

О. М. Дибач

Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, вул. Василя Стуса, 35–37, Київ, 03142, Україна

Окремі правові та технічні аспекти військових впливів на АЕС України

Ключові слова:

атомна електрична станція,
військовий вплив,
ядерна безпека,
резильєнтність

Розглянуто окремі приклади правових і технічних аспектів безпеки АЕС в умовах війни. Зазначено, що військові впливи спричинили безпрецедентні загрози всім складовим концепції 3S — ядерній безпеці, фізичному захисту та гарантіям нерозповсюдження. Констатовано очевидну невідповідність дій РФ нормам міжнародного гуманітарного права, яке надає АЕС спеціальний захист як об'єктам, що містять «небезпечні сили». Відзначено, що втрата зовнішнього електропостачання набула системного характеру й стала однією з ключових загроз для безпеки українських АЕС. Частота та тривалість таких подій суттєво перевищили проектні припущення внаслідок навмисних ударів РФ по енергетичній інфраструктурі. Атаки РФ на енергосистему зумовлюють потребу в превентивному розвантаженні енергоблоків та призводять до коливань частоти та напруги, що негативно впливає на роботу обертових механізмів і турбоагрегатів. Аналіз засвідчує нагальну потребу адаптації та подальшого розвитку підходів до оцінки безпеки АЕС в умовах деградованої енергосистеми. Перспективним інструментом є методологія «зон вразливості» EPRI (США), яка дозволяє інтегрувати детерміністичні та ймовірнісні оцінки впливу порушень у мережі на безпеку АЕС і може бути основою для підтримки оперативного прийняття рішень.

Вступ

Агресія РФ проти України у 2022 р. стала першим випадком в історії, коли діючі енергоблоки АЕС зазнали прямого військового впливу, включно зі збройним захопленням ядерних установок на майданчиках Чорнобильської АЕС (24 лютого – 31 березня 2022 р.) та Запорізької АЕС (з 4 березня 2022 р. й дотепер).

Військовий вплив компрометує всі складові безпеки АЕС (концепція 3S) — ядерна безпека (nuclear safety), фізичний захист (nuclear security) та гарантії нерозповсюдження ядерного матеріалу (safeguards), зокрема:

ядерна безпека — виникнення аварійних перешкоди процесів унаслідок військових дій, ризик для

фізичної цілісності та функціональності конструкцій, систем та елементів, важливих для безпеки, підвищений стрес персоналу, деградація стану обладнання та неавторизовані модифікації на майданчику Запорізької АЕС;

фізичний захист — перевищення проектною загрози (design basis threat) фізичний захист скомпрометований країною (state actor), комбіновані фізичні та кібератаки (на АЕС та енергосистему);

гарантії нерозповсюдження ядерного матеріалу — тимчасові втрати зв'язку із засобами дистанційної передачі даних до Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) та порушення обсягів контролю за ядерними матеріалами з боку України як власника матеріалів на майданчику Запорізької АЕС.

Питання безпеки АЕС в умовах війни мають багатовимірний характер та можуть розглядатися у правовій та технічній площині. Комплексне вивчення аспектів безпеки АЕС у військових умовах є необхідним для винесення уроків та формування прагматичних рекомендацій, спрямованих на забезпечення безпеки та резильєнтності АЕС (як для нових проєктів, так і діючих енергоблоків АЕС) в умовах екстремальних впливів, що не враховані чи не можуть бути враховані у проєкті АЕС.

Правові аспекти.

Міжнародне гуманітарне право

Правові аспекти щодо захисту АЕС від військових впливів розглядаються в роботах [1, 2]. Міжнародне гуманітарне право надає спеціальний захист АЕС як об'єктам, що містять «небезпечні сили» (dangerous forces) (ст. 56 (1) Додаткового протоколу I до Женевських конвенцій [3]). Навіть якщо такі об'єкти мають ознаки військової цілі, напад на них заборонено, якщо це може спричинити вивільнення небезпечних сил і масові втрати серед цивільного населення.

Виняток із цього правила (ст. 56 (2)) можливий лише за одночасного виконання двох умов:

- 1) АЕС надає регулярну, значну і пряму підтримку військовим операціям;
- 2) напад є єдиним можливим способом припинити таку підтримку.

Незважаючи на дискусійність зазначених вище умов, в умовах нападу РФ на українські АЕС вони не були виконані, що підтверджується і тлумаченням Міжнародного комітету Червоного Хреста. Постачання електроенергії через загальну енергосистему, навіть за умови її часткового використання у військових цілях, не може вважатися достатньою підставою для збройного нападу [4]. Таким чином, дії РФ щодо обстрілів та захоплення Запорізької АЕС є грубим порушенням міжнародного гуманітарного права.

Проте ці норми залишаються декларативними: дієвих механізмів відповідальності за такі дії досі не створено. Це демонструє критичну прогалину в міжнародному праві: юридичні обмеження існують, але не забезпечені виконанням. Варто зазначити, що в історії були військові атаки на ядерні установки (дослідницькі реактори, збагачувальні установки, АЕС на стадії будівництва в Сирії, Іраку та Ірані), однак усі вони мали превентивний характер для недопущення створення ядерної зброї і не несли загрози масштабних радіаційних викидів у довкілля. Проте в Україні атак зазнали

АЕС, що експлуатуються виключно в мирних цілях і перебувають під гарантіями МАГАТЕ.

Разом з тим міжнародне гуманітарне право фокусується лише на діючих АЕС, що обмежує його застосування для Чорнобильської АЕС та інших ядерних установок (наприклад, сховищ відпрацьованого ядерного палива).

Технічні аспекти. Втрата зовнішнього електропостачання як системний виклик для безпеки АЕС в умовах війни

Втрата зовнішнього електропостачання (loss of off-site power, LOOP) для АЕС у мирних умовах є очікуваною подією [5] (частота $>10^{-2}$ 1/рік) та враховується в аналізі проєктних аварій.

В умовах війни LOOP супроводжується низкою обтяжуючих факторів, серед яких:

частота виникнення значно перевищує очікувану в мирний час;

тривалість відновлення електропостачання (зокрема через підвищені ризики для ремонтного персоналу енергосистеми) перевищує припущення аналізу безпеки;

корінна причина — навмисні військові атаки РФ на об'єкти зовнішньої енергетичної інфраструктури (високовольтні підстанції та лінії електропередач);

зниження надійності обладнання через часті спрацювання, тривалу експлуатацію та фізичні пошкодження;

психологічний стрес персоналу.

Інші впливи на безпеку АЕС від нестабільних режимів роботи електричних мереж:

превентивне розвантаження енергоблоків АЕС за командою диспетчера;

зміна частоти електричної мережі (неконтрольоване зростання або зменшення частоти), що негативно впливає на ресурсні характеристики працюючих оборотних механізмів власних потреб та турбоагрегатів АЕС.

Щодо втрати зовнішнього електропостачання особливо критичною є ситуація на Запорізькій АЕС (рис. 1), де МАГАТЕ зафіксувало 10 випадків [6], останній з яких тривав близько 30 діб. Окрім Запорізької АЕС, випадки втрати електропостачання також фіксувалися на інших АЕС України.

Також у ніч на 24 листопада 2022 р. внаслідок обстрілів, що спричинили значні пошкодження енергомережі України, відбулася одночасна втрата зовнішнього електропостачання на всіх діючих АЕС країни, а також на Чорнобильській АЕС (рис. 2).

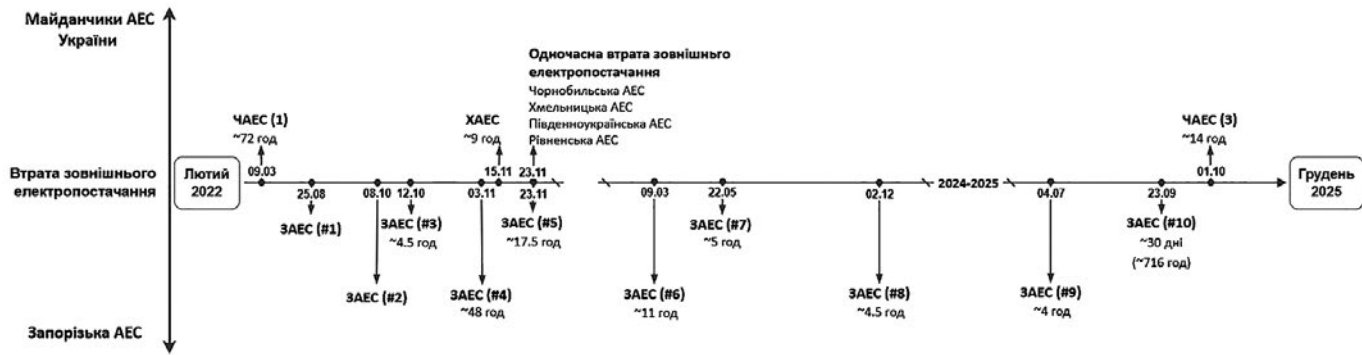
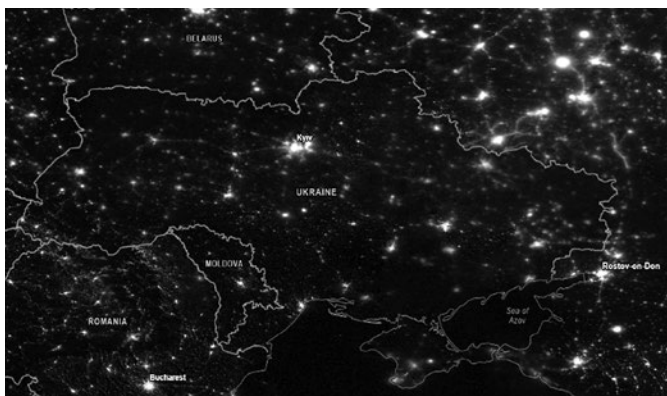


Рис. 1. Втрати зовнішнього електропостачання на майданчиках українських АЕС (інформація для створення графіка взята з документів МАГАТЕ: <https://www.iaea.org/topics/response/nuclear-safety-security-and-safeguards-in-ukraine/documents>)



а



б

Рис. 2. Супутникові знімки освітлення населених пунктів України, отримані за допомогою інструменту NASA WorldView [7]: а — до вторгнення РФ в Україну (10.02.2022 р.); б — у ніч на 24.11.2022 р.

Слід зазначити, що військові атаки мають одночасний вплив на експлуатацію АЕС (область А) та енергосистему (область В), а також загалом у більш широкому контексті на енергетичну політику країни в цілому протягом та після війни. Як показано на рис. 3, експлуатація АЕС та енергосистема мають інтерфейс, що являє собою множину перетинів С, у тому числі в частині безпеки АЕС та стійкості енергосистеми — СЗ.

Зокрема в нормативному документі НП 306.2.205-2016 «Вимоги до систем електропостачання, важливих для безпеки атомних станцій» [8] встановлено вимоги з безпеки до електропостачання від об'єднаної енергосистеми, зокрема:

у проєкті АЕС виконується аналіз і визначаються основні критерії впливу об'єднаної енергосистеми на надійність і безпеку експлуатації енергоблоків АЕС (імовірність знеструмування АЕС з відмовою систем аварійного електропостачання, відключення ліній електропередач, перехідні електричні процеси в умовах системних аварій тощо);

на підставі проведеного аналізу впливу об'єднаної енергосистеми на надійність і безпеку експлуатації енергоблоків АЕС у проєкті АЕС (за необхідності) передбачаються додаткові організаційні та технічні заходи на майданчику АЕС щодо забезпечення безпечної експлуатації енергоблоків.

Виходячи з досвіду українських АЕС в умовах війни, як компенсуючі заходи можуть розглядатися наведені нижче рішення.

1. Актуалізація стратегій управління аваріями з утратою зовнішнього електропостачання з урахуванням підвищеної частоти та тривалості таких подій, зокрема відпрацювання відповідних алгоритмів переведення енергоблоків на забезпечення власних потреб, роботи в «режимі острова», оптимізація навантаження аварійних дизель-генераторів та ін.

2. Підвищення надійності та готовності аварійних дизель-генераторів під час тривалої роботи, забезпечення достатніх запасів пального, доступу до необхідних запасних частин.

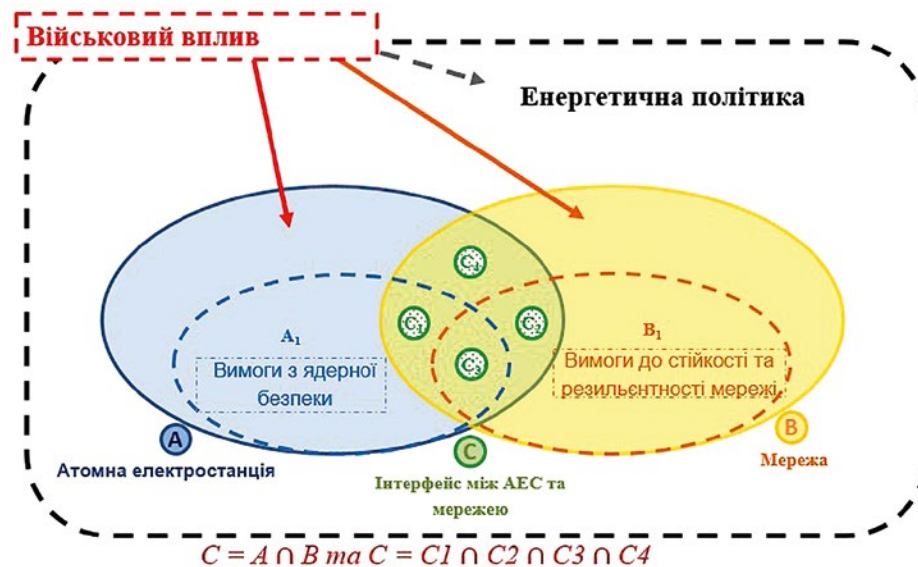


Рис. 3. Інтерфейс між АЕС та енергосистемою в умовах військових впливів

3. Забезпечення ефективної інтеграції мобільних дизель-генераторів у систему аварійного електропостачання АЕС із запобіганням відмовам із загальних причин та гарантуванням можливості їхнього оперативного підключення.

4. Розробка окремих керівництв щодо непроєктного використання наявного обладнання в умовах руйнувань, організації управління аваріями з урахуванням пошкодженої інфраструктури.

5. Впровадження заходів для підвищення стійкості високовольтних підстанцій до військових впливів, включаючи інженерне посилення, захисні конструкції та резервування схем, якщо це є технічно можливим.

Також потребує подальшого розвитку методологія оцінки безпеки та резильєнтності АЕС до порушень в енергосистемі з більш детальним моделюванням зв'язків АЕС і енергосистемою та для підтримки оперативного прийняття рішень. За основу може бути взята методологія Інституту EPRI (США) [10]. Зазначена методологія була розроблена як елемент ширшого інструментарію підтримки прийняття рішень для операторів енергосистеми та експлуатуючих організацій АЕС, метою якого є виявлення таких комбінацій відмов у мережі, що можуть призвести до втрати зовнішнього електроживлення та аварійного зупину енергоблоку АЕС.

Методологічною основою цього підходу є запроваджене в EPRI поняття «зони вразливості» [11]. Для аналізу розглядається не вся енергосистема, а лише той її фрагмент, у межах якого порушення в мережі

можуть спричинити неприйнятні відхилення напруги або частоти на шинах власних потреб АЕС. У методології EPRI ця ідея узагальнена та формалізована: запропоновано послідовну процедуру визначення зони вразливості АЕС, оцінювання наслідків аварій у межах цієї зони та інтеграції отриманих результатів у ймовірнісний аналіз безпеки.

Методологія передбачає виконання послідовних етапів.

На першому етапі здійснюється ідентифікація граничних параметрів у мережі, що створюють ризик відмови обладнання АЕС. Визначаються граничні параметри прийнятної роботи обладнання щодо короточасних відхилень напруги і частоти на шинах власних потреб та секціях шин систем безпеки. Ці межі задаються у вигляді узагальнених кривих стійкості «напруга — час» та «частота — час», які встановлюють допустиме поєднання діапазону та тривалості відхилення напруги або відхилення частоти, за якого обладнання зберігає працездатність і не відбувається спрацювання захисту та протиаварійної автоматики. Таким чином формується критерій, що дає змогу однозначно класифікувати результат моделювання як прийнятний або такий, що створює загрозу для безпечної експлуатації енергоблоку.

На другому етапі визначаються зони вразливості АЕС в електромережі. На основі детальної моделі фрагмента енергосистеми, до якого приєднана АЕС, виконується аналіз серії відмов у різних вузлах мережі. Для кожного місця пошкодження розраховується миттєве значення напруги на шинах АЕС у мо-

мент аварії і результати порівнюються з граничними кривими першого етапу. Якщо відхилення напруги виявляється більшим або тривалішим за допустимий, відповідний елемент (лінія електропередачі, підстанція, інше приєднання) відноситься до зони вразливості. Для ділянок мережі, де короткочасні відхилення напруги не перевищують установлених меж, вважається, що пошкодження не створюють безпосередньої загрози безпеці енергоблоку за умови штатної роботи систем релейного захисту та автоматики енергосистеми.

На третьому етапі проводиться оцінка аварійних комбінацій у межах визначеної зони вразливості. Формується перелік одиничних відмов елементів мережі (перший рівень) та поєднань двох і більше відмов (другий рівень), які є репрезентативними для енергосистеми. Для кожної такої комбінації виконується розрахунок післяаварійного режиму роботи енергосистеми з урахуванням дії систем автоматичного регулювання напруги та частоти. За потреби застосовуються динамічні моделі, що дає змогу оцінити стійкість системи після порушення (розвиток перехідних процесів, демпфування коливань частоти та напруги). Якщо розрахунок режиму не збігається або післяаварійний стан характеризується неприйнятними відхиленнями напруги на шинах систем безпеки, нестійкістю режиму чи втратою зовнішнього електроживлення, відповідна комбінація подій класифікується як критична з точки зору безпеки АЕС і закріплюється як частина зони вразливості.

Заключний етап передбачає інтеграцію результатів попередніх кроків у ймовірнісний аналіз безпеки. Для елементів мережі, що входять до зони вразливості, задаються інтенсивності відмов, зокрема з урахуванням можливих відмов із загальної причини, а також імовірності неспрацювання релейного захисту і невиконання дій протиаварійної автоматики та оперативного персоналу. На основі цих даних формуються моделі дерев подій/дерев відмов, які дають змогу кількісно оцінити частоту небажаних станів АЕС. Отримані показники ризику використовуються для побудови ранжованого переліку найбільш небезпечних сценаріїв та ділянок мережі, а також для формування технічних та організаційних рекомендацій щодо їхнього усунення чи зменшення наслідків.

Загалом методологія EPRI демонструє, яким чином можна поєднати детерміністичні розрахунки режимів енергосистеми з ймовірнісним аналізом безпеки АЕС на основі концепції зони вразливості. Вона є прикладом структурованого підходу до моделювання

взаємного впливу АЕС та енергосистеми і може слугувати орієнтиром під час розроблення власних підходів до оцінки безпеки та резильєнтності АЕС в умовах деградованої мережі внаслідок екстремальних загроз та, зокрема, впливів військового характеру.

Висновок

Недопущення будь-якого військового впливу та захоплення АЕС має залишатися безумовним пріоритетом. Досвід війни в Україні продемонстрував неефективність чинних міжнародно-правових механізмів захисту ядерних установок і нагальну потребу у впровадженні дієвих інструментів для запобігання військовим атакам на АЕС.

Також український досвід підтверджує, що втрата зовнішнього електропостачання стала системною загрозою для безпеки АЕС, при цьому критичними в контексті загроз є високовольтні підстанції.

Забезпечення безпеки та резильєнтності АЕС в умовах війни має охоплювати не лише заходи на майданчику станції, а й ефективний захист зовнішньої інфраструктури, насамперед ключових підстанцій, із забезпеченням взаємодії з оператором енергосистеми.

Існуючі підходи до оцінки безпеки потребують адаптації та подальшого розвитку для врахування специфіки військових впливів, включно з глибшою інтеграцією питань зовнішнього електропостачання в аналіз безпеки, та оперативного прийняття рішень.

Список використаної літератури

1. George M. M. How international law applies to attacks on nuclear and associated facilities in Ukraine / M. M. George // *Bulletin of the Atomic Scientists*. – March 6, 2022. – Available at: <https://thebulletin.org/2022/03/how-international-law-applies-to-attacks-on-nuclear-and-associated-facilities-in-ukraine>.
2. Dolzikova D. (2025). Nuclear Facilities as Targets of Military Attack / D. Dolzikova // *RUSI occasional paper*. – April 25, 2025. – Available at: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/occasional-papers/nuclear-facilities-targets-military-attack>.
3. Protocol Additional to the Geneva Conventions of 12 August 1949 and relating to the Protection of Victims of International Armed Conflicts (Protocol I), 8 June 1977, Part IV: Civilian population, Article 56 – Protection of works and installations containing dangerous forces // *International Humanitarian Law Databases*. – Available at: <https://ihl-data->

bases.icrc.org/en/ihl-treaties/api-1977/article-56.

4. Zeith A. Dangerous forces: the protection of nuclear power plants in armed conflict / Zeith A., Giorgou E. // Humanitarian Law & Policy Blog. – October 18, 2022. – Available at: <https://blogs.icrc.org/law-and-policy/2022/10/18/protection-nuclear-power-plants-armed-conflict>.

5. Volkanovski A. Summary report on events related to loss of offsite power and station blackout at NPPs (EUR27742 EN) / A. Volkanovski, A. Ballesteros, M. Peinador. – Joint Research Centre, European Commission, 2016. – Available at: <https://doi.org/10.2790/70161>.

6. Update 323 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine. – International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, October 23, 2025. – Available at: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-323-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>.

7. NASA. Worldview: Explore your dynamic planet. – Available at: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>.

8. НП 306.2.205-2016. Вимоги до систем електропостачання, важливих для безпеки атомних станцій // Офіційний вісник України № 10 від 12 лютого 2016 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0078-16#Text>

9. Design of electrical power systems for nuclear power plants: Specific safety guide SSG-34 (Publication No. IAEA-SSG-34). – International Atomic Energy Agency, 2016. – Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1673web-53477409.pdf>.

10. Methodology to evaluate nuclear power plant vulnerability to events in the transmission grid / A. Del Rosso, J.-F. Roy, F. Rahn, A. Capara // Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22) (July 7–11, 2014, Prague, Czech Republic). – New York: ASME, 2014. – Available at: doi.org/10.1115/ICONE22-30846.

11. Abi-Samra N. Vulnerability of nuclear power plants to voltage sag induced by disturbances in the transmission grid – The concept of zone of vulnerability for voltage / N. Abi-Samra, A. Del Rosso, F. Rahn // Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 (July 12–16, 2009, Brussels, Belgium). – Available at: doi.org/10.1115/ICONE17-75177.

O. M. Dybach

SE “State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, 35–37, V. Stusa St., Kyiv, 03142, Ukraine

Specific Legal and Technical Aspects of Military Impacts on Ukraine’s Nuclear Power Plants

This paper presents an analysis of selected legal and technical aspects of nuclear power plant (NPP) safety under conditions of war, based on the case of Ukraine. The 2022 military aggression of the Russian Federation against Ukraine represents the first documented instance in which operating NPPs were subjected to sustained and direct military action. This included the armed occupation of nuclear facilities at the Chornobyl and Zaporizhzhia NPP sites, creating unprecedented risks to civilian nuclear infrastructure. These events challenged all pillars of the international 3S framework — nuclear safety, nuclear security and nuclear safeguards — exposing vulnerabilities not previously encountered at this scale.

From a legal perspective, the paper examines the incompatibility of these actions with international humanitarian law, which affords nuclear power plants special protection as installations containing “dangerous forces”. Although legal norms explicitly prohibit attacks on such facilities due to the risk of large-scale civilian harm, the absence of effective enforcement and accountability mechanisms reveals substantial deficiencies in the existing international legal architecture.

From a technical perspective, the paper analyses the loss of off-site power (LOOP) as a systemic threat to NPP safety during war. The frequency and duration of LOOP events significantly exceeded design-basis assumptions as a direct consequence of deliberate attacks on high-voltage substations and transmission lines. Power restoration was further complicated by elevated risks to repair personnel, widespread physical damage to infrastructure, cumulative equipment degradation caused by repeated actuations, prolonged operation under degraded grid conditions and increased psychological stress on operating staff. Preventive load reductions and grid instability, including voltage and frequency fluctuations, additionally affected turbine-generator and rotating equipment performance.

The paper demonstrates that conventional safety assessment approaches are insufficient when nuclear facilities operate under conditions of large-scale military aggression and argues for the development of advanced analytical frameworks capable of capturing complex interactions between NPPs and degraded power systems. In this context, the methodology developed by EPRI, integrating deterministic grid disturbance analysis with probabilistic safety assessment, is identified as a promising tool for supporting operational decision-making. The Ukrainian experience provides a critical foundation for strengthening both international legal protections and

technical approaches to nuclear power plant resilience under extreme external hazards.

Keywords: nuclear power plant, military impact, nuclear safety, resilience.

References

1. George M.M. (2022). How international law applies to attacks on nuclear and associated facilities in Ukraine. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 6 March 2022. Available at: <https://thebulletin.org/2022/03/how-international-law-applies-to-attacks-on-nuclear-and-associated-facilities-in-ukraine>.
2. Dolzikova D. (2025). Nuclear facilities as targets of military attack. *RUSI occasional paper*, April 25, 2025. Available at: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/occasional-papers/nuclear-facilities-targets-military-attack>.
3. Protocol Additional to the Geneva Conventions of 12 August 1949 and relating to the Protection of Victims of International Armed Conflicts (Protocol I), 8 June 1977, Part IV: Civilian population, Article 56 – Protection of works and installations containing dangerous forces. *International Humanitarian Law Databases*. Available at: <https://ihl-databases.icrc.org/en/ihl-treaties/api-1977/article-56>.
4. Zeith A., Giorgou E. (2022). Dangerous forces: the protection of nuclear power plants in armed conflict. *Humanitarian Law & Policy Blog*, October 18, 2022. Available at: <https://blogs.icrc.org/law-and-policy/2022/10/18/protection-nuclear-power-plants-armed-conflict>.
5. Volkanovski A., Ballesteros A., Peinador M. (2016). *Summary report on events related to loss of offsite power and station blackout at NPPs* (EUR27742 EN). Joint Research Centre, European Commission. Available at: <https://doi.org/10.2790/70161>.
6. *Update 323 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 23 October 2025. Available at: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-323-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>.
7. NASA. *Worldview: Explore your dynamic planet*. Available at: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>.
8. NP 306.2.2052016. Requirements for power supply systems important to safety of nuclear power plants [Vymohy do system elektropostachaniia, vazhlyvykh dlia bezpeky AES]. *Official Journal of Ukraine*, no. 10, dated February 12, 2016. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0078-16#Text> (in. Ukr.)
9. International Atomic Energy Agency (2016). *Design of electrical power systems for nuclear power plants: Specific safety guide SSG-34* (Publication No. IAEA-SSG-34). Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1673web-53477409.pdf>.
10. Del Rosso A., Roy J.-F., Rahn F., Capara A. (2014). Methodology to evaluate nuclear power plant vulnerability to events in the transmission grid. *Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22) (July 7–11, 2014, Prague, Czech Republic)*. New York: ASME, 2014. Available at: doi.org/10.1115/ICONE22-30846.
11. Abi-Samra N., Del Rosso A., Rahn F. (2009). Vulnerability of nuclear power plants to voltage sag induced by disturbances in the transmission grid – The concept of zone of vulnerability for voltage. *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 (July 12–16 2009, Brussels, Belgium)*. Available at: doi.org/10.1115/ICONE17-75177.

Надійшла / Received 02.12.2025

Рекомендована до друку / Accepted 10.12.2025