

ЗАСТОСУВАННЯ БАЙЄСІВСЬКИХ ПІДХОДІВ ДО ПОЄДНАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПІД ЧАС ОЦІНКИ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АЕС

А. В. Носовський, О. В. Печериця

Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ), Київ

Представлено результати технічної оцінки матеріалів звітів з аналізу безпеки АЕС України з висвітленням проблематики використання специфічних та узагальнених даних з надійності тепло-механічного обладнання систем АЕС. Наведено стислий огляд теоретичних джерел щодо застосування байєсівських підходів до поєднання специфічних та узагальнених даних і показано перспективність використання зазначених підходів з метою підвищення точності виконання оцінок екологічного ризику від експлуатації АЕС.

У складі техносфери України значну частку займають потенційно небезпечні виробництва, раптове порушення технологічних умов експлуатації яких супроводжується важкими соціально-економічними й екологічними наслідками для людини та навколишнього середовища. АЕС належать до зазначених об'єктів, на яких можливе виникнення техногенних аварій та катастроф, що у свою чергу може призвести до локальних або трансграничних екологічних криз.

Основою для прийняття будь-якого рішення щодо забезпечення та підвищення екологічної безпеки АЕС є оцінка впливу на безпеку наслідків цього рішення. Взагалі такі оцінки можуть виконуватися за допомогою як детерміністичних, так і ймовірнісних методів. Відсутність достатнього аналізу досвіду експлуатації, необхідних знань механізмів старіння, відмов та зносу обладнання тощо, є причиною того, що детерміністичні методи аналізу безпеки протягом багаторічної історії розвитку ядерної енергетики панували серед інших методів. Оцінки безпеки на основі детерміністичних методів у деяких випадках можуть зумовлювати виникнення зайвого консерватизму під час прийняття рішень, у тому числі регулюючих. Зайвий консерватизм вимог, у свою чергу, може призвести до негативних явищ з точки зору забезпечення безпеки. Протягом кількох останніх років було виконано цілий комплекс робіт, пов'язаних з оцінкою рівня безпеки АЕС із застосуванням ймовірнісних методів. У ході виконання цих робіт було необхідно здійснити кількісну оцінку величин (параметрів) на підставі зібраної (наявної) статистичної інформації, тому питання отримання достовірних і систематизованих даних з історії експлуатації, у першу чергу даних з дефектів елементів, є наріжним з точки зору забезпечення прийнятної якості зазначених робіт і має суттєвий вплив на отримання прийнятних і показових результатів оцінок ризику перетворення аварійних ситуацій та аварій на АЕС на техногенні катастрофи з тяжкими екологічними наслідками.

Досвід виконання аналізів безпеки енергоблоків АЕС свідчить про те, що інформація з історії експлуатації АЕС не завжди використовується, коли це є необхідним. Цей факт відзначається під час виконання технічних оцінок та експертиз результатів зазначених аналізів безпеки, у яких брали участь автори статті.

Однією з основних причин, які обумовлюють проблеми з прийнятним використанням специфічних даних, є той факт, що події (дефекти елементів) є досить рідкими, а спостереження проводяться з порівняно недавнього часу й не завжди організовані коректно. Крім того, відсутні науково обґрунтовані методичні положення щодо визначення показників надійності (ПН) під час виконання аналізу безпеки АЕС з використанням ймовірнісних методів.

З іншого боку, основи байєсівського оцінювання і теорія байєсівських методів, що застосовуються під час оцінки надійності технічних об'єктів, дозволяють створити на їхній основі необхідну базу знань для рішення практичних задач і розробки інженерних методик, алгоритмів і програм.

Тому актуальними стають задачі виконання досліджень та розробки науково обґрун-

тованих підходів до використання даних з надійності під час оцінки рівня екологічної безпеки під час експлуатації АЕС.

Стратегія переоцінки безпеки АЕС спрямована на поєднання періодичної оцінки безпеки після певного терміну експлуатації з поглибленим аналізом безпеки із застосуванням сучасних методів аналізу (насамперед імовірнісного аналізу безпеки - ІАБ). Така переоцінка здійснюється в рамках розробки звіту з аналізу безпеки (ЗАБ) - основного документу, який потрібен для отримання ліцензії (дозволу) на експлуатацію (введення в експлуатацію) енергоблоків АЕС.

Аналіз матеріалів ЗАБ, який було виконано авторами статті, дозволяє сформулювати наступні висновки щодо підходів до використання даних з надійності тепломеханічного обладнання, які було застосовано під час виконання ІАБ енергоблоків АЕС України.

Для оцінки ПН під час виконання ІАБ застосовувалися чотири методи розрахунку.

Перший метод застосовувався для розрахунку винятково за специфічними даними з надійності (дані з історії експлуатації елементів енергоблока, рівень безпеки якого досліджується).

Другий метод застосовувався, коли специфічних даних недостатньо (критерії достатності визначено у відповідних регулюючих вимогах) і повинні використовуватися узагальнені дані (дані з історії експлуатації елементів енергоблоків аналогічного проекту).

Третій метод застосовувався, коли специфічних даних недостатньо, а по узагальненим даним є тільки інформація щодо кількості спрацьовувань на вимогу або часів спостережень та точкових оцінок ПН (імовірність відмови на вимогу або частота відмови), які було отримано за допомогою зазначених даних з напрацювань.

Четвертий метод (експертна оцінка) застосовувався, коли немає ні специфічних, ні узагальнених даних.

Даний перелік методів є типовим, їх використання не потребує ніяких додаткових обґрунтувань за умови дотримання двох основних вимог:

повинна бути забезпечена прийнятність (коректність процедури збору та обробки даних, обґрунтованість періоду збору даних тощо) даних з надійності;

повинна бути забезпечена прийнятність математичного апарату, який було застосовано для виконання розрахунків.

Однак зазначені вимоги не були цілком витримані під час виконаних на теперішній час досліджень рівня ризику експлуатації вітчизняних АЕС. Період часу, вибраний для виконання аналізу, було обмежено без надання необхідних обґрунтувань. Обробка специфічних даних з надійності (а для нових енергоблоків Хмельницької та Рівненської АЕС – найбільш пріоритетних узагальнених даних) та визначення напрацювання елементів було проведено з відхиленнями, які стосуються:

відсутності аналізу джерел специфічної інформації (залишилися відкритими питання: чи були використані усі можливі джерела для збору інформації, чи був охоплений максимальний період часу, за який можливо отримати інформацію з кожного джерела);

підходу, який було застосовано під час визначення часу відновлення елементу після виникнення дефекту (використані дані для часу відновлення для переважної більшості елементів суттєво відрізняються від реальних величин, що, у свою чергу, свідчить про невиправдано оптимістичні значення ПН, які було розраховано для цих елементів з використанням неповних даних з часу відновлення).

Під час аналізу математичного апарату, який було застосовано для виконання кількісної оцінки ПН, було визначено, що для всіх випадків використовується тільки експонентний розподіл. Перевірку гіпотези щодо обраного закону розподілу, яку було проведено, було виконано формально, оскільки експонента використовувалася під час досліджень незалежно від результатів перевірки гіпотези.

Використання експонентного розподілу для випадкових величин часу між відмовами та часу відновлення дає змогу використовувати для дослідження ПН систем марківські мо-

делі. Вплив цих припущень на кінцевий результат потребує окремого дослідження.

Таким чином, підходи щодо збору та подальшої обробки первинних даних з надійності, які було використано під час виконання ІАБ енергоблоків АЕС України, потребують доробок у методологічній та процедурній частині. Цю роботу заплановано на етапах доопрацювання матеріалів ЗАБ згідно із зауваженнями експертизи ЯРБ.

Можливість використання байєсівського підходу [1, 2] у теорії надійності не має однозначної відповіді серед фахівців, тим більше що деякі джерела надають тільки часткову інформацію щодо його використання. Згідно з [3], висновок про можливість використання байєсівського підходу повинен бути поставлений у залежність від призначення надійності: "Якщо надійність повинна давати звіт про отримані дані, тоді суб'єктивні дані можливо не знадобляться. Важливо знати, що суб'єктивні знання будуть у кінці відфільтровані у процесі прийняття рішення, що повністю відповідає змісту інженерної практики. Спеціалісти з надійності повинні бути зацікавлені в тому, щоб використовувати суб'єктивне знання, що відноситься до справи, та використовувати його раціонально. Оскільки вони бажають отримати найліпшу форму знань, що відносяться до надійності, вони повинні відчувати потребу у її передачі. Для того щоб передати суб'єктивне знання, його необхідно відповідним чином виразити кількісно". Так з'являються суб'єктивні ймовірності в галузі надійності.

У джерелах [4, 5] відзначається, що одною з переваг байєсівського методу є те, що він дає змогу інженеру використати свої знання, та ці знання можуть компенсувати відсутність даних. У цьому і є найбільш приваблива властивість байєсівської методології. Власне, ця властивість заставляє прагматично налаштованих інженерів використовувати байєсівські методи з тією тільки метою, щоб отримувати ті ж самі висновки, як і висновки теоретичної статистики, але спираючись на менший обсяг даних. Це особливо суттєво, коли ставиться задача підтвердити з великою достовірністю (більш ніж 0,95) рівень надійності. Класичні методи в подібних ситуаціях призводять до необхідності використання дуже великих обсягів емпіричних даних, що далеко не завжди можливо. Тому на практиці потрібно дуже ретельно та сумлінно обґрунтовувати байєсівські моделі та апріорні розподіли, щоб не видавати бажане за дійсне, оскільки одним із недоліків методу є те, що "ним дуже легко зловживати" [6].

На перспективність використання байєсівської методології вказували також радянські спеціалісти в галузі надійності. Беляев [7] підкреслює, що байєсівський підхід потрібно розглядати як загальний метод отримання статистичних висновків на підставі результатів випробувань. Він має практичні переваги й виділяється логічною простотою. Бруевич та Мільгам [8] розглядають байєсівську процедуру як процес самонавчання, пов'язаний з використанням можливостей людини, його здібностей аналізувати та екстраполювати.

Отже, актуальність байєсівського підходу під час оцінок надійності не викликає сумнівів.

Водночас існуючі нормативні документи не регламентують питання оцінки ПН при малому числі спостережень, що досить часто має місце під час оцінки ПН тепломеханічного обладнання АЕС. Крім того, існують деякі відкриті питання, які стримують практичне застосування байєсівських підходів у практиці надійності взагалі, особливо в такому важливому та відповідальному напрямку, як ядерна та екологічна безпека. Ці питання стосуються:

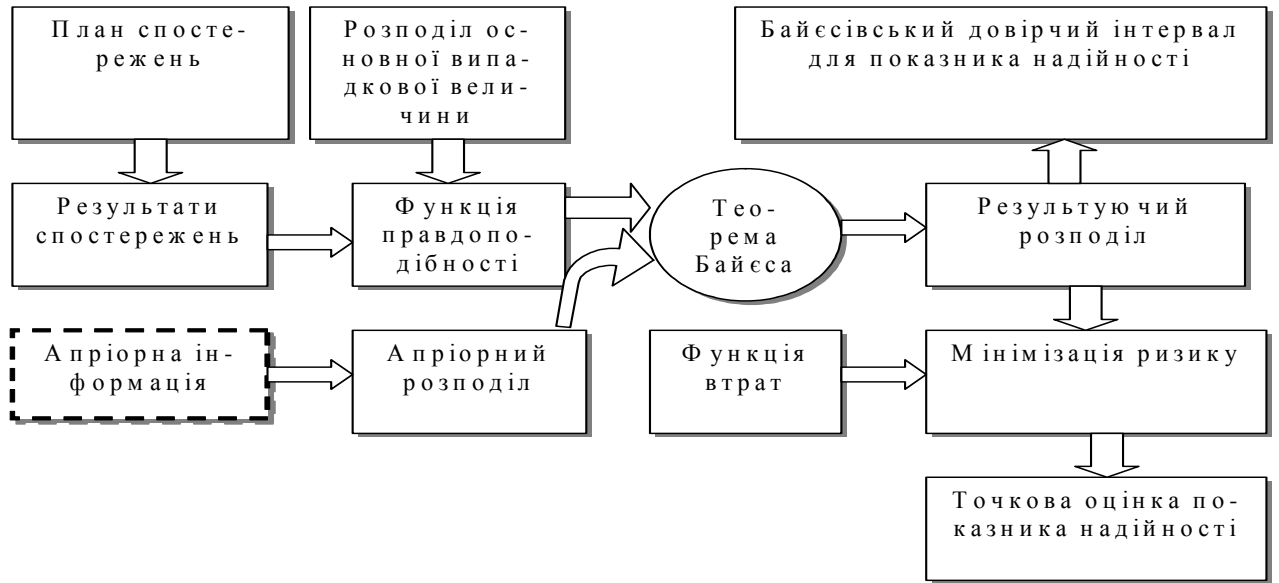
необхідності надання повного опису конкретного байєсівського методу, який використовується для оцінки ПН, з посиланням на першоджерело, та з обґрунтуванням вибору апріорного розподілу та функції втрат, які використовуються;

проведення поглибленого порівняльного аналізу для встановлення статистичної подібності узагальнених та специфічних даних, який, згідно з існуючими вимогами [9] та рекомендаціями [10 - 112], повинен бути основою для подальшого використання узагальнених даних, оскільки тільки за умови підтвердження статистичної подібності (однакових умов експлуатації, однакової якості розробки, виготовлення, технічного обслуговування елементів систем) можливе просте об'єднання інформації;

необхідності використання даних попередніх досліджень надійності аналогічного об-

ладнання для обґрунтування вибору апіорного розподілу й визначення його параметрів або визначення орієнтовного (очікуваного) значення ПН, або границь, у яких він знаходиться.

На рисунку зображено загальну схему отримання байесівських оцінок.



Згідно із зазначеною схемою порядок отримання оцінок є таким:

1. Визначається план спостережень залежно від того, який саме ПН оцінюється. Визначеному плану відповідають конкретні формули визначення ПН.

2. Відповідно до обраного плану виконується збір та первинна обробка даних з дефектів.

3. Висовується гіпотеза щодо розподілу випадкової величини; наприклад, для оцінки інтенсивності відмов висовується гіпотеза про гамма-розподіл, для ймовірності відмови на вимогу – бета-розподіл.

4. Виконується оцінка параметрів розподілу та побудова функції правдоподібності, тобто визначається ймовірність того, що отримані за результатами спостережень ПН відповідають шуканим.

5. За допомогою апіорних даних виконується побудова функції апіорного розподілу, тобто якщо вигляд апіорного розподілу заданий (або гамма-, або бета-розподіл), то оцінюються його параметри.

6. Інформація, що була отримана після виконання кроків 1 - 5, є вихідною для отримання результуючого розподілу із застосуванням теореми Байєса.

7. Після цього виконується побудова функції втрат. У загальному випадку рекомендується використовувати квадратичну функцію втрат, тобто квадрат різниці між отриманим числом та його оцінкою.

8. Після мінімізації ризику, яка полягає в пошуку мінімуму функції втрат, отриманої на попередньому етапі, визначається результуючий розподіл. З використанням квадратичної функції втрат та її мінімізації отримується оцінка ПН у вигляді результуючого середнього значення (точкова оцінка), а також байесівський довірчий інтервал.

Загальна байесівська процедура має велике число різновидів [13]:

параметричне байесівське оцінювання, при якому задається параметрична сім'я для розподілу основної випадкової величини;

непараметричне байесівське оцінювання, при якому розподіл основної випадкової величини вважається невідомим, але в деяких випадках можливо вважати, що він належить до деякого класу розподілів;

повна апіорна визначеність, коли щільність апіорного розподілу задана повністю;

часткова апіорна визначеність, коли задається певна кількість обмежень, які наклада-

ються на функціонали від апріорної щільності розподілу; емпіричне байєсівське оцінювання, коли апріорний розподіл повністю невідомий.

Кінцевим результатом описаних вище байєсівських процедур є результуючий розподіл параметра, який характеризує основні властивості системи або явища, яке вивчається. Цей розподіл дає ясне та вичерпне уявлення про невизначеність параметра. Але у реальних практичних ситуаціях необхідно мати більш просте вирішальне правило, яке дозволяє виразити уявлення про параметр у вигляді однієї або кількох числових сталих значень, які є оцінками невідомого параметра. Прикладами таких сталих значень є точкова оцінка та байєсівські довірчі границі.

У байєсівському підході різниця між параметром та його оцінкою знаходить свій вираз у функції корисності, яка у найбільш поширеному варіанті є функцією втрат. Остання за змістом характеризує втрати (у вигляді точності, грошей, часу тощо). Правило оцінювання обирається таким чином, щоб мінімізувати математичне очікування функції втрат.

З байєсівських позицій замість класичних властивостей оцінок (ефективність, спроможність) використовується одна загальна вимога: оцінка повинна бути оптимальною у розумінні мінімуму втрат, які очікуються.

Досліджуючи байєсівський підхід з позицій класичної властивості спроможності, можна прийти до висновку, що байєсівська теорія вирішує проблему малої вибірки. Справедливість даного твердження обумовлена тим, що у байєсівській теорії ця проблема не виникає.

Остаточна оцінка ПН, наприклад імовірності відмови на запуск насосу системи безпеки АЕС, завжди буде оптимальною з точки зору мінімуму обраної функції втрат. Інакше кажучи, обираючи відповідним чином функцію втрат, можемо отримати потрібну якість оцінки. Наприклад, коли відмова об'єкта пов'язана з людськими жертвами або втратою цінного обладнання, для оцінки надійності цього об'єкта потрібно використовувати найбільш песимістичну оцінку. Це відповідає функції втрат, яка має властивість – перевищення гірше, ніж заниження.

Висновки

За результатами аналізу підходів по використанню первинних даних з надійності під час виконання оцінки рівня ризику від експлуатації вітчизняних АЕС треба зазначити, що підходи мають недоліки у методичній та процедурній частинах. Вони стосуються процесу збору специфічних й узагальнених даних з надійності, що були використані під час виконання оцінок ризику, а також обґрунтування припущень та взагалі підходів, які було зроблено під час подальшої математичної обробки зазначених даних.

Виконаний аналіз відповідних теоретичних джерел показав досить значну перспективність використання байєсівських підходів при необхідності залучення додаткової інформації для оцінки надійності обладнання систем, важливих для безпеки, під час виконання аналізу ризику від експлуатації АЕС. Однак для забезпечення прийняттого ступеня коректності застосування байєсівських підходів необхідно виконати розробку спеціалізованої методики оцінки ПН, що враховує специфіку об'єкта й специфіку вихідних даних. При цьому методика, що розробляється, повинна бути гармонізованою з чинною нормативною базою. Ця методика повинна передбачати оцінку достовірності й точності одержуваних оцінок. Тому поряд із крапковими оцінками шуканих ПН, які при обмеженому обсязі статистики є мало інформативними, вона має розглядати інтервалові оцінки, що "накривають" із заданою довірчою імовірністю невідомі значення ПН. Процедури одержання зазначених вище оцінок ПН елементів систем АЕС повинні бути орієнтовані на малі й до того ж цензуровані вибірки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Martz H.F., Waller R.A.* Bayesian reliability analysis. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida. 1991. – 745 p.
2. *Савчук В.П.* Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. – М.: Наука, 1989. – 328 с.
3. *Crelin G. L.* The philosophy and mathematics of Bayes equation IEEE Trans. Reliab. – 1972. - Vol. R.-21, No. 3. – P. 131 - 135.
4. *Evans R. A.* Prior knowledge, engineers versus statisticians // IEEE Trans. Reliab.- 1969.– Vol. R.-18, No. 2. – P. 143.
5. *Evans R. A.* Data we will never get // IEEE Trans. Reliab.– 1971.– Vol. R.-20, No. 1. – P. 20.
6. *Easterlinq G.M.* A personal view of the Bayesian controversy on reliability and statistics // IEEE Trans. Reliab.- 1972.- Vol. R.-21, No. 3. - P. 525 - 532.
7. *Беляев Ю.К.* Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность. – М.: Знание, 1982. – С. 3 - 66.
8. *Бруевич Н.Г., Мильграм Ю.Г.* К вопросу об определении вероятности безотказной работы изделия на основе накопленного опыта и самообучения // Основные вопросы теории и практики надежности. – М.: Сов. радио, 1975. – С. 7 - 26.
9. *Методика виконання експертизи (технічної оцінки) матеріалів, які приведені у додатку до звіту з аналізу безпеки діючих енергоблоків АЕС "Імовірнісний аналіз безпеки" ГНД 306.7.02/2.048-01 / Держатомрегулювання України. – К.: Держатомрегулювання України, 2001. - 61 с.*
10. *Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants (Level 1) IAEA Safety Series 50-P-4. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. – 175 p.*
11. *PRA (Probabilistic Risk Assessment) Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants NUREG/CR-2300. – Washington: US Nuclear Regulatory Commission, 1990. – 205 p.*
12. *Procedures for Conducting Independent Peer Reviews of Probabilistic Safety Assessment IAEA-TECDOC-543. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1990. – 175 p.*
13. *Надежность и эффективность в технике: Справ. В 10 т. Т. 4: Методы подобия в надежности / Под общ. ред. В. А. Мельникова, Н. А. Северцева. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.*

Надійшла до редакції 28.03.05,
після доопрацювання – 18.04.05.

А. В. Носовский, А. В. Печерица

Представлены результаты технической оценки отчетов по анализу безопасности АЭС Украины с акцентом на проблематику использования специфических и обобщенных данных по надежности тепломеханического оборудования АЭС. Приведен краткий обзор теоретических источников, описывающих байесовские подходы по объединению специфических и обобщенных данных и показана перспективность использования указанных подходов для повышения точности выполнения оценок экологического риска от эксплуатации АЭС.

14 13 APPLICATION OF BAYESIAN APPROACHES FOR DATA COMBINING UNDER ASSESSMENT OF NPP ECOLOGICAL SAFETY LEVEL

A. V. Nosovski, O. V. Pecherytsia

Results of Ukrainian NPP Safety analysis reports technical review are presented with emphasising on the problematic areas related to using of specific and generic data on NPP equipment reliability. Brief review of theoretical sources being describing the Bayesian approaches for specific and generic data combining is implemented. Advantages of those approaches are described in order to enhance the accuracy of assessment of ecological risk from NPP operation.