

Підгаєцький Тарас Васильович, аспірант, +38(067)518-92-26,
tv_pidhaietskyi@sstc.ua, ORCID ID: 0000-0002-4125-4846

*Інститут загальної енергетики НАН України
вул. Антоновича, буд.172, м. Київ, Україна*

Білан Тетяна Романівна, к. т. н., +38(096)5531370, tr_bilan@sstc.ua, ORCID ID:
0000-0002-0280-6716

*Інститут загальної енергетики НАН України
вул. Антоновича, буд.172, м. Київ, Україна*

НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ АЕС УКРАЇНИ В УМОВАХ ЕКСТРИМАЛЬНИХ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

Анотація. Стаття присвячена аналізу надійності електрогенерації атомних електростанцій України в умовах екстремальних зовнішніх природних впливів, зокрема сейсмічних подій. Розглянуто актуальну проблему нормативного та технічного забезпечення підтвердження стійкості обладнання другої категорії сейсмостійкості та виявлено прогалини у вимогах щодо державного нормування. Також розглянуто проблему потенційних тривалих простоїв енергоблоків АЕС унаслідок пошкодження обладнання з великими масово-габаритними показниками, що призводить до значного недовироблення електроенергії та створює ризики для енергетичної безпеки держави. Запропоновано підхід до ідентифікації найбільш вразливого обладнання, оцінки його сейсмостійкості та впровадження компенсуючих заходів для підвищення загальної стійкості електрогенерації.

Ключові слова: надійність електрогенерації, атомна електростанція, сейсмостійкість, енергетична безпека, екстремальні зовнішні впливи

Pidhaietskyi Taras, Postgraduate Student, +38(067)518-92-26,
tv_pidhaietskyi@sstc.ua, ORCID ID: 0000-0002-4125-4846

*Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
172, Antonovycha Street, Kyiv, Ukraine*

Bilan Tetiana, Ph.D., +38(096)5531370, tr_bilan@sstc.ua, ORCID ID: 0000-0002-
0280-6716

*Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
172, Antonovycha Street, Kyiv, Ukraine*

RELIABILITY OF ELECTRICITY GENERATION AT UKRAINIAN NPPS UNDER CONDITIONS OF EXTREME NATURAL EXTERNAL HAZARDS

Abstract. The article is devoted to the analysis of the reliability of electricity generation at Ukrainian nuclear power plants under extreme external natural hazards, particularly seismic events. It addresses the urgent issue of regulatory and technical provisions for confirming the seismic resistance of equipment belonging to the second seismic category and identifies gaps in the requirements for state oversight. The study also examines the problem of potential long-term reactor unit outages caused by

damage to equipment with large mass-dimensional parameters, which leads to significant underproduction of electricity and poses risks to the country's energy security. An approach is proposed for identifying the most vulnerable equipment, assessing its seismic resistance, and implementing compensatory measures to enhance the overall resilience of electricity generation.

Keywords: *reliability of electricity generation, nuclear power plant, seismic resistance, energy security, extreme external hazards*

Вступ. Атомна енергетика займає провідне місце в енергетичному балансі України та є ключовим елементом її енергетичної та економічної безпеки. Протягом останніх п'яти років до початку повномасштабного вторгнення частка електроенергії, виробленої атомними електростанціями (АЕС), стабільно перевищувала 50 %, а в окремі періоди досягала і 65 % [1]. Значне руйнування потужностей теплових електростанцій, спричинене військовими діями, робить АЕС основними виробниками електроенергії в країні, без яких неможливе стабільне функціонування об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України.

Можливість електрогенерації на АЕС визначається не лише станом і працездатністю ядерних реакторів та систем безпеки, а й широким комплексом допоміжного обладнання, яке забезпечує виробництво електроенергії. Втрата працездатності навіть одного критичного елемента, наприклад внаслідок зовнішніх впливів, може призвести до зупинки енергоблока та, як наслідок, до значного недовироблення електроенергії.

Серед екстремальних зовнішніх впливів природного характеру особливу небезпеку становлять сейсмічні події. Досвід світової ядерної енергетики показує, що наслідки землетрусів можуть бути критичними не лише через потенційні пошкодження реакторних установок, але й через тривалі простоя обладнання, необхідного для відновлення генерації, навіть якщо це обладнання не відноситься до категорії «важливого для безпеки», але є критично важливим для підтримання електрогенерації.

Особливу актуальність проблема підтвердження сейсмостійкості обладнання другої категорії на енергоблоках АЕС України набуває з огляду на зміну сейсмічних характеристик, які були зафіксовані за результатами сейсмічного дообстеження майданчиків АЕС. В таких випадках міжнародна

практика, а також норми та правила з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) України передбачають переоцінку сейсмостійкості всіх ключових елементів енергоблока, включаючи обладнання, що формально не належить до систем важливих для безпеки, але є важливим для безперервної електрогенерації.

Таким чином, розгляд цієї проблеми також є важливим як з точки зору забезпечення стабільної роботи ОЕС України, так і у контексті виконання міжнародних зобов'язань щодо ядерної та радіаційної безпеки.

Постановка проблеми. В Україні чинна нормативно-правова база у сфері ядерної та радіаційної безпеки встановлює вимоги до стійкості обладнання атомних електростанцій до сейсмічних впливів, проте ці вимоги мають суттєві обмеження у частині нагляду. НП 306.2.208-2016 [2] визначає три категорії сейсмостійкості обладнання, з яких друга категорія охоплює, зокрема, елементи, що не відносяться до систем, важливих для безпеки (клас 4 відповідно до НП 306.2.245-2024 [3]), але мають забезпечувати безперервність електрогенерації. До такого обладнання можуть бути віднесені насоси, теплообмінники, трубопроводи, резервуари, електротехнічні пристрої тощо. Згідно з НП 306.2.245-2024 [3] до обладнання, що не впливає безпосередньо на ядерну безпеку (клас 4), не застосовуються вимоги норм та правил з ЯРБ, зокрема і щодо підтвердження сейсмостійкості під державним наглядом Державної інспекції з ядерного регулювання України (ДІЯРУ). Це створює ситуацію, коли на АЕС експлуатується значна кількість обладнання, для якого формально передбачені вимоги з сейсмостійкості, але виконання робіт щодо підтвердження його стійкості згідно НП 306.2.245-2024 [3] є не обов'язковим.

За попередніми оцінками, на одному енергоблоці АЕС України встановлено близько 15 тисяч одиниць обладнання другої категорії сейсмостійкості, серед якого близько 5 тисяч відноситься до класу 4 відповідно до НП 306.2.245-2024 [3]. До цього обладнання належить, зокрема, і великогабаритне тепломеханічне та електричне обладнання, для якого відсутні аналоги на світовому ринку або терміни виготовлення якого перевищують кілька місяців. При цьому, за деякими

оцінками, постачання такого обладнання, у разі необхідності його заміни, може затягнутись до року внаслідок певних адміністративних процедур.

Зазначена ситуація ускладнюється тим, що у випадку аварійної зупинки одного або кількох енергоблоків АЕС через відмову уразливого обладнання виникає необхідність термінового залучення резервних або маневрових потужностей, що є не завжди можливим в умовах дефіциту генерації. Це створює додаткове навантаження на енергосистему і підвищує ризики віялових відключень споживачів.

Важливо підкреслити, що після землетрусу проєктного рівня, стійкість до якого регламентується вимогами НП 306.2.208-2016 [2] для обладнання другої категорії сейсмостійкості, відмова обладнання, що впливає на вироблення електроенергії, може стати причиною повної зупинки генерації енергоблоком, навіть якщо системи безпеки та схема видачі потужності загалом залишаються працездатними. Таким чином, нинішня відсутність вимоги щодо обов'язкової переоцінки та підтвердження стійкості обладнання другої категорії під наглядом ДІЯРУ є суттєвим регуляторним розривом, який потребує усунення.

Міжнародний досвід. Практика післяаварійних обстежень обладнання на міжнародних об'єктах (наприклад, АЕС «Кашівадзакі-Каріва» в Японії після землетрусу 2007 року) свідчить, що значна частина простоїв енергоблоків була пов'язана саме з відмовою допоміжного обладнання, яке не впливає на безпеку, а саме пошкодження трансформаторів, систем електропостачання та допоміжного обладнання з великими масово-габаритними показниками, ремонт або заміна яких вимагали значного часу [4].

Зазначене підтверджує необхідність більш жорсткого підходу до оцінки та підвищення стійкості обладнання, що забезпечує безперервну електрогенерацію.

На відміну від України, міжнародна практика, зокрема стандарти МАГАТЕ (SSG-9 [5], SSG-18 [6]), рекомендують оцінку сейсмостійкості всього важливого для роботи електростанції обладнання незалежно від його класу безпеки.

Попередні роботи. На цей час на вимогу НП 306.2.208-2016 [2], НП 306.2.245-2024 [3] в рамках реалізації заходів КЗППБ [7] сейсмостійкість

обладнання, яке виконує критичні функції безпеки, оцінена. В рамках реалізації заходів КЗППБ [7] для обладнання, сейсмостійкість якого була визначна недостатньою, реалізовані компенсуючі заходи. Отже, для обладнання, яке виконує критичні функції безпеки, на АЕС України, підтверджене виконання ним функцій під час та після проходження землетрусу максимального розрахункового рівня.

Роботи щодо підтвердження сейсмостійкості усього обладнання I та II категорії сейсмостійкості заплановані в рамках реалізації Заходів №25/06 [8]. Однак через описаний вище регуляторний розрив номенклатура аналізованого в рамках реалізації Заходів №25/06 [8] обладнання є неповною (відсутня значна частина обладнання не важливого для безпеки), а терміни реалізації неодноразово переносилися.

Мета роботи. З огляду на значну кількість не важливого для безпеки обладнання другої категорії сейсмостійкості та значний обсяг робіт з підтвердження його сейсмостійкості, доцільним є проведення попереднього аналізу надійності електрогенерації шляхом оцінки лише особливо вразливого та критичного для вироблення електроенергії обладнання з метою оперативного введення можливих компенсуючих заходів для підвищення енергетичної безпеки України.

Технічні аспекти уразливості. Технічні аспекти уразливості обладнання другої категорії сейсмостійкості визначаються поєднанням його конструктивних та експлуатаційних характеристик, а також місця розташування. Висота розташування обладнання безпосередньо впливає на амплітуду коливань, яку воно сприймає під час землетрусу, а отже і рівень навантажень у конструкції. На рис. 1 показано приклад різниці прискорення спектрів відгуку для різних висотних відміток діючого енергоблоку АЕС України.

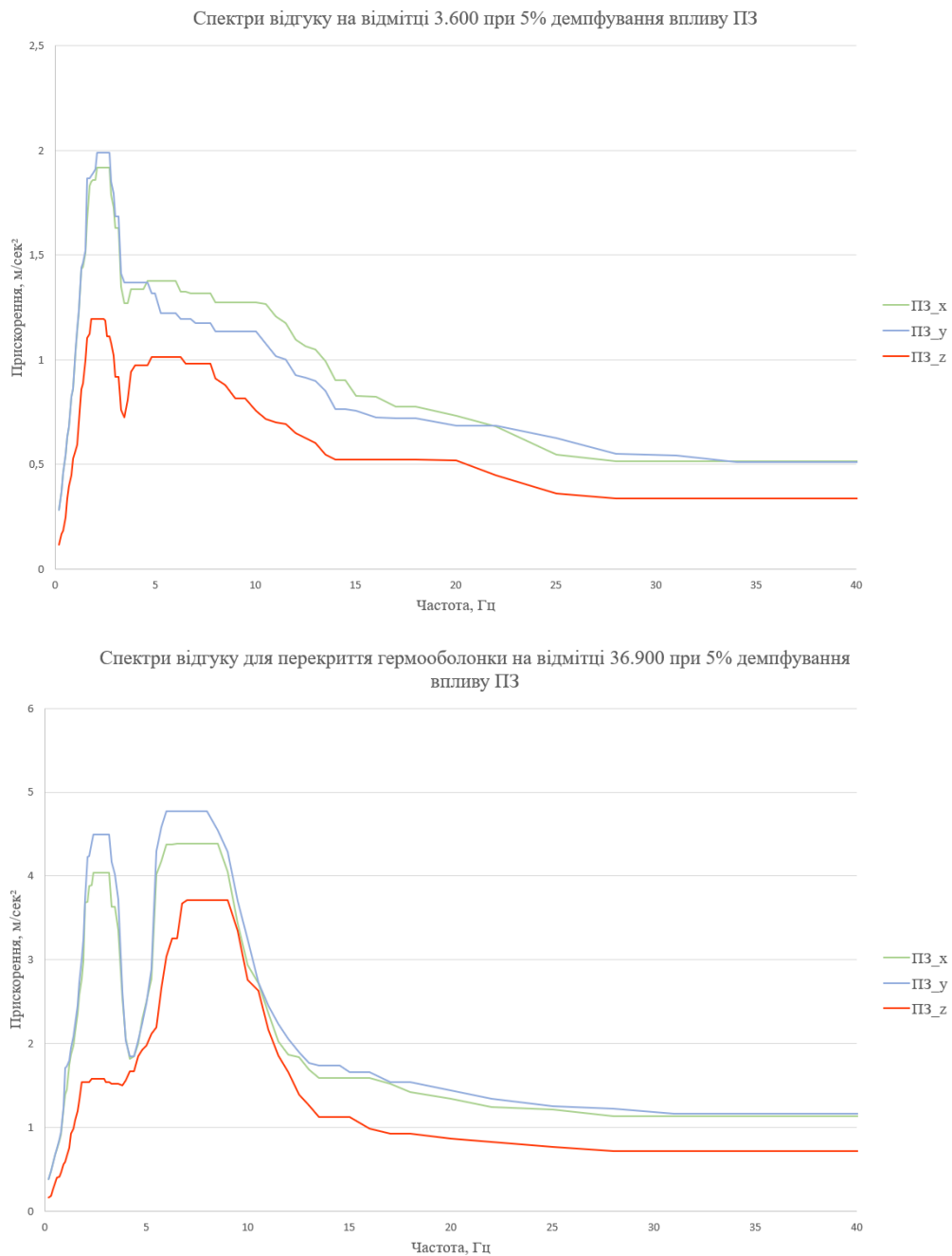


Рисунок 1 – Порівняння спектрів відгуку для різних відміток розташування обладнання

Особливу увагу слід приділити обладнанню, яке працює під тиском та містить значну кількість рідини, оскільки воно зазнає додаткових гідродинамічних навантажень під час сейсмічних подій. Одним із характерних прикладів є тонкостінні резервуари з рідиною, у яких під час землетрусу виникає явище хвилювання рідини (sloshing). Це призводить до зміни власних частот коливань системи «бак + рідина», що може збігатися з резонансними частотами сейсмічного впливу. У таких випадках значно зростають динамічні напруження в

стінках і днищі резервуара, що підвищує ризик його пошкодження. На рис. 2 показано модальний аналіз системи «бак + рідина», який демонструє особливі форми коливань рідини.

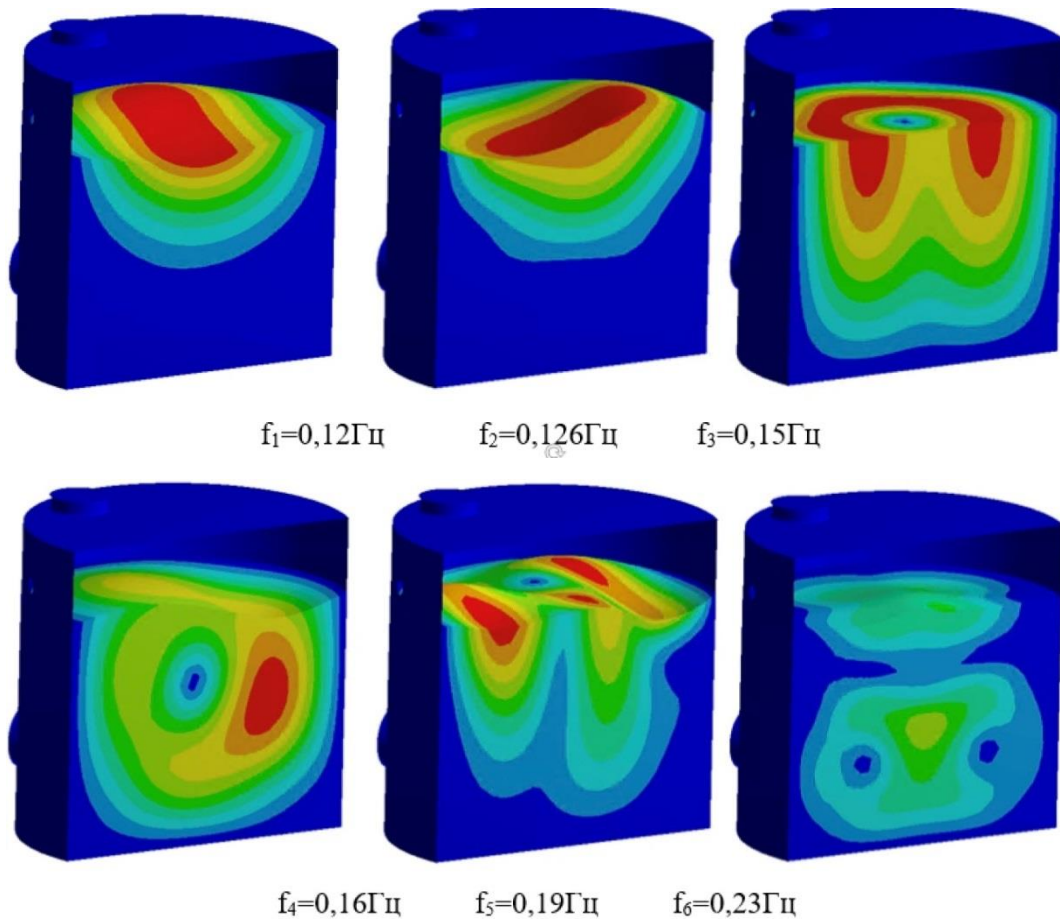


Рисунок 2 – Власні частоти коливань системи «бак + рідина»

Іншим прикладом є великогабаритні теплообмінники та насоси, особливо ті, що встановлені на високих відмітках (наприклад, деаераційні баки другого контуру).

Конструктивні особливості, такі як форма перерізу, наявність внутрішньокорпусних елементів, спосіб кріплення до опорних конструкцій, також відіграють ключову роль у здатності обладнання витримувати сейсмічні навантаження. Наприклад, обладнання з асиметричною геометрією або з великою кількістю внутрішніх перегородок може демонструвати несподівані модальні характеристики, які складно передбачити із високою точністю без детального моделювання.

Важливість належної оцінки зазначених аспектів підвищується, коли мова йде про обладнання, для якого відсутні аналоги на світовому ринку або виготовлення яких займає тривалий час. В умовах збройної агресії та логістичних обмежень будь-яка відмова такого обладнання може призвести до багатомісячних простоїв енергоблока, саме тому воно повинно розглядатися як пріоритетне для проведення детальної оцінки сейсмостійкості та впровадження заходів підвищення стійкості.

Таким чином, технічна уразливість обладнання другої категорії сейсмостійкості має багатофакторний характер і вимагає інтегрованого підходу до її оцінки.

Шляхи вирішення. Вирішення проблеми підтвердження стійкості обладнання другої категорії до сейсмічних впливів на енергоблоках АЕС України потребує комплексного підходу. Основними напрямками є:

1. Нормативні зміни. Внесення доповнень до НП 306.2.245-2024 [3], які б прямо передбачали обов'язкове підтвердження сейсмостійкості обладнання другої категорії під наглядом ДІЯРУ.

2. Аналітичні заходи. Розробка методики вибору типопредставників особливо вразливого, значущого для вироблення електроенергії обладнання (з урахуванням часу відновлення його працездатності або заміни) з подальшою оцінкою його сейсмостійкості.

3. Технічні заходи. Внесення змін до конструкції обладнання, підвищення жорсткості та міцності кріплень, використання демпфуючих систем для зменшення амплітуди коливань під час землетрусу; створення запасу критично важливого обладнання, яке має обмежену доступність на ринку; впровадження систем моніторингу стану обладнання у режимі реального часу для виявлення пошкоджень одразу після сейсмічного впливу.

Реалізація цих заходів дозволить значно знизити ризик тривалих простоїв енергоблоків після проєктних землетрусів, підвищить загальну надійність електропостачання та сприятиме виконанню міжнародних зобов'язань України у сфері ядерної безпеки.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз показав, що обладнання другої категорії сейсмостійкості, яке експлуатується на енергоблоках АЕС України та не впливає на безпеку, має критичне значення для забезпечення безперервності електрогенерації, але наразі не підлягає обов'язковому підтвердженню сейсмостійкості під наглядом ДІЯРУ. Така ситуація створює суттєві ризики для надійності енергопостачання, особливо в умовах підвищеної сейсмічної небезпеки та обмежених можливостей оперативної заміни обладнання.

Міжнародний досвід показує, що навіть у країнах з високим рівнем сейсмічного ризику, зокрема у Японії, велика частина економічних збитків та тривалих простоїв енергоблоків після землетрусів була пов'язана не стільки з пошкодженням основного обладнання реакторних установок, скільки з відмовами допоміжних систем та елементів, що забезпечують виробництво та передачу електроенергії.

Виявлений регуляторний розрив потребує усунення шляхом внесення змін до ключових нормативно-правових актів. Проте вже зараз необхідним є проведення попереднього аналізу надійності електрогенерації.

Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути зосереджені на:

- формуванні переліку обладнання, яке не впливає на безпеку АЕС, але є критично важливим для електрогенерації;
- визначенні наявності/відсутності попередніх робіт експлуатуючої організації АТ НАЕК «Енергоатом» з оцінки стійкості цього обладнання до проєктних екстремальних зовнішніх впливів;
- розробка поетапної методики вибору типопредставників обладнання для можливості врахування головного аспекту – впливу втрати стійкості обладнання на можливе недовироблення електроенергії;
- розробка технічних засобів підвищення стійкості до відмов окремого обладнання;
- аналіз внеску запропонованих засобів у надійність електропостачання АЕС України.

Проведення запропонованих досліджень та реалізація розроблених заходів сприятиме підвищенню енергетичної безпеки України шляхом зменшення ризиків

тривалих простоїв АЕС та підвищення надійності електрогенерації у об'єднаній енергетичній системі України.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Громадська організація «Українське Ядерне Товариство»: Аналітичний звіт «Вплив ядерної галузі на розвиток України, 2020. 31 с.
2. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. – Київ: Держатомрегулювання України, 2016. 42 с.
3. НП 306.2.245-2024. Загальні положення безпеки атомних станцій. Київ : Держатомрегулювання України, 2024. 64 с.
4. IAEA Expert Mission Report. Preliminary Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2008. 52 с.
5. IAEA Safety Standards Series No. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2010. 217 с.
6. IAEA Safety Standards Series No. SSG-18. Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 183 с.
7. Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки енергоблоків атомних електростанцій України (КзППБ). Київ : ДП «НАЕК «Енергоатом», 2011. 104 с.
8. Заходи № 25/06 «Щодо впровадження нормативно-правового акта Держатомрегулювання “Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій” НП 306.2.208-2016 (в новій редакції)». Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2024. 5 с.

REFERENCES:

1. Ukrainian Nuclear Society. Analytical Report “Impact of the Nuclear Industry on the Development of Ukraine”, 2020. 31 p.
2. NP 306.2.208-2016. Requirements for Seismic Design and Seismic Safety Assessment of Nuclear Power Plant Units. Kyiv : State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2016. 42 p.
3. NP 306.2.245-2024. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants. Kyiv : State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2024. 64 p.
4. IAEA Expert Mission Report. Preliminary Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2008. 52 p.
5. IAEA Safety Standards Series No. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2010. 217 p.
6. IAEA Safety Standards Series No. SSG-18. Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 183 p.
7. Comprehensive (Consolidated) Safety Upgrade Program for the Nuclear Power Plant Units of Ukraine (C(S)SUP). Kyiv : SE “NNEGC Energoatom”, 2011. 104 p.
8. Measure No. 25/06 “On the Implementation of the Regulatory Document of the State Nuclear Regulatory Inspectorate ‘Requirements for Seismic Resistant Design and Seismic Safety Assessment of Nuclear Power Plant Units’ NP 306.2.208-2016 (new edition)”. Kyiv : SE “NNEGC Energoatom”, 2024. 5 p.

Стаття надійшла до редакції: 05.06.2025; рецензування: 20.06.2025;

прийнята до публікації 02.07.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 05.06.2025; revised on 20.06.2025; and accepted for publication on 02.07.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.