.2. Методология оценки сейсмостойкости оборудования для целей квалификации на сейсмические воздействия. К.: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2012. 91 с.

12. МТ-Т.0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. К.: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2016. 54 с.

13. АТ75/208-13.100.ОД.3 Запорожская АЭС. Энергоблок № 1. Результаты исследований сейсмических воздействий. Разработка сейсмического вероятностного анализа безопасности (ВАБ) энергоблока № 1 ОП ЗАЭС. Техническое руководство по выполнению ВАБ ВЭВ для сейсмического исходного события. ОП ЗАЭС ГП НАЭК «Енергоатом», 70 с.

14. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки матеріалів ВП «Запорізька АЕС» з урахування сейсмічних впливів в ІАБ енергоблоку №1 ВП ЗАЭС (реєстраційний № 14-09-7812). Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2014. 34 с.

15. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки матеріалів імовірнісного аналізу безпеки енергоблоку № 1 ВП «Запорізька АЕС» по відношенню до сейсмічних впливів (в частині формування вихідних даних) (реєстраційний № 18-09-10604/1). Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2018. 30 с.

16. СОУ НАЕК 198:2020. Инженерная, научная и техническая поддержка. Техническое руководство по выполнению сейсмического ВАБ. Общие требования. К.: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2020. 74 с.

References

1. NP 306.2.141-2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants. Approved by SNRIU Order No. 162 dated 19 November 2007, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 25 January 2008 under No. 56/14747.

2. NP 306.2.162-2010. Requirements for NPP Safety Assessment. Approved by SNRIU Order No 124 dated 22 September 2010, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 21 October 2021 under No. 964/18259.

3. NP 306.2.208-2016. Requirements for Seismic Resistance Design and for Evaluation of Seismic Safety of Ukrainian NPPs. Approved by SNRIU Order No. 175 dated 17 October 2016, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 11 July 2016 under No. 1449/29579.

4. Comprehensive (Integrated) Safety Improvement Program for Ukrainian NPPs: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1270 dated 07 December 2011.

5. NUREG/GR-0008. (1994). Validation of Seismic Probabilistic Risk Assessments of Nuclear Power Plants. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.

6. EPRI Report 3002000709. (2013). Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide. Electric Power Research Institute Final Report. Palo Alto, CA.

7. IAEA Tecdoc-1937. (2020). Probabilistic Safety Assessment for Seismic Events. IAEA Technical Report Series. IAEA, Vienna.

8. IAEA Tecdoc-1487. (2006). Advanced Nuclear Plant Design Options to Cope with External Events. IAEA Technical Report Series. IAEA, Vienna.

9. Kennedy, R.P., Campbell R.D. (1985). Reliability of Pressure Vessels and Piping Under Seismic Loads. *Pressure Vessel and Piping Technology, a Decade of Progress, American Society of Mechanical Engineers*, 857-874.

10. The Concept for Probabilistic Assessment of Core Damage Frequency Caused by Seismic Impacts for Ukrainian NPPs, Kyiv, NNEGC "Energoatom".

11. Methodology of Seismic Resistance Calculated Analysis for Components of Operating NPPs in Frames of Seismic Margin Assessment Method. МТ-Т.0.03.326-13, Revision 3, approved by SNRIU letter No. 15-33/1-6126 of 4 October 2017.

12. DITI 300/376-RU/R.2. Methodology of Seismic Assessment for Qualification of Equipment for Seismic Impacts. (2009). UJV Rez.

13. АТ75/208-13.100.ОД.3 Zaporizhzhya NPP. Unit 1. Results of Studies on Seismic Effects. Development of Seismic Probabilistic Safety Analysis (PSA) for ZNPP Unit 1. Technical Guidance for the Implementation of PSA EEI for a Seismic Initiating Event, Zaporizhzhya NPP, NNEGC "Energoatom".

14. Report on the implementation of the state nuclear and radiation safety review of the materials of SS "Zaporizhzhya NPP" regarding consideration of seismic impacts in the PSA of SS ZNPP Unit 1 (registration No. 14-09-7812).(2014). Kyiv, SSTC NRS.

15. Report on the implementation of the state nuclear and radiation safety review of the materials of probabilistic safety analysis of the SS "Zaporizhzhya NPP" Unit 1 in relation to seismic impacts (in terms of generating initial data) (registration No. 18-09-10604/1). (2018). Kyiv, SSTC NRS.

16. SOU NAEK 198:2020. Engineering, Scientific and Technical Support. Technical Guidance for Performing Seismic PSA. General Requirements, Kyiv, NNEGC "Energoatom".

Implementation of State-of-the-Art Approaches to Assessing the Seismic Fragility of NPP Components in Ukraine

O. Sakhno, D. Ryzhov, O-r Shugaylo, Ie. Pavliv, L. Khamrovska

State Enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

The probabilistic safety assessment (PSA) of all levels should consider a full range of initiating events for all reactor states, including external hazards such as earthquakes.

The input data for seismic PSA development include the results of seismic fragility analysis for structures, systems and components (SSCs) of NPP units. The fragility of SSCs can be described by a curve that shows the conditional probability of their failure for a given seismic impact. Taking into account the Concept for Probabilistic Assessment of Core Damage Frequency from Seismic Impacts for Ukrainian NPPs, developed by Energoatom and agreed by SNRIU, an approach for the synthesis of seismic margin assessment of NPP components and subsequent probabilistic analysis is adopted in Ukraine as seismic PSA procedure.

The paper considers the peculiarities of the SSC seismic fragility analysis for Ukrainian NPPs considering the abovementioned approach.

Keywords: nuclear power plant, probabilistic safety assessment, seismic impact, fragility, fragility curve.

Отримано 01.06.2022