

Практичні аспекти формування вихідних параметрів для аналізу пошкодженості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС України 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>
- **Постой Анна Олегівна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5603-3421>
- **Гаврик Володимир Сергійович**
Державне підприємство «Національна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», відокремлений підрозділ «Рівненська АЕС», м. Вараш, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4784-9047>

У статті наведено інформацію щодо прийнятих в Україні підходів до виконання аналізу пошкодженості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів. Продемонстровано, що коректність і ступінь консерватизму отриманих результатів аналізу визначається вихідними параметрами невизначеності та граничної сейсмостійкості. Виконано аналіз підходів до процедури підготовки цих параметрів та зазначено основні аспекти, які мають бути враховані під час виконання розрахунку параметрів пошкодженості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС.

У статті розглянуто особливості вибору значень логарифмічних відхилень і отриманих нерозрахованим способом параметрів граничної сейсмостійкості елементів і конструкцій енергоблоків АЕС для побудови сімейства кривих пошкодженості та вибору певних кривих з такого сімейства для подальшого

використання в імовірнісному аналізі безпеки енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів. Також у статті описані детальні процедури підготовки вихідних даних та виконання аналізу пошкоджуваності, розроблені з урахуванням зазначених вище аспектів.

Ключові слова: атомна електростанція, гранична сейсмостійкість, імовірнісний аналіз безпеки, крива пошкоджуваності, медіанне прискорення ґрунту, сейсмічний вплив, умовна імовірність відмови.

© Сахно О. В., Рижов Д. І., Шугайло О-р П., Павлів Є. А., Хамровська Л. В., Постой А. О., Гаврик В. С., 2022

Вступ

Особливістю імовірнісного аналізу безпеки атомних електростанцій (АЕС) від сейсмічних впливів є використання специфічних вихідних даних [1]. Параметрами надійності конструкцій, систем і елементів (КСЕ) енергоблоків АЕС для такого аналізу є значення умовної ймовірності їх відмови за заданих рівнів інтенсивності сейсмічних впливів (СВ) [2]. З метою отримання цих даних необхідно виконати аналіз сейсмічної пошкоджуваності. Основні положення теорії пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС від СВ описані в статті [3]. Зокрема, у [3] продемонстровано, що умовна імовірність відмови КСЕ енергоблоків АЕС для заданого рівня СВ описується сімейством кривих пошкоджуваності, а процедура побудови кривих пошкоджуваності зводиться до визначення стійкості A_m до медіанного значення пікового прискорення ґрунту (peak ground acceleration – PGA) та відхилень β_R і β_U , що відображають алеаторну й епістемічну невизначеність аналізу.

В Україні обсяг і порядок виконання імовірнісного аналізу безпеки енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів (СІАБ) регламентується галузевим стандартом експлуатуючої організації [4], розробленим з урахуванням положень керівництв Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [5], [6] та з використанням регламентованого Концепцією [7] комбінованого методу аналізу пошкоджуваності, який передбачає визначення A_m за параметром граничної сейсмостійкості HCLPF (High Confidence of Low Probability of Failure – висока достовірність низької ймовірності відмови), розрахованим детерміністичним способом або отриманим непрямим методом.

Підходи до побудови кривих пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС України з використанням вихідних параметрів HCLPF, β_R , β_U наведені в додатку Е до стандарту [4] на основі керівництв [5], [8]. Водночас, досвід виконання державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) матеріалів СІАБ енергоблоків №№ 1 – 5 Відокремленого підрозділу «Запорізька АЕС» (ВП ЗАЕС), розроблених експлуатуючою організацією, дозволяє окреслити та деталізувати окремі аспекти, які повинні бути

враховані під час розрахунків параметрів пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС за наведеними в стандарті [4] підходами. Це, зокрема:

розрахунок і подальше використання в СІАБ усередненої кривої пошкоджуваності;

обґрунтований вибір значень логарифмічних відхилень β_R і β_U ;

особливості визначення A_m за консервативними узагальненими значеннями HCLPF обладнання енергоблоків АЕС, отриманими нерозрахунковим способом.

Розрахунок усередненої кривої пошкоджуваності

Через невизначеність і випадковий характер СВ умовна ймовірність відмови КСЕ енергоблоків АЕС розподілена в інтервалі довірчої ймовірності (достовірності) Q від 5% до 95% та описується сімейством відповідних кривих. Приклад сімейства кривих пошкоджуваності з довірчою ймовірністю Q = 5%, 16%, 50%, 84% та 95% для КСЕ енергоблоків АЕС з граничною сейсмостійкістю HCLPF = 0,55g наведений на рисунку 2 статті [3].

Утім, для цілей виявлення КСЕ, які мають домінуючий вплив на інтегральні значення критеріїв безпеки енергоблоків АЕС від СВ, необхідним і достатнім є розрахунок так званих «точкових» (числових) значень частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ), частоти граничного аварійного викиду (ЧГАВ) та частоти пошкодження палива (ЧПП) в басейні витримки і перевантаження палива. Проведення «точкової» оцінки ЧПАЗ, ЧГАВ і ЧПП рекомендовано керівництвами МАГАТЕ [2], [6] та передбачено стандартом [4] як перший етап розробки СІАБ енергоблоків АЕС України з наступним аналізом невизначеності під час кількісної оцінки, аналізу та інтерпретації отриманих результатів.

З метою розрахунку «точкових» значень ЧПАЗ, ЧГАВ і ЧПП має бути забезпечена чітка однозначна залежність умовної ймовірності відмови КСЕ енергоблоків АЕС від рівня PGA передбачуваних СВ, що досягається згортою довірчого розподілу. Поширеною практикою такої згортки є використання середньоарифметичної (або медіанної) кривої пошкоджуваності з довірчою ймовірністю 50%, яка описується такою функцією [5]:

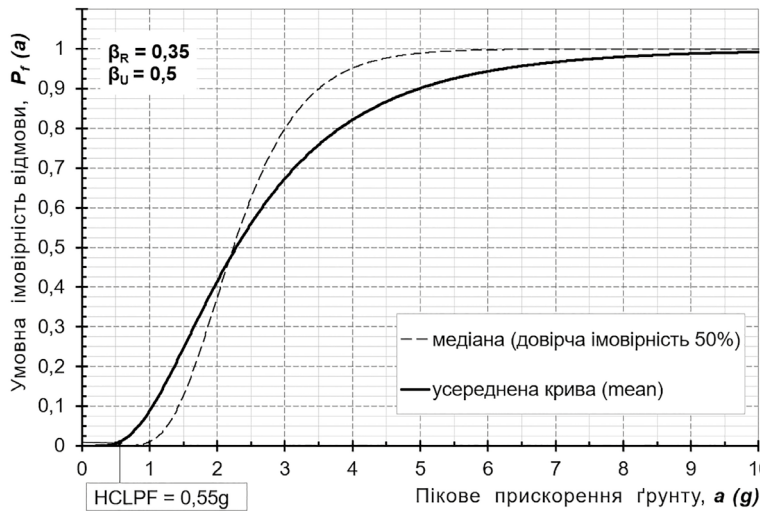


Рисунок 1 – Медіанна та усереднена криві пошкоджуваності

$$F(a)^{median} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{A_m} \right)}{\beta_R} \right] \quad (1)$$

Водночас, у документах [8]-[10] пропонується розроблений науковцями «Electric Power Research Institute», США, (EPRI) варіант згортки через застосування складеної змінної β_c що задається як:

$$\beta_c = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \quad (2)$$

Запропонований підхід враховує сукупний внесок алеаторної і епістемічної невизначеності стосовно відмови КСЕ енергоблоків АЕС від СВ, що за умови збереження особливостей логнормального розподілу ймовірностей дозволяє побудувати середньозважену (або усереднену) криву пошкоджуваності:

$$F(a)^{mean} = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{A_m} \right)}{\beta_c} \right] \quad (3)$$

На рисунку 1 зображені медіанна та усереднена криві пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС з граничною сейсмостійкістю HCLPF = 0,55g, побудовані за формулами (1) та (3) відповідно.

Результати з рисунка 1 демонструють, що згортка за медіанною кривою призводить до зниження отриманих значень умовної ймовірності відмови КСЕ в діапазоні низьких PGA, характерних для майданчиків АЕС України, та, відповідно, до зниження внеску СВ в інтегральні значення ЧПАЗ, ЧГАВ і ЧПП енергоблоків. Такий висновок підтверджується світовим досвідом виконання СІАБ, який вказує,

зокрема, на істотно вищу точність «точкової» оцінки критеріїв безпеки та оцінки сейсмічного ризику енергоблоків АЕС з використанням усереднених кривих пошкоджуваності КСЕ [11].

Також зауважимо, що стосовно усередненої кривої параметр граничної сейсмостійкості HCLPF можна визначити як значення прискорення ґрунту, за якого умовна ймовірність відмови становить менше 1 % (рисунку 2).

У цьому випадку стандартизована нормальна змінна u становить мінус 2,33 [12] і параметр HCLPF може бути співставний зі значенням стійкості A_m як:

$$HCLPF = A_m^{mean} \cdot e^{-2,33\beta_c} \quad (4)$$

Звідси:

$$A_m^{mean} = \frac{HCLPF}{e^{-2,33\beta_c}} \text{ або } A_m^{mean} = HCLPF \cdot e^{2,33\beta_c} \quad (5)$$

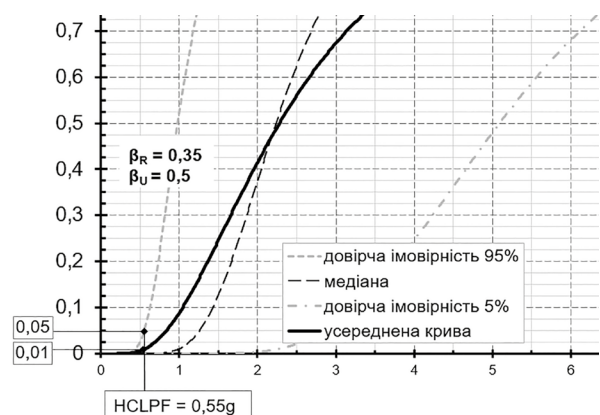


Рисунок 2 – Співвідношення HCLPF та сейсмічної пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС (крива з довірчою ймовірністю 95 % та усереднена крива)

Для коректної побудови усередненої кривої пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС у формулі (3) потрібно використовувати значення A_m^{mean} , розраховане за формулою (5).

Використання отриманої за описаним вище підходом усередненої кривої пошкоджуваності дозволяє з достатнім ступенем точності визначити умовну імовірність відмови КСЕ енергоблоків АЕС від СВ заданого рівня та виконати «точкову» оцінку ЧПАЗ, ЧГАВ і ЧПП з метою виявлення КСЕ, які мають домінуючий вплив на рівень безпеки енергоблоків АЕС України від СВ.

Вибір репрезентативних значень відхилень

Під час проведення аналізу пошкоджуваності розрахунковими методами (метод моделювання чи масштабування) визначення стійкості A_m супроводжується оцінкою похибок розрахунку кожного коефіцієнта безпеки, що впливають на цей параметр. Остаточні значення відхилень β_R і β_U розраховуються за значеннями цих похибок [8]. Комбінований (гібридний) метод акцентований на спрощеному визначенні A_m за результатами оцінки граничної сейсмостійкості, що унеможливорює розрахунок відхилень β_R і β_U . Так, розробниками комбінованого методу пропонується обирати лише складену змінну β_C методом інженерної оцінки з рекомендованого діапазону 0,3 – 0,5 для конструкцій та основних пасивних компонентів енергоблоків АЕС, 0,4 – 0,6 для активних механічних компонентів [11].

Водночас існує інформація щодо вже виконаних робіт з СІАБ для низки енергоблоків АЕС різних країн світу, результати яких, серед іншого, містять визначені параметри пошкоджуваності для різних типів КСЕ (трубопроводів, баків, арматури, електрообладнання, будівель і споруд тощо). Ця інформація була акумульована та проаналізо-

вана науковцями EPRI, а репрезентативні результати визначення параметрів пошкоджуваності, зокрема β_R і β_U , відображені в Таблиці Н-1 документа [8].

Оскільки роботи з СІАБ виконувались з використанням різної матеріально-технічної бази (устаткування, програмне забезпечення тощо), процедур отримання вихідних даних (випробування, досвід реальних землетрусів, розрахунків) та підходів до виконання аналізу (масштабування, моделювання, комбінований метод), наведені в Таблиці Н-1 документа [8] відхилення β_R і β_U отримані за даними різних досліджень, мають значний розкид значень. Утім можна помітити певну відповідність між величинами відхилень β_R і β_U та отриманими результатами аналізу пошкоджуваності. Так, на рисунках 3, 4 показано залежність характеру кривих пошкоджуваності з довірчою імовірністю 95 % і 5 % від зміни значень алеаторної та епістемічної невизначеності відповідно.

З наведених кривих видно, що в разі збільшення значення алеаторної невизначеності β_R діапазон пошкоджуваності зменшує кут нахилу та набуває вигляду більш розтягнутої «S-подібної» області, тобто збільшується інтервал прискорень ґрунту, який необхідно враховувати під час моделювання. Збільшення епістемічної невизначеності β_U веде до розширення діапазону пошкоджуваності в зону більшої інтенсивності СВ, що, зі свого боку, призводить до збільшення похибки моделювання та невіправдано завищує розраховану здатність модельованої одиниці КСЕ енергоблоків АЕС витримувати сейсмічні навантаження.

Наявність зазначеної вище залежності точності та достовірності результатів аналізу пошкоджуваності від прийнятих для розрахунку величин відхилень β_R і β_U , з урахуванням граничних умов, прийнятих для визначення стійкості A_m в окремих дослідженнях, дозволило науковцям EPRI узагальнити результати цих досліджень та виділити зна-

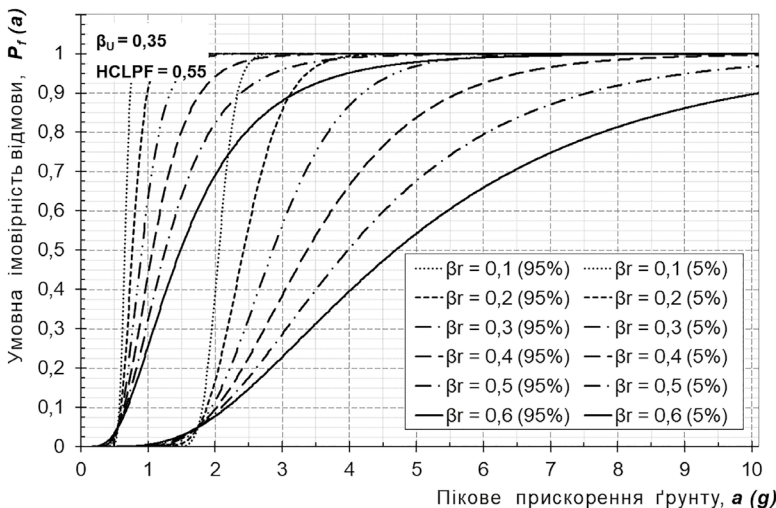


Рисунок 3 – Вплив алеаторної невизначеності на характер кривих пошкоджуваності з довірчою імовірністю Q = 95 % і 5 %

чення параметрів пошкоджуваності для кожного типу КСЕ енергоблоків АЕС, які з певним ступенем достовірності можна вважати репрезентативними. Приклад такого узагальнення для герметичного огороження реакторної установки та системи сталених зварних трубопроводів наведено на рисунках 5, 6 на основі інформації документа [8].

Отримані репрезентативні значення параметрів пошкоджуваності, зокрема β_R і β_U , зведені в Таблиці Н-2 документа [8]. Також у документі [8] показано, що використання наведених у Таблиці Н-2 репрезентативних значень відхилень β_R і β_U дозволяє оцінити вклад СВ в інтегральні значення ЧПАЗ і ЧГАВ енергоблоків АЕС з рівнем достовірності,

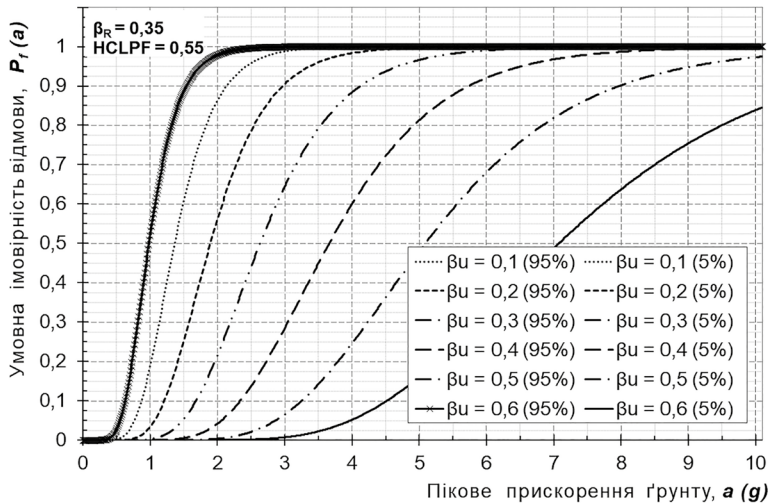


Рисунок 4 – Вплив епістемічної невизначеності на характер кривих пошкоджуваності з довірчою імовірністю $Q = 95\%$ і 5%

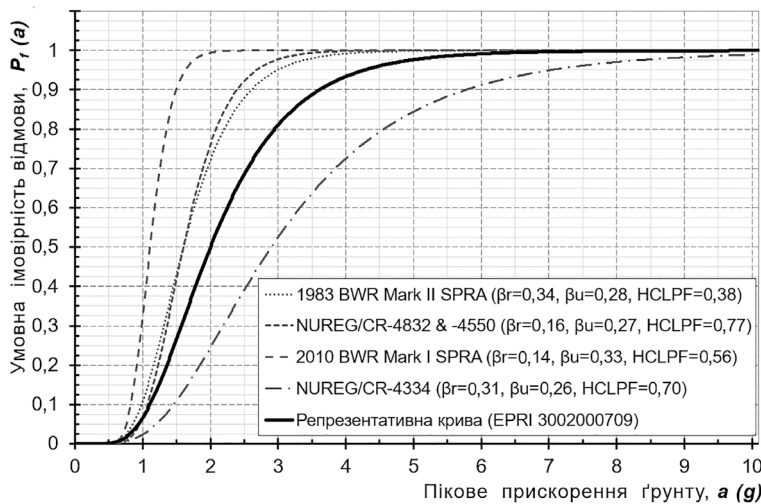


Рисунок 5 – Усереднена крива пошкоджуваності герметичного огороження реакторної установки енергоблоку АЕС за даними різних досліджень з довірчою імовірністю

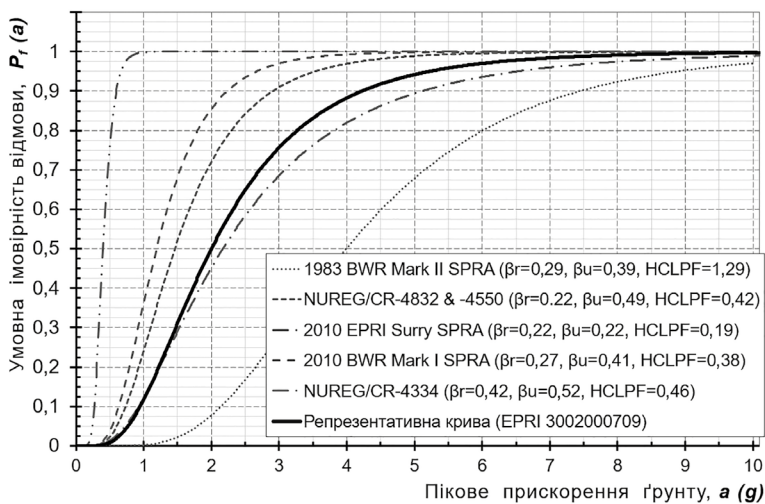


Рисунок 6 – Усереднена крива пошкоджуваності системи зварних трубопроводів за даними різних досліджень

достатнім для визначення КСЕ, що мають домінуючий вплив на безпеку. Оскільки саме ця задача є метою СІАБ з використанням комбінованого методу [3], під час визначення відхилень β_R і β_U в межах аналізу пошкоджуваності КСЕ для СІАБ енергоблоків АЕС України можна використовувати дані Таблиці Н-2 документа [8] для відповідного типу КСЕ.

Важливо зазначити, що після визначення основних вкладників у ЧПАЗ, ЧГАВ і ЧПП, за потреби, проводиться уточнення відповідних параметрів пошкоджуваності розрахунковими методами (моделювання чи масштабування) та повторна оцінка інтегральних показників безпеки від СВ з використанням уточнених даних [4].

Використання узагальнених нерозрахункових значень граничної сейсмостійкості КСЕ енергоблоків АЕС

Крім суттєвого спрощення процедури побудови кривих пошкоджуваності завдяки використанню результатів раніше виконаної оцінки сейсмостійкості КСЕ (зокрема, параметра НСLРF), комбінований метод дозволяє реалізувати в СІАБ вимоги НП 306.2.162-2010 [1] щодо використання специфічних для енергоблоків АЕС вихідних даних. Це досягається розрахунком параметра НСLРF з використанням детерміністичного методу граничної сейсмостійкості (МГС), що враховує особливості конструкції, розташування та поточний технічний стан КСЕ енергоблоків АЕС [13].

Аналіз наявних результатів оцінки сейсмостійкості КСЕ енергоблоків АЕС України показує, що використання МГС охоплює практично всі будівлі, споруди та комунікації (кабелі, трубопроводи), важливі для безпеки. Проте для більшості обладнання енергоблоків АЕС ($\approx 60\%$) роботи виконувались із застосуванням методу так званої «непрямої» оцінки – використання досвіду експлуатації аналогічного обладнання під час впливів реальних землетрусів на об’єкти та результатів сейсмічних випробувань такого обладнання на

вібраційних стендах [14]. Метод «непрямої» оцінки регламентується Методологією [15] та ґрунтується на розробленій у США загальній процедурі проведення сейсмічної кваліфікації обладнання на підставі досвіду експлуатації, яка отримала назву «Generic Implementation Procedure» (GIP). GIP є ефективною процедурою відбору сейсмостійкого обладнання діючих АЕС з привласненням йому значення НСLРF, узагальненого на весь клас обладнання, до якого воно було віднесене за встановленими критеріями подоби. У межах процедури GIP параметр НСLРF устатковується з урахуванням так званого «граничного» спектра впливу СВ на обладнання залежно від відгуку конструкцій у діапазоні частот f (bounding spectra – BS), наведеному на рисунку 7. Для жорстко закріпленого до конструкцій обладнання параметр НСLРF у межах процедури GIP визначений щонайменше 0,33g (тобто BS) або 0,5g ($1,5 \cdot BS$) залежно від його класу [16].

Оцінка НСLРF у такий спосіб є достатньою для цілей кваліфікації обладнання, але може бути надмірно консервативною для СІАБ через вимоги НП 306.2.162-2010 [1] щодо необхідності застосування реалістичного підходу під час виконання імовірнісного аналізу безпеки.

Водночас, під час визначення репрезентативних значень параметрів пошкоджуваності, крім відхилень β_R і β_U , науковцями EPRI були враховані також значення стійкості A_m , отримані для однотипного обладнання в окремих дослідженнях. Репрезентативні значення стійкості A_m для кожного типу КСЕ енергоблоків АЕС наведені у Таблиці Н-2 документа [8] разом з відповідними значеннями відхилень β_R і β_U . Враховуючи описане в роботі [3] співвідношення параметра НСLРF та стійкості A_m :

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

можна отримати узагальнене значення НСLРF окремих типів обладнання за результатами раніше виконаних досліджень їх пошкоджуваності від СВ.

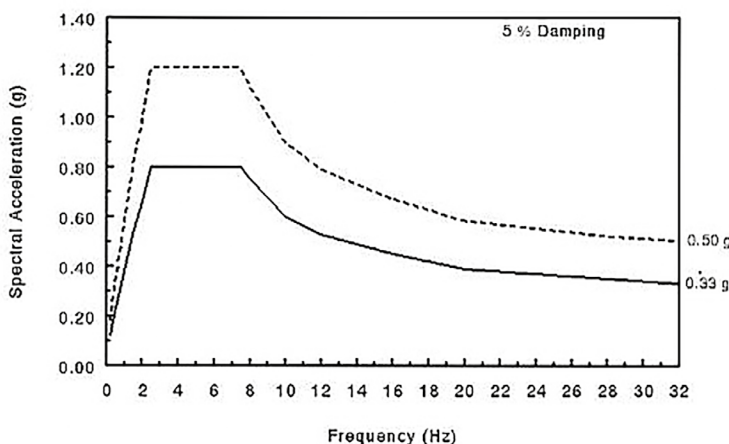


Рисунок 7 – Граничні спектри сейсмостійкості BS і $1,5 \cdot BS$ класів обладнання GIP з узагальненими значеннями НСLРF = 0,33g і НСLРF = 0,5g відповідно [15].

Отже, для обладнання, сейсмостійкість якого була встановлена методом непрямой оцінки, маємо два консервативних узагальнених значення граничної сейсмостійкості:

HCLPF, установлений за результатами віднесення до певної групи однотипного обладнання в межах процедури GIP (HCLPF_{GIP});

HCLPF, отриманий за співвідношенням (6) з визначеного науковцями EPRI репрезентативного значення стійкості A_m для певного типу КСЕ енергоблоків АЕС (HCLPF_{EPRI}).

У цьому випадку консервативність оцінки сейсмостійкості передбачає найбільш несприятливі наслідки, тобто припущення мінімально можливого наявного запасу до відмови обладнання внаслідок СВ. Отже, з метою наближення до регламентованого НП 306.2.162-2010 [1] реалістичного підходу, у подальшому аналізі пошкоджуваності такого обладнання потрібно використовувати максимальний параметр HCLPF з рекомендованих дослідниками узагальнених значень граничної сейсмостійкості для групи однотипного обладнання:

$$HCLPF = \max[HCLPF_{GIP}; HCLPF_{EPRI}]. \quad (7)$$

Утім зауважимо, що рекомендовані науковцями EPRI репрезентативні значення параметрів пошкоджуваності обладнання апроксимовані відносно рівня поверхні ґрунту і потребують коригування щодо висоти розміщення цього обладнання на АЕС (див. примітку до Таблиці Н-2 документа [8]). Відповідно до положень стандарту [4] основою такого коригування для енергоблоків АЕС України є використання специфічних для енергоблока поверхових спектрів відгуку (Floor Response Spectrum – FRS). Коефіцієнт висотної корекції $k(z)$ визначається як мінімальне по всьому діапазону частот f відношення значень прискорень на відмітці 0,000 м і відмітці розташування цього обладнання, які опи-

нують по трьох просторових напрямках відповідні FRS, розраховані для демпфірування 5 %:

$$k(z) = \min_f \frac{FRS(0)}{FRS(z)}. \quad (8)$$

Для прикладу на рисунку 8 продемонстровано визначення коефіцієнта висотної корекції $k(z)$ для обладнання, розташованого на відмітці +16,800 м прибудови електротехнічних пристроїв головного корпусу енергоблока № 1 ВП ЗАЕС, на основі FRS напрямків Ax, Ay, Az з демпфуванням 5 %, що наведені в документі [17].

Тоді, з урахуванням висотної корекції за формулою (8), остаточний критерій вибору параметра HCLPF (7) для подальшого використання в аналізі пошкоджуваності для СІАБ матиме вигляд:

$$HCLPF = \max[HCLPF_{GIP}; HCLPF_{EPRI} \cdot k(z)]. \quad (9)$$

Варто пам'ятати, що критерій (9) застосовується лише для обладнання, сейсмостійкість якого була встановлена методом «непрямой» оцінки (зокрема за процедурою GIP). Якщо сейсмостійкість КСЕ було підтверджено за результатами випробувань, розрахункового аналізу чи за даними технічної документації виробника, в подальшому під час СІАБ використовуються безпосередньо ці результати, оскільки вони є специфічними для енергоблоків АЕС.

Процедура виконання робіт з аналізу пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС України

Наведені в документах [2], [4] і [8] положення загальної теорії сейсмічної пошкоджуваності та описані вище особливості практичного застосування

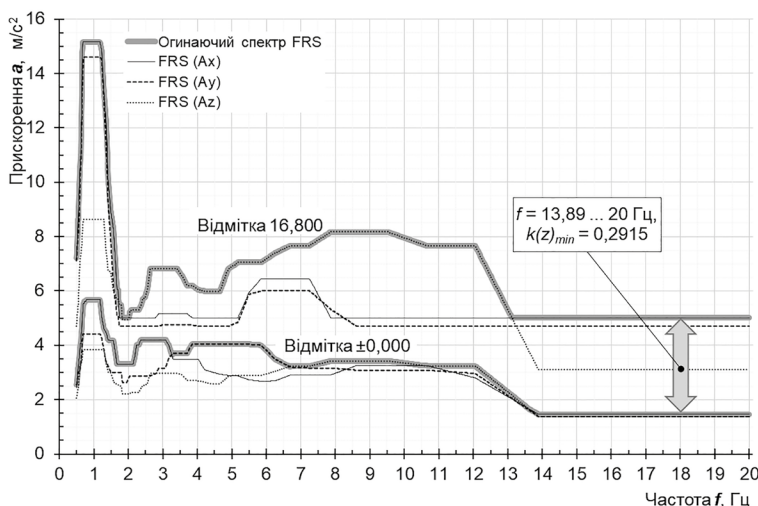


Рисунок 8 – Коефіцієнт висотної корекції $k(z)$ для відмітки +16,800 м прибудови електротехнічних пристроїв головного корпусу енергоблока № 1 ВП ЗАЕС

комбінованого методу були використані для побудови деталізованої розрахункової моделі пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС України від СВ.

Процедура підготовки і вибору вихідних даних для аналізу пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС наведена на рисунку 9. Процедура виконання аналізу пошкоджуваності з використанням по-

передньо сформованих вихідних даних наведена на рисунку 10. Розрахунок та графічне зображення результатів у вигляді сімейства кривих пошкоджуваності із різною довірчою ймовірністю та усередненої кривої пошкоджуваності обраного обладнання проводиться за допомогою вбудованих функцій MS «Excel».

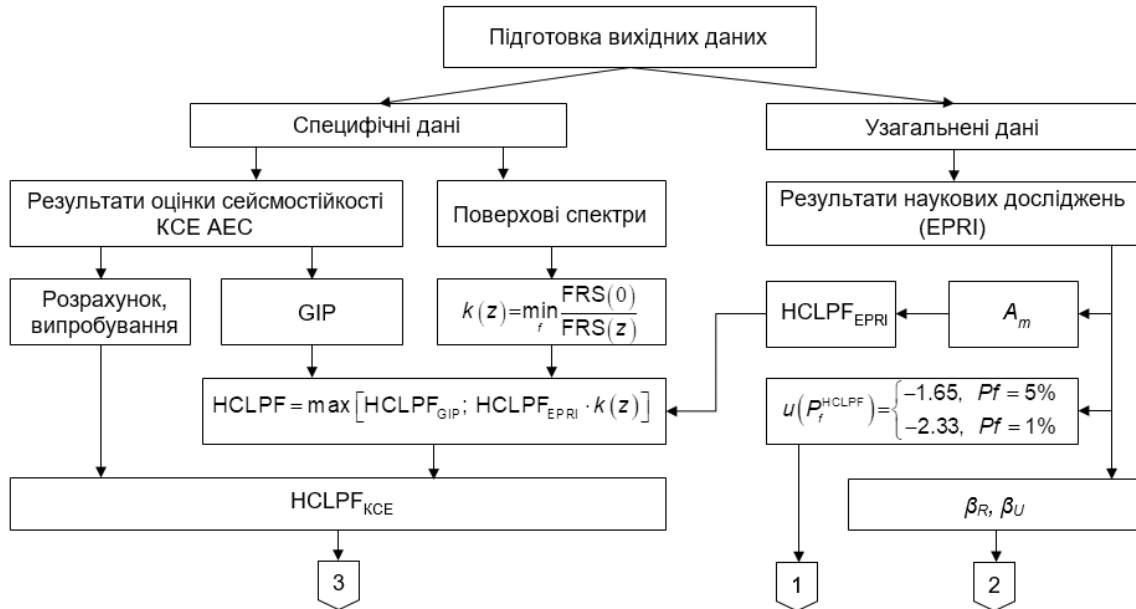


Рисунок 9 – Процедура підготовки вихідних даних для виконання аналізу пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС України

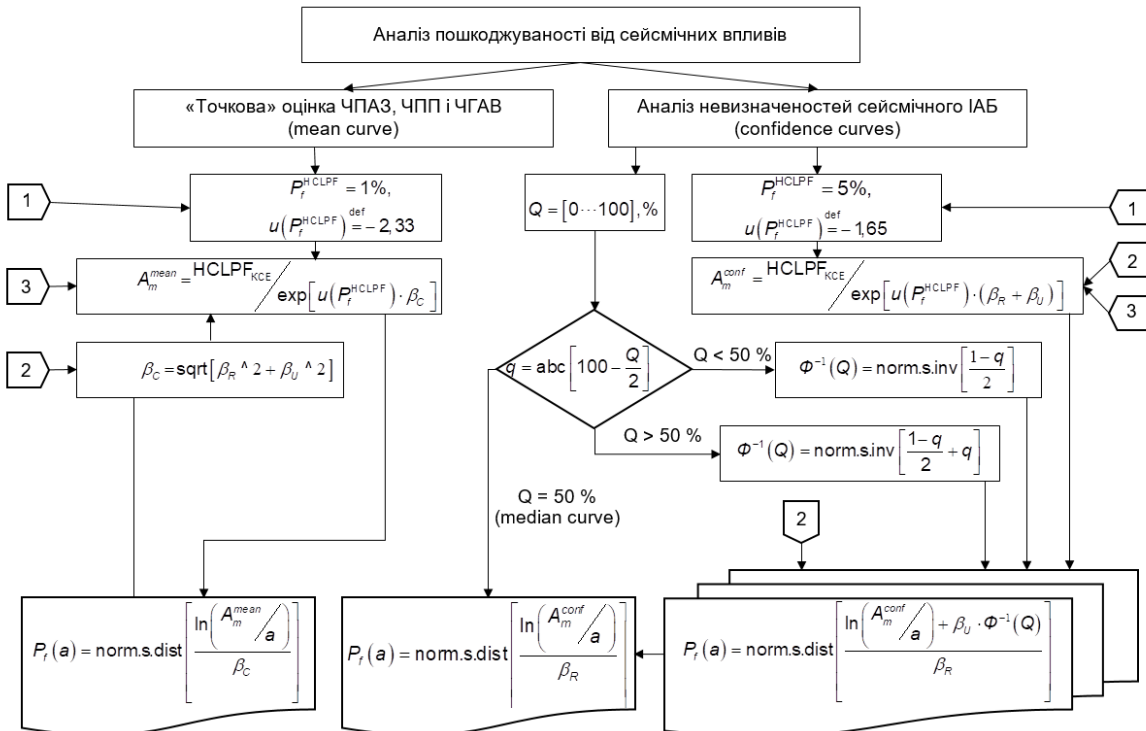


Рисунок 10 – Процедура виконання аналізу пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС України з використанням специфічних і узагальнених вихідних даних

Розроблена за наведеними на рисунках 9, 10 процедурами розрахункова модель використовується в Держаному підприємстві «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ) під час проведення державних експертиз ЯРБ матеріалів СІАБ енергоблоків АЕС України з метою перевірки коректності застосованих підходів і результатів розрахунків умовної імовірності відмови (пошкоджуваності) КСЕ із заданою забезпеченістю в усьому діапазоні інтенсивності СВ на визначеному майданчику АЕС.

Висновки

Аналіз пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС проводиться з метою формування вихідних даних для розробки СІАБ. В Україні згідно з положеннями документів [4], [7] аналіз пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС має виконуватися з використанням комбінованого методу, який передбачає поєднання детерміністичного і ймовірнісного підходів. У статті описані основні аспекти, необхідні для коректного проведення практичних розрахунків параметрів пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС за підходами, визначеними документами [4], [7].

Детально розглянуто питання розрахунку й подальшого використання в СІАБ усередненої кривої пошкоджуваності, виконано обґрунтування можливості використання для аналізу пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС України значень відхилень β_R і β_U , отриманих за результатами вже виконаних робіт з оцінки СВ інших АЕС. Деталізовано підходи до визначення A_m за консервативними узагальненими значеннями NCLPF обладнання енергоблоків АЕС, сейсмостійкість якого підтверджено «непрямими» методами.

Також наведено інформацію щодо розрахункової моделі пошкоджуваності КСЕ енергоблоків АЕС, побудованої з урахуванням зазначених у [2], [4], [8] положень загальної теорії сейсмічної пошкоджуваності та описаних у статті особливостей практичного застосування комбінованого методу аналізу пошкоджуваності. Ця модель використовується в ДНТЦ ЯРБ під час проведення державних експертиз ЯРБ матеріалів експлуатуючої організації щодо СІАБ енергоблоків АЕС України.

Список використаної літератури

1. НП 306.2.162-2010. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2010. 12 с.
2. Probabilistic safety assessment for seismic events. IAEA Tecdoc-1937. Vienna: IAEA, 2020. 106 p.

3. Сахно О.В., Рижов Д.І., Шугайло О-р П., Павлів Є.А., Хамровська Л.В. Впровадження в Україні сучасних підходів до оцінки пошкоджуваності елементів енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 2(94). С. 17-25. doi: 10.32918/nrs.2022.2(94).02.

4. СОУ НАЕК 198:2020. Інженерна, наукова та технічна підтримка. Технічне керівництво з виконання сейсмічного ІАБ. Загальні положення. К.: ДП НАЕК «Енергоатом», 2020. 74 с.

5. Probabilistic safety assessment for seismic events. IAEA-Tecdoc-724. Vienna: IAEA, 1993. 51 p.

6. Advanced nuclear plant design options to cope with external events. IAEA Tecdoc-1487. Vienna: IAEA, 2006. 232 p.

7. Концепция выполнения вероятностной оценки частоты повреждения активной зоны и частоты предельного аварийного выброса от сейсмического воздействия для энергоблоков АЭС Украины. К.: ГП «НАЭК «Энергоатом», 2011. 20 с.

8. Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide (EPRI Report 3002000709) : Final Report. Palo Alto, CA : Electric Power Research Institute, 2013. 448 p.

9. Seismic Fragility Applications Guide Update (EPRI Report 1019200) : Final Report. Palo Alto, CA : Electric Power Research Institute, 2009. 96 p.

10. Methodologies for Seismic Safety Evaluation of Existing Nuclear Installations. IAEA Safety Report Series No. 103. Vienna: IAEA, 2020. 117 p.

11. Kennedy R. P. Overview of Methods for Seismic PRA and Margins Analysis Including Recent Innovations. *Proceedings of OECD-NEA Workshop on Seismic Risk*, Tokyo, Japan, 10-12 August, 1999.

12. Methodology for Developing Seismic Fragilities (EPRI Report 103959) : Final Report. Palo Alto, CA : Electric Power Research Institute, 1994. 320 p.

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

14. Оцінка сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : Монографія / Д. Рижов, О-р Шугайло, О. Сахно та ін.; ред. Д. Рижов. К.: ДНТЦ ЯРБ, 2022. 114 с.

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

16. Generic Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment, SQUG [Seismic Qualification Utility Group]. Revision 2A, 1992.

17. 75.120-10.03.03-05-14-ПР Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Построение комплекса поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений зданий и сооружений энергоблоков №№ 1, 2 ОП «Запорожская АЭС» от обобщенного сейсмического воздействия вероятностного и детерминистического методов. Книга 3.1. Результаты расчета поэтажных спектров реакции сооружений ГК-1,2. ВП «Запорізьська АЕС», ДП «НАЭК «Енергоатом», 2015. 156 с.

References

1. 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.
2. IAEA Tecdoc-1937. (2020). Probabilistic safety assessment for seismic events. IAEA Technical Report Series. IAEA, Vienna.
3. Sakhno, O., Ryzhov, D., Shugaylo, O-r, Pavliv, Ie., Hamrovska, L. (2022). Implementation of state-of-the-art approaches to assessing the seismic damageability of NPP components in Ukraine. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(94), 17-25. doi: 10.32918/nrs.2022.2(94).02.
4. SOU NAEK 198:2020. Engineering, scientific and technical support. Technical guidance for performing seismic PSA. General requirements, Kyiv, NNEGC "Energoatom".
5. IAEA-Tecdoc-724. (1993). Probabilistic safety assessment for seismic events. IAEA Technical Report Series. IAEA, Vienna.
6. IAEA Tecdoc-1487. (2006). Advanced nuclear plant design options to cope with external events. IAEA Technical Report Series. IAEA, Vienna.
7. The concept for probabilistic assessment of core damage frequency caused by seismic impacts for Ukrainian NPPs, Kyiv, NNEGC "Energoatom".
8. EPRI Report 3002000709. (2013). Seismic probabilistic risk assessment implementation guide. Electric Power Research Institute Final Report. Palo Alto, CA.
9. EPRI Report 1019200. (2009). Seismic fragility applications guide update. Electric Power Research Institute Final Report. Palo Alto, CA.
10. IAEA SRS No. 103. (2020). Methodologies for seismic safety evaluation of existing nuclear installations. IAEA Safety Report Series. IAEA, Vienna.
11. Kennedy R.P. Overview of methods for seismic PRA and margins analysis including recent innovations. *Proceedings of OECD/NEA Workshop on Seismic Risk*, 10-12 August, 1999, Tokyo, Japan.
12. EPRI Report 103959. (1994). Methodology for developing seismic fragilities. Electric Power Research Institute Final Report. Palo Alto, CA.
13. Methodology of seismic resistance calculated analysis for components of operating NPPs in frames of seismic margin assessment method. MT-T.0.03.326-13, Revision 3, approved by SNRIU letter No. 15-33/1-6126 of 4 October 2017.
14. Ryzhov, D., Shugaylo, O-r, Sakhno, O., et al. (2022). Assessment of seismic safety of power units of nuclear power plants. Monograph, Kyiv, SSTC NRS, 114 p.
15. DITI 300/376-RU/R.2. Methodology of seismic assessment for qualification of equipment for seismic impacts. (2009). UJV Rez.
16. Generic implementation procedure (GIP) for seismic verification of nuclear power plant equipment, SQUG [Seismic Qualification Utility Group]. Revision 2A, 1992.
17. 75.120-10.03.03-05-14-PR. Technical report. Ensuring the seismic resistance of elements, systems and structures

important to safety. Construction of a complex of floor response spectra and maximum accelerations of buildings and structures of Zaporizhzhya NPP Units No. 1, 2 from the generalized seismic impact of probabilistic and deterministic methods. Book 3.1. Calculation results of floor response spectra of structures GK-1,2. (2015). Zaporizhzhya NPP, NNEGC "Energoatom".

Aspects of Forming the Initial Parameters for the Fragility Analysis of Components and Structures of Ukrainian NPP Units due to Seismic Impacts

O. Sakhno¹, D. Ryzhov¹, O-r Shugaylo¹, Ie. Pavliv¹, L. Hamrovska¹, A. Postoy¹, V. Gavrik²

¹ State enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety", Kyiv, Ukraine

² Rivne NPP, National Nuclear Energy Generating Company "Energoatom", Varash, Ukraine

The article provides information on the approaches adopted in Ukraine to the fragility analysis for components and structures of NPP units due to seismic impacts. It was shown that the correctness and conservatism degree of the obtained analysis results is determined by the initial parameters of uncertainty and boundary seismic resistance. The analysis of the approaches to the preparation procedure of these parameters was performed. The main aspects that should be taken into account in the calculation of the fragility parameters for components and structures of NPP units were indicated.

The article considers the peculiarities of selecting the values for logarithmic deviations and non-calculation boundary seismic resistance of components and structures to construct the fragility curve families, select certain curves from such a family for further use in the probabilistic safety analysis of NPP units for seismic impacts. At the same time, taking into account the mentioned aspects, the article presents a detailed procedure for preparing initial data and performing the fragility analysis.

Keywords: nuclear power plant, probabilistic safety analysis, seismic impact, conditional probability of failure, fragility curve, median ground acceleration, boundary seismic resistance.

Отримано 18.10.2022