

М. В. Савельєв, О. В. Михайлов, Д. О. Сущенко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

Аналіз динаміки потужності експозиційної дози γ-випромінювання та щільності потоку нейтронів в об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС

Ключові слова:

Чорнобильська АЕС,
новий безпечний конфайнмент,
об'єкт «Укриття»,
прикладне програмне
забезпечення,
щільність потоку нейтронів,
потужність експозиційної дози,
регресійний аналіз

Розроблено прикладне програмне забезпечення (ППЗ) для автоматизації алгоритмів математичної обробки даних системи контролю ядерної безпеки інтегрованої автоматизованої системи контролю (СКЯБ ІАСК) комплексу «Новий безпечний конфайнмент — об'єкт «Укриття»» (НБК-ОУ) Чорнобильської АЕС. Проведено генерування звітних матеріалів щодо динаміки параметрів контролю у графічному та табличному вигляді. За результатами тестування ППЗ, розгорнутого на обчислювальній техніці в Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України, проведено машинний аналіз даних СКЯБ та отримано дані щодо загальних тенденцій у динаміці щільності потоку нейтронів (ЩПН) і потужності експозиційної дози (ПЕД) γ-випромінювання в точках контролю СКЯБ ІАСК до і після насування арки НБК у проектне положення. Зроблено висновки щодо можливості застосування розробленого інструменту автоматизації рутинних процедур аналізу масивів даних вимірювань великого об'єму для отримання інформаційних матеріалів, необхідних для оцінки стану ядерно небезпечних скупчень, локалізованих у приміщеннях комплексу НБК-ОУ. Крім стандартних форм оформлення звітних матеріалів у вигляді графіків та таблиць, запропоновано матричну форму представлення результатів аналізу кореляцій між значеннями ЩПН (або ПЕД) з метою визначення вимірювальних каналів СКЯБ ІАСК, для яких за обраний період моніторингу характерними є однакові чи протилежні тренди щодо динаміки значень параметрів контролю. Результати прогнозу динаміки ЩПН та ПЕД із використанням установлених регресійних рівнянь динаміки перевірено шляхом порівняння даних розрахунку та вимірювань станом на 1 січня 2022 р. Зроблено висновок щодо ступеня надійності прогнозування значень ЩПН та ПЕД у приміщеннях комплексу НБК-ОУ із застосуванням розробленого ППЗ.

Вступ

У 2018 р. було розроблено програму моніторингу паливовмісних матеріалів (ПВМ) об'єкта «Укриття» [1], яка включала довготривалі організаційно-технічні заходи з моніторингу стану ПВМ за кількома

напрямами. Одним з них було здійснення контролю динаміки нейтронної активності у приміщеннях комплексу «Новий безпечний конфайнмент — об'єкт «Укриття»» Чорнобильської АЕС (далі — комплекс НБК-ОУ), а також встановлення процедур виявлення та інтерпретації аномалій у динаміці щільності по-

© М. В. Савельєв, О. В. Михайлов, Д. О. Сущенко, 2022

току нейтронів (ЩПН), пов'язаних із відхиленнями від безпечних та допустимих значень параметрів критичності. У рамках Завдання 17 Плану здійснення заходів (ПЗЗ) на об'єкті «Укриття» [2] ще до насування захисної арки НБК у проектне положення була створена інтегрована автоматизована система контролю (ІАСК), однією зі складових якої є система контролю ядерної безпеки (СКЯБ) [3]. Відповідно до стратегії ПЗЗ, СКЯБ ІАСК призначалась для своєчасного виявлення негативних тенденцій, що можуть призвести до зниження рівня ядерної безпеки об'єкта «Укриття» шляхом безперервного збору, обробки, зберігання та надання експлуатаційному персоналу даних щодо динаміки ЩПН та потужності експозиційної дози (ПЕД) γ -випромінювання в точках контролю поблизу зон скупчення ПВМ. Однак виконання цього завдання накладає вимоги не тільки на персонал комплексу НБК-ОУ, який обслуговує СКЯБ ІАСК, але й на рівень машинного аналізу даних вимірювань та їхньої візуалізації. Надійне виявлення будь-якої тенденції в поведінці того чи іншого параметра контролю ІАСК та прогнозування її подальшого розвитку потребує системного аналізу багаточисельних масивів даних, що реєструються в кожному вимірювальному каналі, проходять первинну обробку і фільтрацію з використанням прикладного програмного забезпечення (ППЗ), передбаченого розробниками апаратних засобів ІАСК. Далі потоки даних передаються на сервери для подальшого зберігання. Але для виявлення стійких трендів щодо зміни параметрів контролю цього недостатньо, необхідна математична обробка накопичених масивів за певні періоди спостережень. Якщо взяти до уваги величезні об'єми інформації у цифровому форматі, що одночасно реєструються й записуються в базу даних, для оперативного визначення рівня трендів у значеннях параметрів контролю СКЯБ за певні періоди моніторингу їхня статистична обробка неможлива без автоматизації процесів формування вибірок даних та їхнього математичного аналізу. Не менш значущим є і формування за результатами машинної обробки звітної інформації у вигляді блоків узагальнених даних (графіків і таблиць), які можна було зручно аналізувати та використовувати для оцінки змін у рівні безпеки об'єкта «Укриття». У цьому аспекті для виконання основної функції СКЯБ актуальними є автоматизація виконання рутинних процедур з аналізу масивів даних вимірювань великого об'єму і формування необхідних звітних матеріалів із застосуванням спеціалізованого ППЗ.

Метою роботи є розробка ППЗ для машинного аналізу даних вимірювань ЩПН та ПЕД, що здійснюються за допомогою СКЯБ ІАСК, та оцінка його можливостей для виконання поставлених завдань за результатами тестування.

Методичні підходи щодо створення алгоритмів обробки даних СКЯБ ІАСК комплексу НБК-ОУ

Розробка алгоритмів обробки первинних результатів вимірювань та аналізу динаміки ПЕД і ЩПН поблизу зон скупчення ПВМ у комплексі НБК-ОУ за допомогою ППЗ проводилася з метою забезпечити можливість оперативно отримувати необхідну інформацію у зручному вигляді як для візуального (якісного), так і кількісного оцінювання за обраний період часу спостережень; виявляти стійкі тенденції до зміни параметрів контролю СКЯБ упродовж певного періоду моніторингу.

Вихідним джерелом для формування репрезентативних вибірок даних були численні масиви первинних результатів вимірювань, що отримуються з кожним циклом роботи вимірювальних каналів СКЯБ (1 с), обробляються, накопичуються у пристрої зв'язку з оператором (ПЗО) та зберігаються впродовж 72 год. На наступному рівні обробки даних результати вимірювань накопичуються в пристрої збору даних СКЯБ та серверах ІАСК упродовж 1 року. З метою довгострокового зберігання даних передбачена зовнішня щодо ІАСК і «старша» з ієрархічного погляду система — інтегрована база даних (ІБДУ) об'єкта «Укриття», до якої потрапляють лише ті дані ІАСК, що мають ознаку достовірності. Для цього була створена підсистема взаємодії ІАСК з ІБДУ, яка виконує функції агрегації даних, отриманих упродовж заданого інтервалу часу (1 хв), і розраховує базові статистичні показники — середнє, максимальне, мінімальне, дисперсію. Однак для надійного виявлення будь-якої тенденції в поведінці того чи іншого параметра контролю та прогнозування її подальшого розвитку цього недостатньо.

Для дослідження динаміки ПЕД і ЩПН за вибірками даних, сформованих із записів СКЯБ, необхідно отримати набір базових числових значень параметра контролю, що відповідають обраному часу інтегрування (усереднення) і регресійному рівнянню динаміки його значення за певний період спостережень. Для виконання поставленого завдання за допомогою ППЗ було визначено такий покроковий алгоритм дій:

Крок 1. Підготовка та трансформація вихідних даних для їхньої машинної обробки.

Крок 2. Машинна обробка даних і визначення базових статистичних показників параметра контролю за обраний період спостережень.

Крок 3. Визначення максимально достовірної функції для опису поведінки часового ряду (апроксимація).

Крок 4. Комплексний аналіз (за необхідності).

Крок 5. Визначення тенденцій до зміни параметра контролю, виходячи з аналізу поведінки часового ряду (результатів апроксимації) за обраною оптимальною функцією її опису.

Після виконання вищезазначеного алгоритму для кожного з параметрів контролю за результатами машинної обробки первинних даних мав бути сформований звіт, який включав таблиці значень базових статистичних показників для відповідного періоду інтегрування та такі ілюстративні матеріали:

гістограма щільності розподілу значень показника, що контролюється за період інтегрування;

графік динаміки середньодобового значення параметра контролю;

графік динаміки ковзного середнього значення параметра за тиждень контролю;

графік тренда на тлі динаміки значення показника та регресійного рівняння.

Аналіз результатів попередніх робіт щодо вивчення динаміки ЩПН та ПЕД в окремих вимірювальних каналах СКЯБ [4, 5] надав підставу вважати, що насування арки суттєво вплинуло не тільки на умови зберігання ПВМ усередині комплексу НБК-ОУ, але, власне, і на стан матеріального середовища ядерно-небезпечних скупчень (ЯНС). Тому в рамках нашої роботи єдиний масив експериментальних даних, накопичений на серверах ІБДУ, було розділено на два: масив 1, що був сформований до насування арки в проектне положення; масив 2 як джерело інформації, отриманої в умовах зберігання ПВМ після насування арки. Такий підхід для реалізації наступного етапу аналізу даних — установлення регресійних рівнянь динаміки параметрів контролю — надавав можливість: по-перше, коректно порівняти особливості динаміки значень ЩПН та ПЕД у різних умовах зберігання ПВМ і зробити прогноз до її форми з урахуванням сталого режиму зберігання ЯНС ПВМ в умовах створеної споруди комплексу НБК-ОУ; по-друге, отримати інформацію, необхідну для верифікації результатів модельних розрахунків стану розмножувального середовища ЯНС, що виконуються паралельно з отриманням експери-

ментальних даних щодо реальних значень ПЕД та ЩПН поблизу ЯНС ПВМ в об'єкті «Укриття».

Масиви даних було піддано корегуванню шляхом фільтрації аномальних результатів вимірювань, наявність яких в основному була пов'язана із впливом на роботу вимірювальних каналів масштабних будівельних і пусконаладжувальних робіт на різних системах об'єкта «Укриття» та НБК. Упродовж 2013–2019 рр. періодично з'являлися перешкоди на контурах заземлення, проводилося вимкнення (знеструмлення) електронних блоків і корегування параметрів їхнього налаштування. Після видалення аномальних результатів вимірювань відфільтровані часові ряди розглядалися як вихідні дані до реалізації наступної стадії дослідження — формування вибірок даних для визначення регресійних рівнянь динаміки параметрів контролю СКЯБ ІАСК.

Порядок пошуку кореляції між даними СКЯБ ІАСК, зареєстрованими в різних вимірювальних каналах, визначався з огляду на кінцеву мету обробки експериментальних даних, тобто перевірки висунутої гіпотези стосовно ймовірної математичної моделі досліджуваного явища та кількісної оцінки (опису) її характеристик. Для цього застосовувався відомий математичний апарат математичної статистики [6], призначений саме для того, щоб після видалення аномальних результатів на підставі оцінених характеристик вибірки даних можна було стверджувати про властивості генеральної сукупності значень параметра контролю в цілому.

Схема автоматизації алгоритмів математичної обробки даних СКЯБ ІАСК

Для автоматизації алгоритмів математичної обробки даних СКЯБ ІАСК ППЗ було написано мовою програмування Python [7] з використанням бібліотек numpy [8] і pandas [9]. Візуалізація результатів математичної обробки даних виконана з використанням бібліотеки matplotlib [10]. Загальна блок-схема автоматизації алгоритмів математичної обробки даних СКЯБ ІАСК (рис. 1) побудована з додержанням правил використання алгоритмічної мови ДРАКОН [11].

Результати та обговорення

Виходячи з наявної інформації, накопиченої на серверах ІБДУ до і після насування арки, за допомогою розробленого ППЗ і алгоритмів машинної обробки даних було отримано пакет звітної інформації

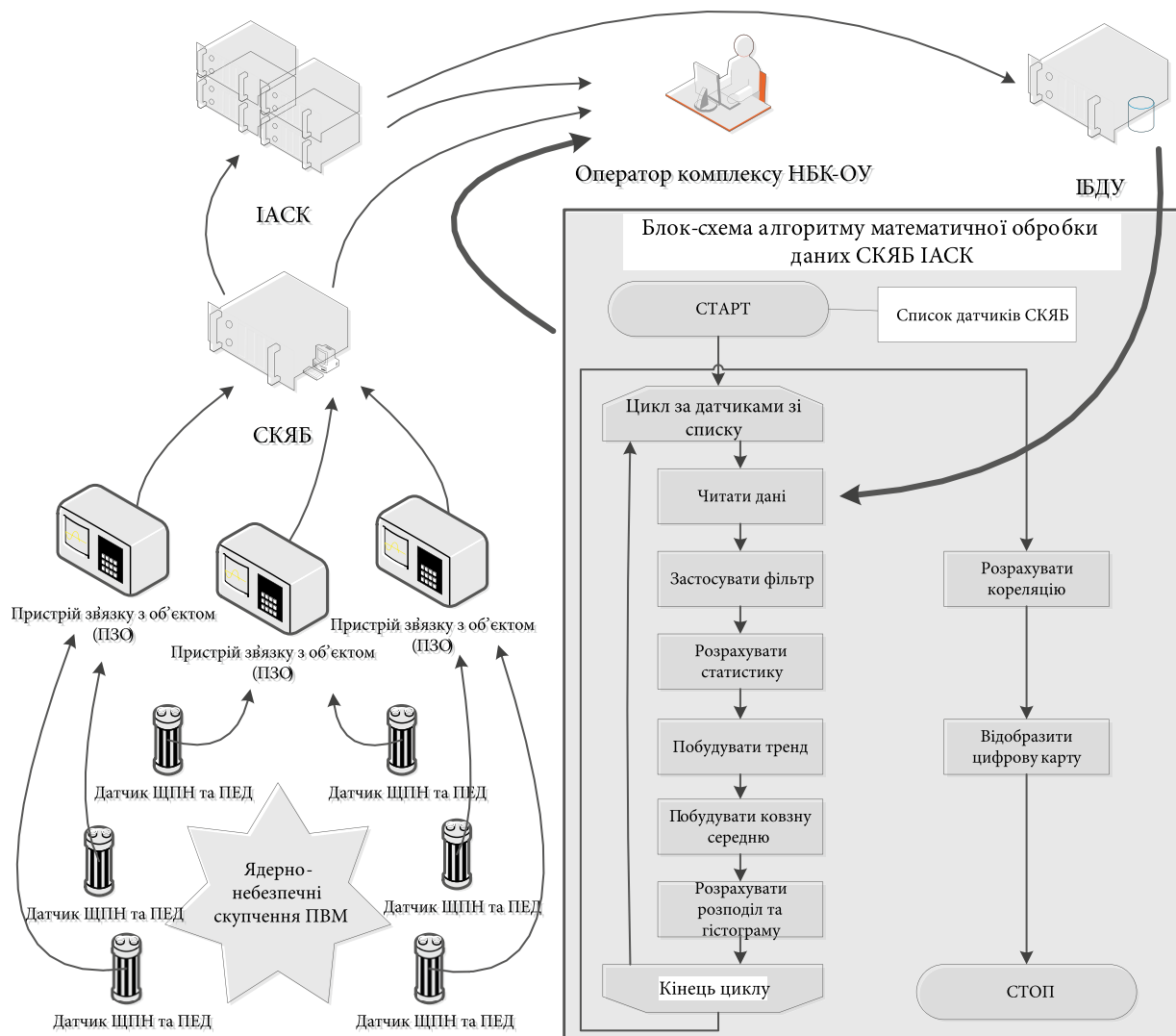


Рис. 1. Загальна схема автоматизації процесів математичної обробки даних СКЯБ ІАСК

щодо динаміки ПЕД і ЩПН в об'ємах, що відповідали поставленим завданням. На рис. 2–4 і в табл. 1 і 2 наведено приклади звітної інформації, отриманої для вимірювальних каналів (ВК) № 01, 02 і 06 СКЯБ. Ці точки контролю розташовані безпосередньо у приміщенні 305/2 об'єкта «Укриття», де, за даними [5], локалізовані ЯНС ПВМ. На рис. 5 подано приклад візуалізації результатів аналізу кореляцій між значеннями ЩПН, зареєстрованими одночасно в 16 ВК СКЯБ, у вигляді матриці парних коефіцієнтів кореляції (КК). Число в полі матриці є значенням установленого КК. У кольоровому варіанті надання такого типу інформації додатковим індикатором наближеності значення КК до -1 або $+1$ є насиченість синього чи червоного кольору елемента матриці. Найбільш яскравий колір є індикатором того, що кореляція існує. І, навпаки, якщо колір світлий, то кореляції

між значеннями параметра контролю у відповідних ВК немає.

Як видно з ілюстрацій, наведених на рис. 2–4, результати машинної обробки даних дозволили дослідити динаміку значень параметрів контролю і визначити її особливості в певні періоди спостережень. Рис. 4 показує, що результат апроксимації даних ілюструється в пакеті звітних матеріалів не тільки графіком тренду на тлі динаміки параметра контролю, але й аналітичним виразом рівняння регресії. Кожне рівняння може супроводжуватися величиною достовірності апроксимації (R^2), що дає змогу оцінити надійність машинної апроксимації даних і зробити висновок щодо прийнятності застосування регресійного рівняння для прогнозу значень параметра контролю на наступні роки. Результати апроксимації даних, зареєстрованих СКЯБ до насування арки,

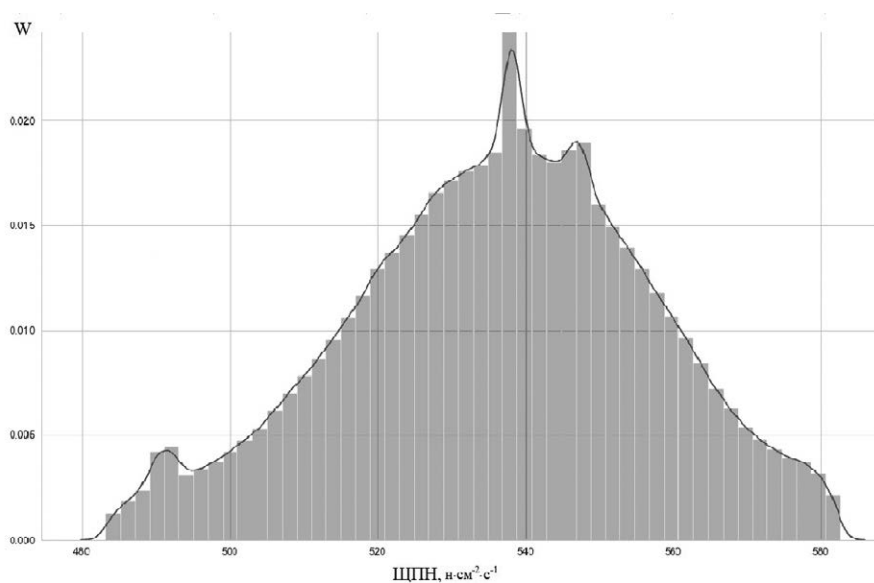


Рис. 2. Приклад відображення гістограми щільності розподілу значень ЩПН (W) за даними, зареєстрованими у ВК № 01 за період після насунання арки комплексу НБК-ОУ

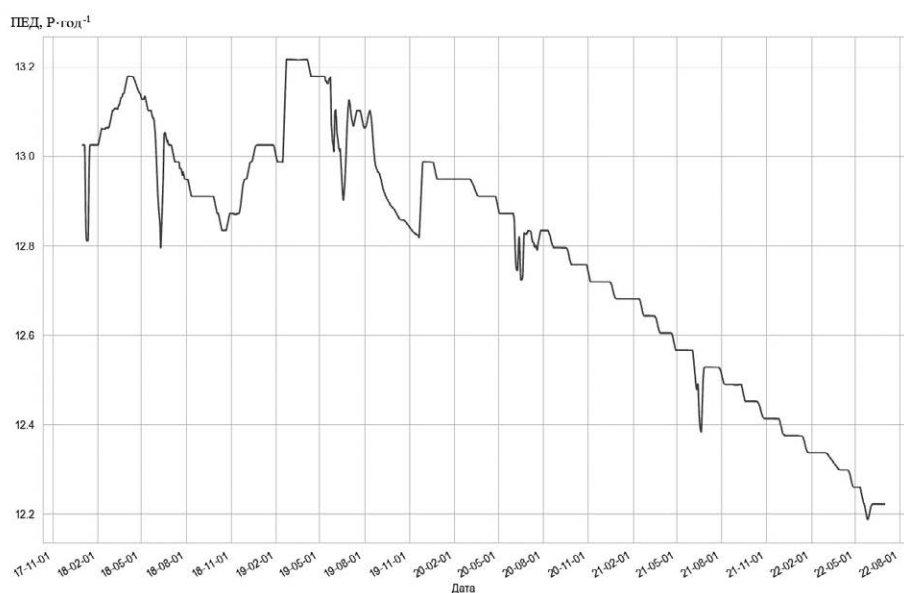


Рис. 3. Приклад відображення динаміки ковзного середньотижневого значення ПЕД за даними, зареєстрованими у ВК № 06 за період після насунання арки комплексу НБК-ОУ

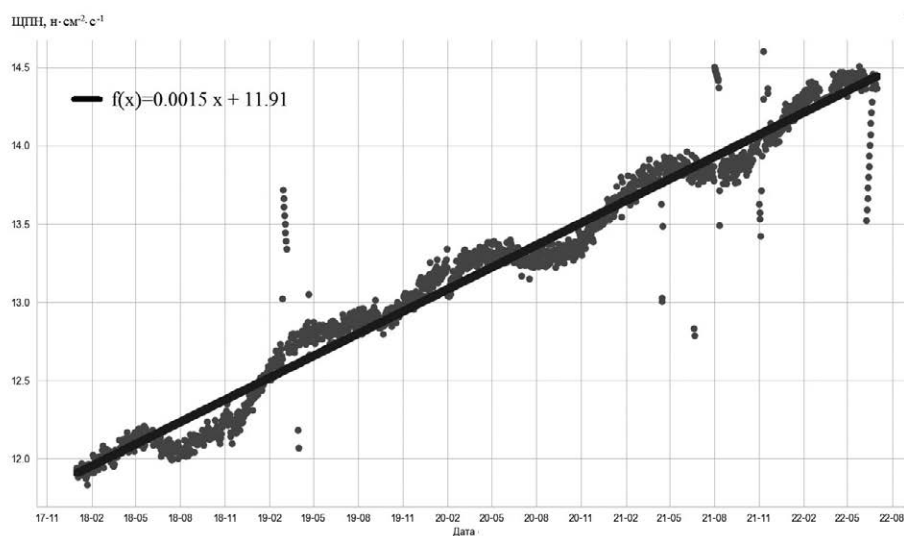


Рис. 4. Приклад відображення графіка тренду на тлі динаміки середньодобових значень ЩПН за даними, зареєстрованими у ВК № 02 за період після насунання арки комплексу НБК-ОУ

Таблиця 1. Приклад надання даних щодо середньорічної статистики значення ПЕД у ВК № 01

Рік	Середнє	Мінімальне	Максимальне	Медіана	Стандартне відхилення
2018	318,5	315,1	321,0	318,7	1,5
2019	313,6	310,5	316,4	313,4	1,6
2020	308,0	305,2	311,1	307,8	1,7
2021	302,3	299,2	305,8	302,2	1,8

Таблиця 2. Приклад надання даних щодо середньорічної статистики значення ЩПН у ВК № 01

Рік	Середнє	Мінімальне	Максимальне	Медіана	Стандартне відхилення
2018	524,3	469,3	593,9	524,7	18,4
2019	533,4	443,6	616,4	534,8	19,7
2020	538,8	468,6	600,9	539,7	19,2
2021	541,1	469,4	595,6	542,6	19,0

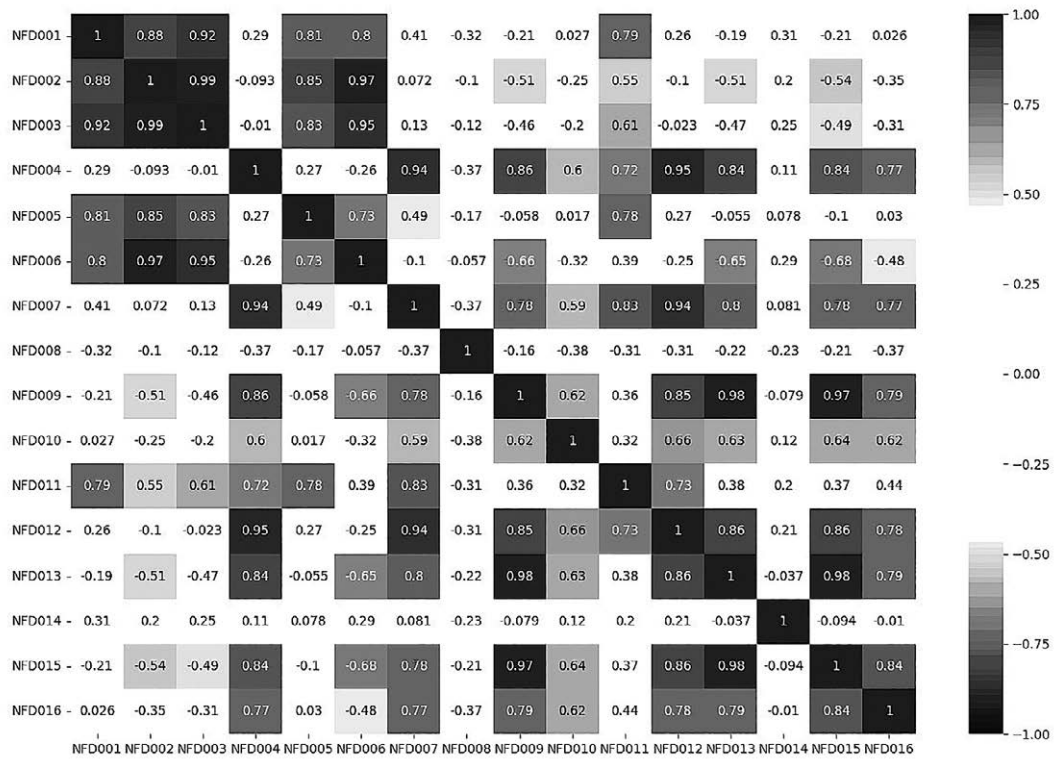
можуть мати інтерес для дослідників при порівнянні динаміки ПЕД і ЩПН в умовах існування арки з гіпотетичною ситуацією — а якби арка не була побудована взагалі. Приклад звітних матеріалів, наведений на рис. 5, достатньо показово свідчить про те, що запропонований формат подання результатів аналізу кореляцій у вигляді матриці дає змогу в одному компактному блоці інформації дати характеристику ступеня зв'язку значення параметра контролю одночасно для всіх активних вимірювальних каналів СКЯБ.

Приклад інформації, поданої на рис. 5, може свідчити про таке. По-перше, це відображення наявності або відсутності однакових трендів у динаміці значень ЩПН у різних ВК СКЯБ для обраного періоду спостережень, а також кількісна характеристика ступеня кореляції між ними. По-друге, за результатами аналізу величини КК можна дійти висновку: існує група ВК, яка характеризується наявністю стійких багаторічних тісних зв'язків між показниками ЩПН (ВК з № 01–07 на рис. 5, б). Це точки контролю ЩПН, розташовані у приміщенні 305/2 на різних висотних відмітках об'єкта «Укриття». По-третє, в окремі роки спостережень із цієї групи можуть «випадати» деякі ВК (ВК з № 04, 07 на рис. 5, а). По-четверте, наявність достатньо тісного багаторічного зв'язку між значеннями ЩПН в окремих парах ВК з № (01, 02, 03) — 16; (06, 07) — 09; (06, 07) — 16; 07–10 і 09–15 є свідченням того, що існує кореляція між ЩПН у точках контролю, розміщених у приміщенні 305/2 і суміжних приміщеннях на різних висотних відмітках.

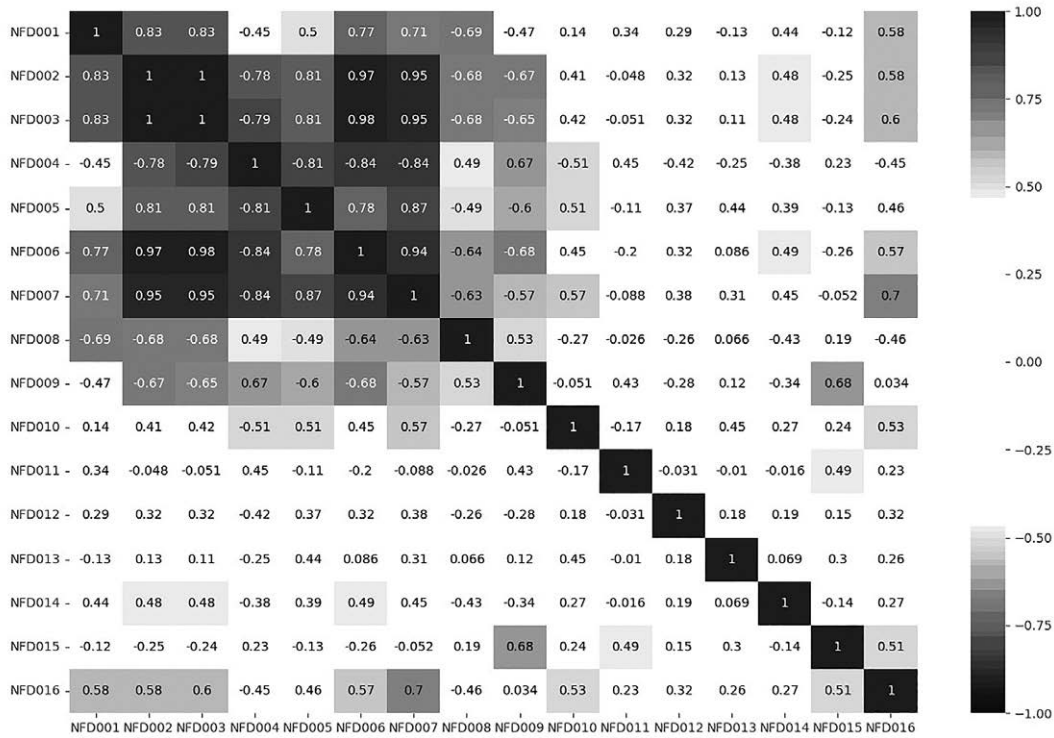
У табл. 3 наведено результати порівняння прогностичних значень ПЕД і ЩПН, оцінених за встановленими рівняннями регресії, і середньодобових значень ПЕД і ЩПН, визначених за результатами вимірювань на 1 січня 2022 р.

Таблиця 3. Результати порівняння середньодобових значень ПЕД і ЩПН, визначених за результатами машинного прогнозу та вимірювань (станом на 1 січня 2022 р.)

№ ВК	Параметр контролю	Одиниця вимірювання	Середньодобове значення параметра		Різниця,рази
			прогнозне	за результатами вимірювань	
01	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	303	299,2	0,99
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	583	550,3	0,94
02	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	48,5	48,2	0,99
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	14	14,2	1,01
03	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	24	23,85	0,99
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	83	81,9	0,99
04	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	120	121,1	1,01
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	389	383,9	0,99
05	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	179	385,4	2,14
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	4 238	2 791,5	0,66
06	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	79	38,5	0,50
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	15	12,6	0,84
07	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	0,98	0,97	0,99
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	134	135,3	1,01
08	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	115	127,7	1,11
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	38,9	40,2	1,03
09	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	1 787	1 788	1,00
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	825	852,2	1,03
10	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	171	172,4	1,01
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	330	346	1,05
11	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	66	65,6	0,99
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	86	85,3	0,99
12	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	26	26,4	1,02
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	28	27,2	0,97
13	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	2	2,06	1,00
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	7	7,3	1,02
14	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	20	20,5	1,00
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	152	145,2	0,96
15	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	28	27,9	1,00
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	238	240,9	1,01
16	ПЕД	$P \cdot \text{год}^{-1}$	79	78,8	1,00
	ЩПН	$H \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	35	36,2	1,03



а



б

Рис. 5. Приклади надання результатів машинної обробки даних СКЯБ у вигляді матриці парних коефіцієнтів кореляції між значеннями ЩПН у різних ВК: а — 2017 р.; б — 2017–2021 рр.

Як можна переконатись, дані машинного прогнозу ПЕД та ЩПН за рідкісним винятком збігаються з даними вимірювань з високим ступенем точності. Різниця в даних приблизно вдвічі виявлена для ПЕД і ЩПН лише у двох ВК, для яких достовірність апроксимації рівнянням регресії була оцінена як низька. Можна сподіватися, що в майбутньому виявлені одиничні розходження зі збільшенням тривалості часу спостережень будуть нівельовані і збіг даних прогнозу та вимірювань становитиме 100 %.

Висновки

1. Реалізація методичних підходів щодо машинної обробки численних масивів даних ПЕД та ЩПН, що реєструються в базі даних ІАСК за результатами безперервного моніторингу параметрів контролю, дозволила за допомогою розробленого ППЗ отримати пакет звітної інформації, що змістовно відображає результати аналізу динаміки ПЕД та ЩПН за обраний період спостережень у графічному та табличному вигляді.

2. Результати тестування ППЗ показали, що застосування алгоритмів машинної обробки даних дає змогу з високою точністю прогнозувати середньодобові значення ПЕД та ЩПН у вимірювальних каналах СКЯБ ІАСК. Відмічені розбіжності носять одиничний характер і можуть бути нівельовані впродовж наступних періодів спостережень.

3. Форма подання результатів аналізу кореляцій у матричному вигляді дозволяє наочно і кількісно визначити наявність або відсутність однакових трендів у динаміці ЩПН або ПЕД одночасно в усіх вимірювальних каналах СКЯБ ІАСК за обраний період контролю. Це дає змогу оперативно оцінити інтегровану картину зміни стану ПВМ за результатами зіставлення особливостей динаміки значень параметрів контролю в окремих точках контролю СКЯБ ІАСК.

Автори висловлюють подяку за допомогу під час виконання цієї роботи керівництву та співробітникам Чорнобильської АЕС, а також заступнику директора технічного (по об'єкту «Укриття») С. Кондратенку, керівнику та співробітникам цеху експлуатації об'єкта «Укриття» (НБК) С. Поплігину та В. Кузьменку, керівнику та співробітникам ВІТіОС С. Гончарову, В. Підоренку, О. Сахно, Ю. Гармаш, керівнику та співробітникам ЦТАІ В. Воробью, П. Котюху, С. Зайцю, керівнику та співробітникам відділу стратегічного планування Д. Стельмаху, С. Сверчкову, Ф. Ланських.

Список використаної літератури

1. Програма моніторингу паливовмісних матеріалів (ПВМ) ОУ (ядерна та радіаційна безпека ОУ). Погоджено Державною інспекцією ядерного регулювання України 11.07 2019 р. — ДСП «Чорнобильська АЕС». Інв. ТВ № 04 від 12.08.2019. — 72 с.
2. Shelter Implementation Plan of 31 May 1997 (Approved within the Law of Ukraine “On Ratification of the Framework Agreement between Ukraine and European Bank for Reconstruction and Development on Chornobyl Shelter Fund Operation in Ukraine”). — Brussels : TACIS, 1997. — 310 p.
3. Об'єкт «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента / В. О. Краснов, А. В. Носовський, С. А. Паскевич [та ін.]; під заг. ред. А. В. Носовського. — Чорнобиль: ІПБ АЕС НАН України, 2021. — 344 с.
4. Высотский Е. Д. Динамика нейтронной активности и подкритичность ядерно-опасного скопления в условиях комплекса НБК-ОУ / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. О. Дорошенко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2018. — Вып. 30. — С. 78–87.
5. Высотский Е. Д. Экспертная оценка текущего уровня подкритичности скоплений топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» после установки нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун // Nuclear Power and the Environment. — 2020. — № 1 (16). — С. 49–56.
6. Ross S. M. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists / S. M. Ross. — Third Edition. USA : Elsevier Academic Press, 2004. — 641 p.
7. Van Rossum G. Python reference manual / G. Van Rossum, F. L. Drake Jr. — Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica, 1995.
8. Harris C. R. Array programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, et al. // Nature. — 2020. — Vol. 585. — P. 357–362. — doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.
9. McKinney W. Data structures for statistical computing in python / W. McKinney // Proceedings of the 9th Python in Science Conference. — 2010. — Vol. 445. — P. 51–56.
10. Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment / J. D. Hunter // Computing in Science & Engineering. — 2007. — Vol. 9, no. 3. — P. 90–95.
11. Parondzhanov V. D. Visual Syntax of the DRAKON Language / V. D. Parondzhanov // Programming and Computer Software. Official English Translation of Programmirovanie. — 1995. — Vol. 21. — P. 142–153.

M. V. Saveliev, O. V. Mykhailov, D. O. Sushchenko

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

Analysis of Exposure Dose Rate and Neutron Flux Density Dynamics in the Shelter Object of the Chornobyl NPP

Application software was developed for automating the algorithms of mathematical data processing of the nuclear safety monitoring system of the integrated automated monitoring system (NSMS IAMS) of the New Safe Confinement — Shelter Object complex (NSC-SO) at the Chornobyl NPP. The developed software was tested and deployed on computing equipment at the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants. The machine analysis of the NSMS's data was carried out and results were obtained in form of general trends in the dynamics of the neutron flux density (NFD) and the γ -radiation exposure dose rate (EDR) and another graphical and tabular format. The machine analysis was performed both on the data before and after installing the Arch of NSC into the design position over the Shelter Object. Conclusions were made regarding the possibility of applying the developed tool for automating routine procedures for the analysis of multiple arrays of measurement data to obtain information necessary for assessing the state of nuclear hazardous clusters located in the NSC-SO. In addition to the standard forms of reporting materials in the form of graphs and tables, a matrix form of presenting the results of the correlation-regression analysis is proposed, which allows you to visually assess the degree of interrelationships between the values of the control parameters simultaneously in all measuring channels of the NSMS IAMS. The results of the forecast of the NFD and EDR dynamics using the established regression functions were verified by comparing the calculation and measurement data as of January 1, 2022. A conclusion was made regarding the degree of reliability of forecasting the values of the NFD and EDR in the NSC-SO using the developed software.

Keywords: Chornobyl NPP, New Safe Confinement, Shelter object, application software, neutron flux density, exposure dose rate, regression analysis.

References

1. SSE ChNPP (2019). Program of fuel-containing materials' monitoring of the SO (nuclear and radiation safety of the SO). Approved by the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, dated 11.07.2019. Inv. no. 04 dated 12.08.2019, 72 p. (in Ukr.)
2. Shelter Implementation Plan, dated May 31, 1997. Approved within the Law of Ukraine "On Ratification of the Framework Agreement between Ukraine and European Bank for Reconstruction and Development on Chornobyl Shelter Fund Operation in Ukraine". Brussels: TACIS, 1997, 310 p.
3. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Paskevych S. A., Rudko V. M.; A. V. Nosovskyi (ed.) (2021). *Obiekt "Ukryttia" v umovakh novoho bezpechnoho konfainmenta* [The Shelter Object in Conditions of the New Safe Confinement]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 344 p. (in Ukr.)
4. Vysotskyi Ye. D., Godun R. L., Doroshenko A. O. (2018). [The dynamics of neutron activity and subcriticality level of a nuclear-dangerous cluster in the conditions of NSC-SO complex]. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, vol. 30, pp. 78–86. (in Russ.)
5. Vysotskyi Ye. D., Sushchenko K. O., Godun R. L. (2020). [Expert assessment of the current criticality level of cluster of fuel-containing materials after the New Safe Confinement installing]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 16, no. 1, pp. 49–56. (in Rus.)
6. Ross S. M. (2004). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. Third Edition. USA: Elsevier Academic Press, 641 p.
7. Van Rossum G., Drake Jr. F. L. (1995). *Python reference manual*. Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica.
8. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, vol. 585, pp. 357–362. doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.
9. McKinney W. (2010). Data structures for statistical computing in python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, vol. 445, pp. 51–56.
10. Hunter J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95.
11. Parondzhanov V. D. (1995). Visual Syntax of the DRAKON Language. In: *Programming and Computer Software. Official English Translation of Programmirovaniye*, vol. 21, pp. 142–153.

Надійшла 03.10.2022

Received 03.10.2022