

УДК 621.039.58:699.841

Д. І. Рижов, О-й П. Шугайло, О-р П. Шугайло,
Р. Я. Буряк, Л. В. Хамровська, Н. І. Крицька

Державний науково-технічний центр
з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

Огляд сучасних міжнародних підходів до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної небезпеки енергоблоків АЕС

З урахуванням уроків аварії на АЕС «Фукусіма-1» в Японії, розглянуто сучасні міжнародні підходи та вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної небезпеки енергоблоків АЕС для використання в процесі перегляду чинних в Україні норм та правил щодо сейсмостійкості енергоблоків АЕС.

Ключові слова: АЕС, землетрус, сейсмостійкість, конструкції, системи, елементи.

Д. И. Рыжов, А-й П. Шугайло, А-р П. Шугайло, Р. Я. Буряк,
Л. В. Хамровская, Н. И. Крицкая

Обзор современных международных подходов к сейсмостойкому проектированию и оценке сейсмической опасности энергоблоков АЭС

С учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии, рассмотрены современные международные подходы и требования к сейсмостойкому проектированию и оценке сейсмической опасности энергоблоков АЭС для использования при пересмотре действующих в Украине норм и правил по сейсмостойкости энергоблоков АЭС.

Ключевые слова: АЭС, землетрясение, сейсмостойкость, конструкции, системы, элементы.

© Д. І. Рижов, О-й П. Шугайло, О-р П. Шугайло, Р. Я. Буряк,
Л. В. Хамровська, Н. І. Крицька, 2012

Внаслідок землетрусу та спричиненого ним цунамі 11 березня 2011 р. на АЕС «Фукусіма-1» у Японії сталася важка аварія. Ці події поставили перед ядерним співтовариством завдання з виконання детального аналізу причин і вивчення уроків аварії, розробки й реалізації заходів щодо запобігання виникненню важких аварій або, у разі виникнення, пом'якшення негативного впливу їх на населення та довкілля. 25 березня 2011 р. Рада Європейського Союзу зробила заяву про необхідність переоцінки безпеки європейських АЕС на підставі всебічної, відкритої оцінки ризику («стрес-тести»). Питання підвищення безпеки АЕС України, у контексті аварії на АЕС «Фукусіма-1», було розглянуто на засіданні Ради національної безпеки і оборони України 8 квітня 2011 р. Рішення РНБО України підкреслило необхідність проведення поглибленої позачергової переоцінки стану безпеки енергоблоків АЕС України, зокрема перевірки їхньої сейсмостійкості.

Ключовим питанням виконання «стрес-тестів» була переоцінка сейсмостійкості АЕС України з урахуванням сучасних міжнародних вимог. У першу чергу, використовувалися вимоги й рекомендації МАГАТЕ, ENSREG (Об'єднання європейських атомних регуляторів), Комісії ядерного регулювання США (US NRC) та інших міжнародних організацій, оскільки єдиний чинний в Україні документ, що містить вимоги до сейсмостійкості АЕС (ПНАЭ Г-5-006-87) [1], не переглядався з моменту його видання (грудень 1987 р.) і на поточний час не враховує сучасного рівня знань, набутого досвіду та міжнародної практики. Держатомрегулюванням України ухвалено рішення про перегляд ПНАЭ Г-5-006-87, відповідальною організацією за розробку вимог до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків АЕС України призначений Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ).

У серпні 2011 р. в офісі МАГАТЕ (м. Відень, Австрія) відбулася технічна нарада з перегляду Керівництва МАГАТЕ з безпеки NS-G-1.6 [2]. Основною метою перегляду цього документа є аналіз та врахування нових рекомендацій щодо сейсмічного проектування та кваліфікації конструкцій, систем й елементів (далі — КСЕ) АЕС з використанням набутого досвіду їх експлуатації, сучасних підходів до сейсмічного аналізу, а також врахування уроків щодо впливів та наслідків потужних землетрусів на ядерні об'єкти (передусім — в Японії на АЕС «Кашивазакі-Каріва» та «Фукусіма-1»). У цій нараді брали участь фахівці ДНТЦ ЯРБ; з урахуванням результатів обговорення проблемних питань формувалися підходи до розробки національних вимог до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків АЕС України.

Уроки впливів потужних землетрусів на ядерні об'єкти. Рівень впливу потужних землетрусів на деяких енергоблоках АЕС «Фукусіма-1» від 11 березня 2011 р. (табл. 1) та всіх енергоблока АЕС «Кашивазакі-Каріва» від 16 липня 2007 р. перевищив проектний. За результатами аналізу, існує необхідність:

ретельно проаналізувати й врахувати вторинні ефекти впливів землетрусів на ядерні установки (ЯУ) та розробити детальні заходи зі швидкого реагування на події після землетрусу (зокрема врахувати можливі розриви заглиблених у ґрунт пожежних трубопроводів, як це сталося на АЕС «Кашивазакі-Каріва», що збільшило час ліквідації пожежі в трансформаторному відсіку блока 3; врахувати можливість виплескування забрудненої води з басейнів витримки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) за значних коливань);

передбачити мобільні установки пожежогасіння та подачі електроенергії;

у процесі проектування та сейсмічної кваліфікації КСЕ враховувати ефекти старіння КСЕ;

ретельно переглянути проектні основи АЕС, що розташовані на узбережжях морів, водоймищ і для яких існує ймовірність затоплення; планувати та проектувати запобіжні заходи (водозахисні конструкції, відкачку води з майданчика, водоізоляцію особливо важливих кабельних каналів, електричних панелей, дизельних генераторів тощо).

Зазначимо, що всі енергоблоки АЕС «Фукусіма-1» були переведені в стан безпечного останову після землетрусів, а аварійні наслідки були спричинені саме ударом цунамі.

Таблиця 1. Порівняння максимальних прискорень, зафіксованих на рівні фундаментів реакторних відділень енергоблоків АЕС «Фукусіма-1» внаслідок впливу землетрусу 11.03.11, з розрахованими проектними значеннями [3]

Енергоблок АЕС «Фукусіма-1»	Максимальне прискорення ґрунту внаслідок землетрусу 11.03.11 (см/с ²)		
	горизонтальне		вертикальне
	півн.-півд.	сх.-зах.	
1	460 (487)	447 (489)	258 (412)
2	348 (441)	550 (438)	302 (420)
3	322 (449)	507 (441)	231 (429)
4	281(447)	319 (445)	200 (422)
5	311 (452)	548 (452)	256 (427)
6	298 (445)	444 (448)	244 (415)

Примітка. В дужках наведені значення врахованих у проекті прискорень.

Встановлення сейсмічних запасів під час проектування. Як свідчать події на АЕС «Фукусіма-1» та «Кашивазакі-Каріва», реальні впливи землетрусів на АЕС можуть переважати впливи прийняті за результатами геолого-тектонічних та сейсмологічних вишукувань майданчиків у період їх проектування. У зв'язку з цим постає питання встановлення сейсмічного запасу до визначених за результатами вишукувань сейсмічних характеристик майданчика (перш за все це стосується значення пікового прискорення ґрунту під час землетрусу, з яким асоціюються інші характеристики сейсмічних впливів, що використовуються при проектуванні енергоблоків: акселерограми, спектри впливів, спектри відгуків).

Щоб визначити цей запас, сформуємо такі пропозиції:

впровадити коефіцієнт безпеки, який застосовуватиметься до визначеного землетрусу проектного рівня, наприклад у межах $1,5 \div 2,0$ (проте це питання потребує ретельного аналізу та обґрунтувань)*;

розглядати землетрус з меншою ймовірністю виникнення (наприклад, якщо за національними нормами рівень МРЗ встановлюється для ймовірності його виникнення 10^{-4} 1/рік, то для визначення запасу розглядати землетрус з ймовірністю виникнення 10^{-5} 1/рік);

* На даний час, згідно з [4], для елементів нових АЕС, критичних для забезпечення безпеки АЕС, запас має дорівнювати 40 % визначеного для майданчика АЕС рівня горизонтальної складової максимального розрахункового землетрусу (МРЗ). У США, згідно з даними [5], для нових АЕС максимальні прискорення на ґрунті для землетрусу SSE (Safe Shutdown Earthquake, що відповідає МРЗ) збільшуються в 1,67 раза.

встановити інші критерії прийнятності результатів порівняно з вимогами до КСЕ щодо опору землетрусу проектного рівня (наприклад, допускаються певні пластичні деформації КСЕ під час землетрусу за умови недопущення «порогових» ефектів (cliff-edge effects)).**

Врахування взаємодії «ґрунт — конструкція». Врахування ефекту взаємодії «ґрунт — конструкція» актуальне для майданчиків з низькою швидкістю поширення зсувної хвилі основи безпосередньо під фундаментом конструкції $V_s < 1100$ м/с (чим жорсткіша основа, тим більше для неї значення V_s). Це притаманно всім майданчикам АЕС України, тому врахування вказаної взаємодії є конче актуальним у процесі переоцінки сейсмостійкості українських АЕС.

Сейсмічна ізоляція конструкцій, систем та елементів. Завдяки засобам сейсмічної ізоляції КСЕ, зокрема фундаментів споруд АЕС, для майданчиків з високим рівнем сейсмічної небезпеки можна суттєво знизити рівні впливів потужних землетрусів на конструкції. Тому слід проаналізувати:

проектні основи сейсмостійкості конструкцій, оснащених системами сейсмічної ізоляції;

відмінності в урахуванні ефекту «ґрунт — конструкція» (нелінійна поведінка, інший ефект поширення сейсмічних хвиль);

особливості встановлення сейсмічних запасів;

інтерфейс між оснащеними та не оснащеними системами сейсмічної ізоляції частинами АЕС, зокрема щодо проектування спільних систем (кабелів, трубопроводів тощо); ефекти старіння систем ізоляції;

потреби в додаткових засобах ізоляції найкритичніших компонентів (перш за все електричних) від вертикальних впливів, оскільки системи ізоляції фундаментів не здатні зменшити вплив на конструкції вертикальної складової землетрусу.

Сейсмічна кваліфікація конструкцій, систем та елементів. Кваліфікація КСЕ загальнопоширеними методами аналізу, випробувань (прямі методи) та досвіду експлуатації (непрямий метод) на встановлений рівень сейсмічних впливів (кваліфікаційних вимог) необхідна для всіх елементів АЕС, що виконують критичні функції безпеки, а саме:

безпечне зупинення реактора та підтримання його в безпечному стані протягом необхідного часу;

відведення тепла від активної зони та басейну витримки;

запобігання виходу радіоактивних речовин у довкілля.

На даний час сейсмічна кваліфікація КСЕ виконується для всіх енергоблоків АЕС України.

Сейсмічний аналіз спеціальних конструкцій. Такі конструкції, як резервуари з рідиною, басейни витримки ВЯП, підземні конструкції потребують урахування додаткових ефектів, спричинених землетрусом: гідродинамічних ефектів від коливання та розплюскування рідини, додаткового навантаження від ґрунту, врахування стабільності ґрунту тощо.

Сучасні методи оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків АЕС, що експлуатуються. Згідно з розділом 5 нещодавно введеного в дію Керівництва МАГАТЕ з безпеки NS-G-2.13 [5], у сучасній світовій практиці існує два основні підходи до оцінки або переоцінки сейсмічної безпеки енергоблоків

** «Пороговий» ефект (cliff-edge effect) — подія, що виходить за рамки проекту й здатна перетворити потенційно незначні відхилення параметрів станції на серйозну аварійну подію.

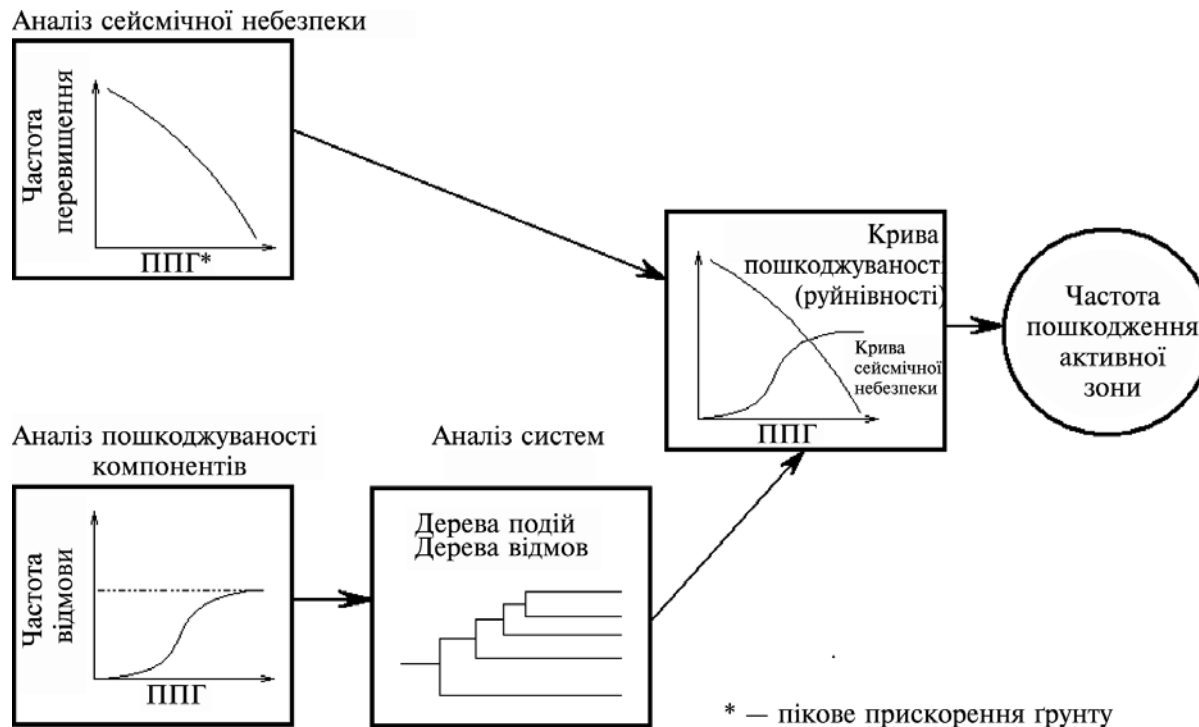


Рис. 1. Основні етапи сейсмічного ІАБ

АЕС, що експлуатуються: імовірнісний (сейсмічний ІАБ) та детерміністичний (оцінка граничної сейсмостійкості).

Сейсмічний ІАБ. Оцінка сейсмічної безпеки АЕС за допомогою імовірнісного методу полягає у виконанні таких основних етапів (рис. 1):

1. Аналіз ризиків (Hazard Analysis). Полягає у визначенні імовірності виникнення сейсмічних коливань ґрунту на обраному майданчику АЕС. Кінцевою метою вказаного етапу має бути оцінка сейсмічного ризику майданчика.

2. Визначення спектрів відгуку конструкцій на сейсмічні впливи різної інтенсивності для виконання аналізу відмов елементів.

3. Аналіз систем (Systems Analysis). Полягає в ідентифікації систем безпеки, необхідних для попередження пошкодження активної зони реактора.

4. Проведення інспекцій (сейсмічних обходів АЕС). Є ключовим моментом у сейсмічній оцінці (переоцінці) існуючих АЕС з використанням як методу ІАБ, так і методу граничної сейсмостійкості. Інспекції сфокусовані на таких основних аспектах [6]:

- характеристики КСЕ та їх сейсмічна адекватність;
- анкерування (кріплення) елементів;
- передавання навантажень від анкерів (місць кріплення) на елементи;
- можливі взаємодії між елементами під час землетрусу.

5. Аналіз «руйнівності» (Fragility Analysis). Полягає у визначенні імовірності відмови елементів, важливих для безпеки, як функції залежності від коливань ґрунту. Результатом аналізу сейсмічних ризиків є криві руйнівності, що відображають залежність імовірності відмови елемента від потужності землетрусу, вираженої в значеннях пікового прискорення ґрунту (Peak Ground Acceleration — PGA).

6. Інтеграція інформації щодо сейсмічних впливів, руйнівності елементів АЕС та інформації про системи для подальшого розрахунку сумарної частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ).

Оцінка граничної сейсмостійкості. Основною метою оцінки граничної сейсмостійкості (Seismic Margin Assessment — SMA) є демонстрація того, що АЕС здатна витримати сейсмічний вплив, який перевищує проектне значення, а також виявити «слабкі місця», які уможливають обмеження безпечного останову АЕС у разі перевищення проектного землетрусу. Оцінка граничної сейсмостійкості базується на визначенні рівня землетрусу, нижче за який пошкодження активної зони є малоімовірним. Такий рівень землетрусу визначає здатність АЕС відповідати високому ступеню достовірності низької імовірності відмови (High Confidence, Low Probability of Failure — HCLPF). Це значення є числовою мірою здатності елементів та конструкцій протистояти землетрусу (витримувати землетрус) вище проектного. Якщо результати сейсмічних досліджень майданчика доступні, оцінку сейсмічного внеску в ЧПАЗ реактор можна легко розрахувати із здатності до HCLPF.

Із імовірнісної точки зору здатність АЕС до HCLPF визначається, як 95 % достовірність того, що виникнення відмови становить менше 5 %. Концепція методу SMA графічно наведена на рис. 2.

Оцінка сейсмічної безпеки АЕС за допомогою методу SMA [8] полягає у виконанні таких основних етапів:

1. Визначення оцінюваного рівня землетрусу (Review Level of Earthquake — RLE), який зазвичай перевищує максимальний розрахунковий землетрус (MPЗ). Згідно з [7], вибраний RLE повинен мати такий максимальний рівень коливань ґрунту, який відповідає дуже низькій імовірності його виникнення протягом проектного строку експлуатації АЕС і буде використаний для оцінки сейсмічної безпеки.

2. Визначення КСЕ, що підлягатимуть сейсмічній оцінці.

3. Розрахунок спектрів відгуку конструкцій для визначеного RLE.

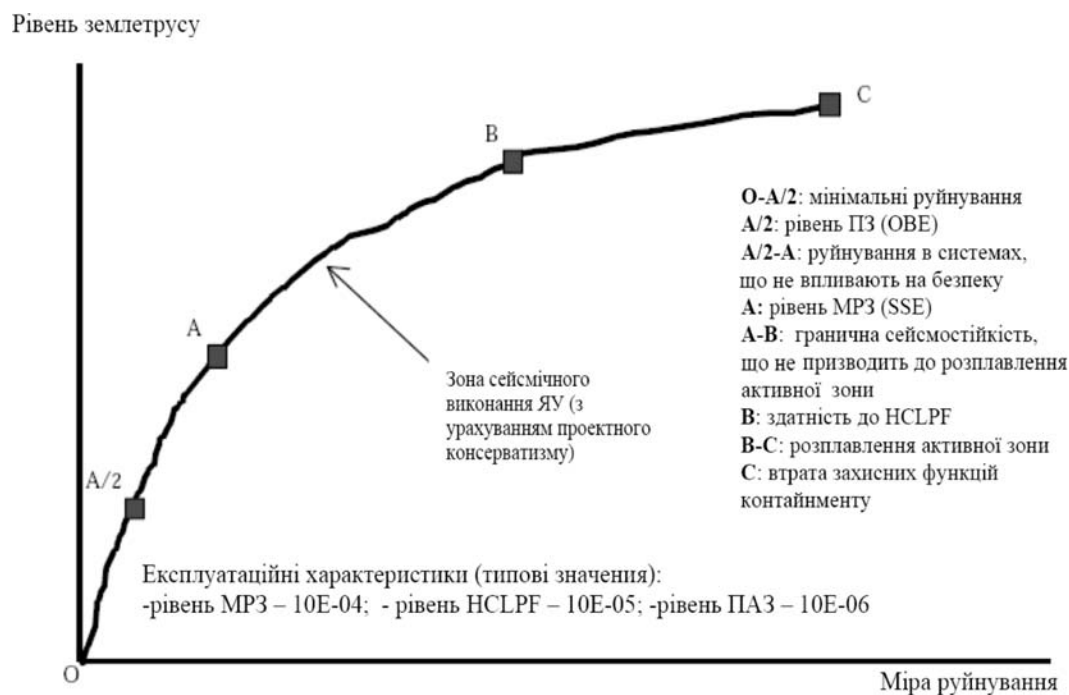


Рис. 2. Концепція оцінки граничної сейсмостійкості АЕС

4. Проведення інспекцій (сейсмічних обходів АЕС).
5. Визначення граничної сейсмостійкості (сейсмічного запасу) конструкцій, систем та елементів і загального сейсмічного запасу АЕС.

Висновки

Сумні події на АЕС «Фукусіма-1» в Японії підштовхнули усе світове ядерне товариство до детального аналізу причин цієї аварії, а також до розробки та впровадження заходів, спрямованих на недопущення в майбутньому повторення аналогічних ситуацій та їх негативного впливу на населення та довкілля. Україна приєдналася до рішення Ради Європейського Союзу та поряд з іншими країнами зробила позачергову переоцінку безпеки АЕС на підставі всебічної, відкритої оцінки ризику («стрес-тести»). За результатами цієї переоцінки зроблено висновок про нагальну та термінову необхідність розробки національних вимог до сейсмостійкого проектування атомних станцій з урахуванням усіх новітніх знань та сучасних досягнень науки і техніки щодо забезпечення сейсмічної безпеки ядерних установок. Розглянуті в цій роботі сучасні міжнародні підходи до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної небезпеки енергоблоків АЕС будуть враховані під час підготовки національного нормативного документа з сейсмостійкого проектування атомних електростанцій.

Список використаної літератури

1. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. — Утверждены ГАЭН СССР. — 1987.
2. Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных станций. Руководство по безопасности МАГАТЭ № NS-G-1.6. — Вена, 2008.
3. Convention on Nuclear Safety. National Report of Japan for the Second Extraordinary Meeting, July, 2012.
4. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, 2001.
5. DC/COL-ISG-020. Interim Staff Guidance on Implementation of a Probabilistic Risk Assessment-Based Seismic Margin Analysis for New Reactors
6. Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations. IAEA Safety Guide No. NS-G-2.13, Vienna, 2009.
7. Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants, IAEA Safety Reports Series No. 28, Vienna, 2003.
8. Современные подходы к оценке/переоценке сейсмостойкости АЭС, находящихся в эксплуатации / А-й П. Шугайло, Д. И. Рыжов, А-р П. Шугайло, Н. Г. Леткова // Будівельні конструкції. — 2008. — Вип. 69. — С. 133–142.

Отримано 18.07.2012.