

**І. А. Хомич, Т. В. Ковалінська\*, В. І. Сахно, Ю. В. Іванов***Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: sungel@i.ua

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАХОДІВ КВАЛІФІКАЦІЇ  
ОБЛАДНАННЯ, ВАЖЛИВОГО ДЛЯ БЕЗПЕКИ У ВІТЧИЗНЯНІЙ ЯДЕРНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ**

Аналізуються результати впровадження кваліфікації обладнання, критичного для ядерної і технічної безпеки вітчизняних АЕС, особливо важливих для здійснення програми подовження термінів позапроектної експлуатації енергетичних реакторів, які ще потенційно здатні використовуватися як потужні джерела електроенергії. На основі порівняння опублікованих показників надійності вітчизняних АЕС до та після введення кваліфікації показано, що все ще існують проблеми, які вимагають вирішення. Розглядається перспектива подальшого підвищення надійності експлуатації вітчизняної ядерної енергетики шляхом впровадження методів радіаційних функціональних випробувань, що вже тривалий час розробляються в ІЯД НАН України. В основі цього методу докладне дослідження, а потім й оперативний контроль усіх процесів, що відбуваються в критичному обладнанні в будь-яких режимах роботи ядерних реакторів для формування ресурсної історії обладнання та надання on-line оператору об'єкта оперативної інформації про залишковий ресурс та очікуваний час його відмови.

*Ключові слова:* ядерний енергетичний реактор, надійність, критичне обладнання, кваліфікація, радіаційні функціональні дослідження.

**1. Вступ**

Проблеми надійності в ядерній енергетиці є традиційними напрямками науково-практичної діяльності Інституту ядерних досліджень НАН України (далі - ІЯД) [1 - 6] та інших вітчизняних наукових організацій. Останній період прогресу у справі підвищення надійності в ядерній енергетиці пов'язаний з помітним зростанням внеску різноманітного комплекуючого обладнання ядерних енергетичних об'єктів у формуванні аварійних ситуацій на діючих АЕС [7, 8]. Досвід свідчить, що експлуатація обладнання на ядерних об'єктах призводить до прискореної втрати ним своїх параметрів, що сприяє більш частому виникненню аварійних ситуацій. Деякі групи комплекуючого обладнання потім було названо «критичним» за їхнім внеском у загальну надійність енергетичної установки.

Останнім часом акцент досліджень змістився від традиційних проблем міцності реакторної сталі і корпусів ядерних реакторів до контролю за станом обладнання, яке входить до складу цих найбільш потужних технічних об'єктів енергетики [9 - 11]. Створено цілий комплекс профілактичних заходів для виявлення пошкоджень і запобігання аварій [12 - 14]. Але використання в рамках одного блока всіх процедур, метою яких є забезпечення відповідного рівня працездатності обладнання систем, що є важливими для безпеки, з урахуванням їхнього взаємозв'язку – дуже три-

валій, громіздкий і технічно складний процес. З 2004 р. під егідою МАГАТЕ запропоновано ввести до переліку обслуговуючих робіт на АЕС обов'язкову єдину систему кваліфікації обладнання [15 - 17]. Цими документами встановлюється, що «кваліфікація – це комплекс заходів, метою яких є визначення того, що обладнання протягом усього періоду експлуатації здатне виконувати проектні функції безпеки в умовах впливів навколишнього середовища, екстремальних зовнішніх подій та аварій (вібрація, магнітні та електричні поля, значна температура, тиск, радіація, корозійно-активне середовище, вологість), враховуючи деградацію обладнання внаслідок старіння [17, 18]. На рис. 1 і далі використовується традиційна символіка, уперше запропонована ще в минулому столітті в [8, 14].

Передбачалось, що реалізація системи кваліфікації в Україні дозволить підняти рівень загальної та ядерної безпеки експлуатації вітчизняних АЕС і є необхідною складовою ефективного використання та подальшого прогресу ядерної енергетики, як це визначено Постановою Уряду України № 1553 (2000 р.) про пріоритет безпеки експлуатації АЕС над будь-якими виробничими цілями. Кваліфікація обладнання проводиться з метою встановлення, що воно спроможне відповідати установленим вимогам з ядерної та радіаційної безпеки протягом заданого часу в будь-яких передбачених проектом умовах експлуатації на АЕС [30]. «...Ціль кваліфікації полягає в

підтвердженні здатності різних частин обладнання систем безпеки, з засобами узгодження включно, виконувати свої функції у визначених експлуатаційних і зовнішніх умовах...» [31]. У результаті кваліфікації передбачалось об'єктивно встановлювати межі надійної працездатності АЕС визначенням технічного стану обладнання в їхньому складі, який характеризується поточни-

ми значеннями сукупності параметрів, з переліку регламентованих технічною документацією (ТУ) на об'єкт [17]. Регламентовано, що підвищення ефективності експлуатації електротехнічного обладнання та кабельної продукції з дотриманням нормативно-зумовлених показників надійності є важливою частиною загальної проблеми забезпечення надійності та ядерної безпеки АЕС.



Експертні висновки щодо відповідності параметрів обладнання ТУ  
Рис. 1. Комплекс заходів кваліфікації критичного обладнання АЕС.

Юридичною основою впровадження кваліфікації є закони України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії», «Квалификация оборудования и технических устройств. Общие требования» НАЕК «Енергоатом» та ін. [16, 18, 19]. Враховуючи велику кількість заходів і нормативних регулюючих документів, очікувалось отримання значного зростання показників надійності кваліфікованого обладнання. За підсумками НАЕК «Енергоатом» в Україні цей процес було фактично завершено до 2008 р.

Після 10-річного періоду експлуатації вітчизняних АЕС із застосуванням кваліфікації актуальним є завдання проаналізувати результати цього етапу підвищення надійності в ядерній енергетиці й визначити науково обґрунтовані шляхи його подальшого прогресу. Для оцінки ефективності кваліфікації, як особливо важливого заходу вирішення Національної програми продовження терміну експлуатації АЕС, була вибрана стратегія порівняння динаміки відмов в обладнанні вітчизняних АЕС до та після освоєння кваліфікації [19].

## 2. Дослідження

Відповідність реально отриманих результатів, поставлених завданням кваліфікації, досліджувалась аналізом опублікованих статистичних даних [20, 21]. З нього видно, що для подальшої надійної експлуатації комплектуючого критичного обладнання все ще існує низка проблем, які вимагають вирішення.

На рис. 2 наведено динаміку відмов в електротехнічному критичному обладнанні АЕС у різні періоди.

Впровадження кваліфікації дало змогу частково вирішити найбільші проблеми експлуатації об'єктів ядерної енергетики. Майже у 2 рази зменшився відсоток відмов в електротехнічному обладнанні. Але водночас стала актуальною проблема подальшого удосконалення процесів конструювання та експлуатації ядерних енергетичних установок, особливо в частині комплектуючого критичного обладнання. Наприклад, із графіків рис. 2 видно, що незважаючи на кількісне покращення показників технічної надійності обладнання зберіглася і продовжує прогресувати тенденція до збільшення кількості відмов. Цей показник уже впритул наблизився до рівня 2001 р., коли це стало причиною активної розробки нових методів контролю (кваліфікації) за обладнанням.

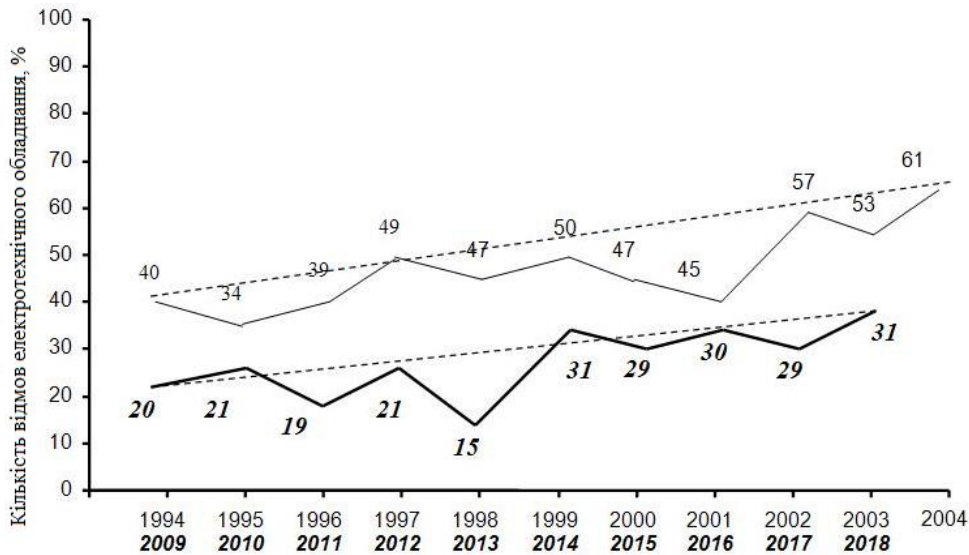


Рис. 2. Динаміка відмов в електротехнічному критичному обладнанні АЕС у період 1994 - 2004 рр. до впровадження кваліфікації (верхній графік) та в результаті впровадження кваліфікації у період 2009 - 2018 рр. (нижній графік).

Показовим також є порівняльна інформація, наведена на рис. 3.

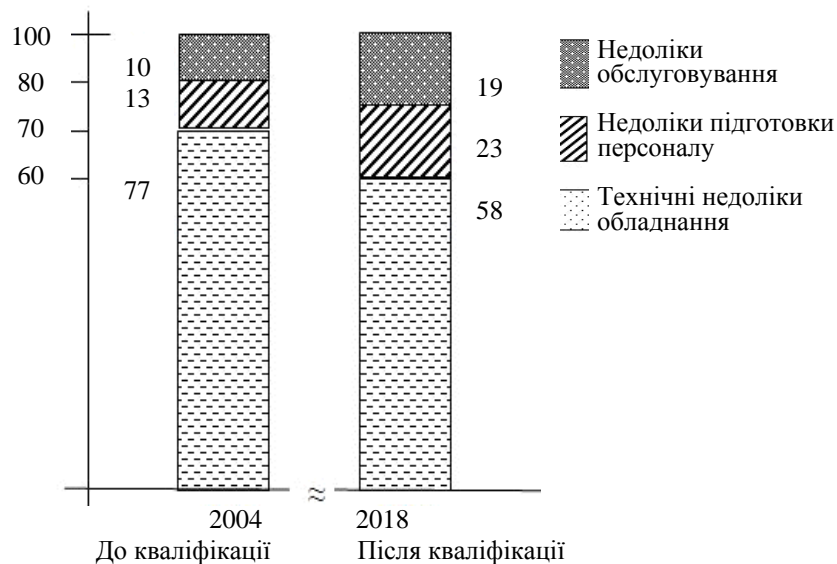


Рис. 3. Відсоток відмов електротехнічного обладнання на АЕС України.

У результаті здійсненої кваліфікації на вітчизняних АЕС загальна кількість відмов через надійність критичного обладнання зменшилася з 77 до 58 %. Це позитивний результат. Але одночасно викликає стурбованість зростання відмов електротехнічного обладнання через падіння якості обслуговування та зниження кваліфікації персоналу.

Аналіз отриманої функції відмов у кваліфікованому критичному обладнанні АЕС показує, що він повністю відповідає відомим ефектам управління надійністю за рахунок планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Функція відмов обладнання після кваліфікації співпадає з динамікою експлуатаційної надійності обладнання з проведенням традиційних ППР.

Відомо, що експлуатація нового обладнання

характеризується початковим зростанням відмов через дрібні заводські дефекти, які поступово усуваються в обсязі ППР, і крива відмов виходить у мінімум та стабільна певний проміжок часу, аж поки не починають відчуватися ефекти комплексного старіння обладнання. А далі, якщо вчасно не продовжувати проводити ППР, кількість відмов поступово зростає за відомою експоненціальною залежністю. З огляду на отримані результати кваліфікації актуальним є пошуки шляхів подальшого підвищення експлуатаційної надійності вітчизняної ядерної енергетики і висновки чи пропозиції, які можна зараз зробити. З вищенаведеного аналізу слід визнати як доведеною фундаментальність і перевагу класичних законів надійності в техніці, яку безперспективно

пробувати змінити формальними і навіть дорогими адміністративними заходами. Це питання активно досліджується ще з 1990-х років фахівцями провідних ядерних центрів у різних країнах, у тому числі й в ІЯД. Тут було науково обґрунтовано й експериментально доведено перспективність прогресу технічної надійності в ядерній енергетиці шляхом впровадження *радіаційних функціональних випробувань* комплектуючого обладнання АЕС.

### 3. Резюме

Впровадження кваліфікації лише частково вирішило завдання підвищення надійності АЕС і було ефективним лише деякий час. Це підтверджує необхідність уведення в експлуатацію АЕС практики радіаційних функціональних випробувань критичного обладнання [22, 3] і створення умов щодо залучення штучного інтелекту для контролю та прогнозування поведінки об'єкта в усіх його режимах, від стаціонарного до аварійного.

### 4. Пропозиції

В ІЯД розробляється методика завчасного розпізнавання та запобігання аварій на АЕС, яка базується на системі радіаційних методів дослідження функціональної стабільності обладнання (особливо з переліку того, яке критичне для експлуатаційної безпеки) за допомогою електрофізичної техніки [23 - 25]. Ця система передбачає докладне вивчення й постійний контроль при експлуатації всіх процесів, що відбуваються в обладнанні в будь-яких режимах роботи ядерних об'єктів, – у стаціонарних і перехідних процесах під впливом керуючих системних команд, а також аварійних під впливом зовнішніх негативних впливів і збурень. Вона принципово відрізняється від програми кваліфікації обладнання.

В основі кваліфікації покладено врахування послідовності процесів старіння обладнання під дією експлуатаційних та зовнішніх факторів оперативним персоналом АЕС. Хоча більш логічним є вимагати таких даних від виробників комплектуючого обладнання з їхньою юридичною відповідальністю за надану інформацію.

Радіаційні функціональні випробування є комплексною програмою визначення реакції обладнання на зміну тих чи інших вхідних чи зовнішніх факторів. Функціональні випробування здійснюються в реакційній камері спеціалізованої радіаційної техніки шляхом імітації, у тому числі й одночасно експлуатаційних та зовнішніх режимів обладнання в його робочому режимі. Кінцева мета – отримання системи рівнянь, які описують стан обладнання в стаціонарному, перехідному та аварійному режимах і дозволять математично обчислювати його поведінку (а фактично – доступний ресурс) on-line з оператором об'єкта.

Було науково обґрунтовано, що лише таким чином можна отримати інформацію про *очікуваний час* (а не ймовірність) відмови обладнання в тих чи інших режимах експлуатації. Важливо, що така інформація може надаватися оператору на об'єкті в реальному часі і як відповідь на будь-які його команди. На даний час в ІЯД продовжуються дослідження цієї проблеми й запропоновано подальше вдосконалення радіаційних функціональних методів на електрофізичній техніці. На цьому етапі розробляються шляхи доповнення функціональних випробувань додатковими радіаційними випробуваннями матеріалів на дослідницькому ядерному реакторі. Це суттєво покращить точність прогнозів, бо сучасне електротехнічне обладнання вже насичене масою нових синтетичних матеріалів, для яких недостатньо (а інколи й взагалі немає) інформації про радіаційну стійкість і динаміку численних процесів деградації структури їх під спільним впливом радіації з іншими експлуатаційними та зовнішніми несприятливими факторами.

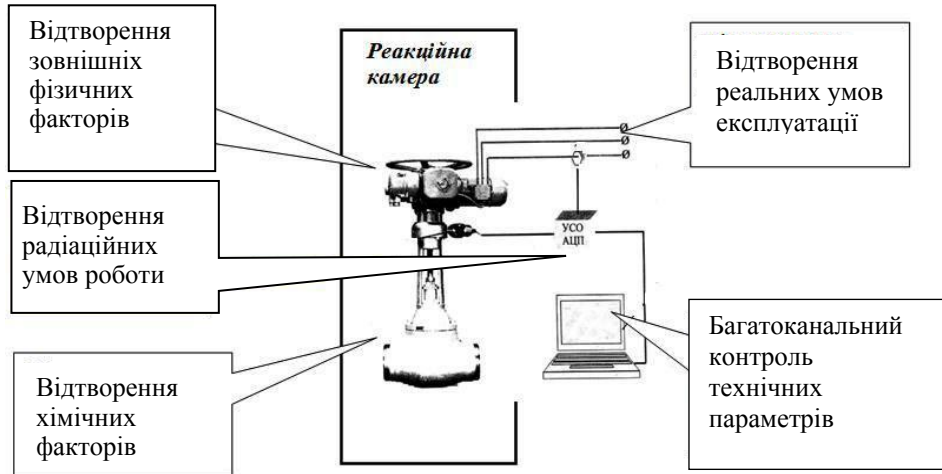
Яскравим свідченням ефективності використання радіації для функціональних випробувань є блискучі результати харківських учених [26], які з успіхом застосували радіаційні методи випробувань із залученням сучасної електрофізичної техніки для тестування та кваліфікації виробів машинобудування (лопаток газотурбінних двигунів). Було доведено ефективність методів радіаційних функціональних випробувань за допомогою релятивістських електронів визначати *граничні значення* радіаційного й термічного впливів, при яких вироби здатні зберігати експлуатаційні характеристики, та моделювати старіння лопаток за допомогою рівнянь радіаційної та ядерної фізики для розрахунків експлуатаційних можливостей.

Аналіз причини надто обмеженого поширення методів радіаційних функціональних випробувань в ядерній енергетиці показав, що це обумовлене відсутністю необхідних радіаційних технічних засобів для здійснення їх. Хоча справедливо зазначити, що в період уведення кваліфікації обладнання вітчизняних АЕС було організовано кілька локальних сертифікаційних організацій для випробування деяких груп комплектуючих виробів. Але цієї кількості зовсім недостатньо для виконання всього обсягу кваліфікації, а тим більше там неможливо проводити радіаційні функціональні випробування й детально вивчати всі складові процесів деградації їх. Для вітчизняної ядерної енергетики повинна бути створена власна мережа спеціалізованих сертифікаційних закладів, атестованих відповідним чином.

Прототипом може бути багатоцільовий радіаційний стенд, спорудження якого завершається в ІЯД на базі потужного прискорювача електронів [27]. Випробування та сертифікація електротех-

нічного обладнання АЕС (з числа критичного для надійності) здійснюється в розширеному просторі реакційної камери (рис. 4), достатньому для встановлення там широкої номенклатури комплектного електротехнічного та електромеханічного обладнання з гермозони енергетичних ядерних реакторів АЕС. Вибір цієї групи обумовлений вимогами програми кваліфікації облад-

нання, де передбачено, що найбільш уразливими є комплекси електротехнічного та електромеханічного обладнання, яке великою мірою впливає на показники експлуатаційної надійності АЕС. У реакційній камері стенда при випробуваннях передбачається імітація більшості експлуатаційних і кліматичних факторів, характерних для ядерного об'єкта (з радіаційними включно).



Електрофізична радіаційна установка

Рис. 4. Схема стенда для радіаційних функціональних випробувань в ІЯД.

Суть запропонованих радіаційних функціональних випробувань полягає в дослідженнях об'єкта в його робочому режимі коливання (по черзі або й одночасно) усіх його вхідних параметрів та навантажень. На радіаційному стенді (див. рис. 4) є можливість докладного вивчення характеристик обладнання в усіх можливих режимах роботи й отримати інформацію про реакцію на вплив усіх експлуатаційних і зовнішніх факторів у стаціонарному  $W$ , перехідному  $J$  і критичному  $I$  режимах. В основу моделі покладено принцип системного аналізу, який визначає, що будь-який об'єкт характеризується взаємною

дією масиву вхідних параметрів з метою отримання кінцевого продукту з необхідними характеристиками. Установлення точного взаємозв'язку між ними й вихідним параметром є завданням нелінійного програмування й важко піддається прямому математичному моделюванню та обчисленню в реальному часі. Тому на стенді пропонується дослідити і сформулювати максимально вичерпний масив даних про параметри (стан) піддослідного обладнання в усіх режимах роботи. Методично це задача встановлення функції відгуку функціонального стану об'єкта на коливання його вхідних параметрів (рис. 5).

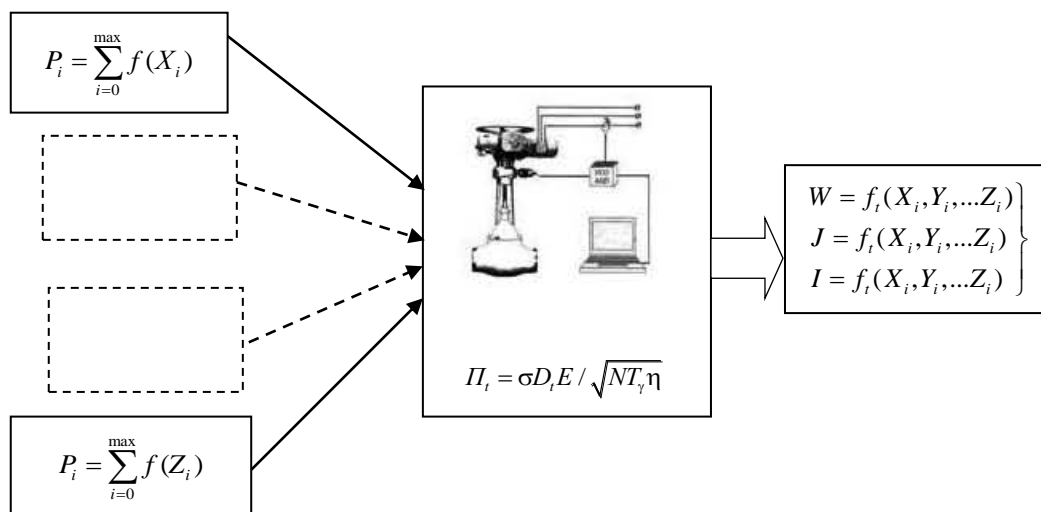


Рис. 5. Методика дослідження функцій відгуку піддослідного обладнання на зміни його вхідних параметрів (експлуатаційних та зовнішніх умов).

Такі дослідження рекомендовані в теорії систем автоматичного регулювання, яка охоплює широке коло об'єктів з різними зв'язками між їхніми вхідними й вихідними параметрами. Результати радіаційних функціональних досліджень за такою методикою дає систему рівнянь, яка є математичною моделлю об'єкта. Це дає змогу розрахувати функцію надійності обладнання й визначити найбільш важливі (критичні) для надійності параметри, установити вимоги стабільності чи періодичності контролю цих параметрів, визначити ресурсні показники в поточний і подальші періоди експлуатації, визначити очікуваний час відмови.

На стенді передбачено можливість опромінювати об'єкти різними видами радіації, характерними для гермозон ядерних реакторів по фракційно, а також їхніми суперпозиціями в різних співвідношеннях.

Використання радіаційного стенда на базі науково-технологічної установки ІЯД [25, 26] дає змогу удосконалити діючі технології кваліфікації обладнання АЕС і врахувати в експертних висновках численні супутні ефекти радіації, наприклад продукти іонізації оточуючого середовища в місці розташування обладнання [27], оскільки некоректно формувати експертні висновки лише на підставі аналізу відомих (проектних, розрахованих за моделями) величин, наприклад концентрацій хімічно-активних рідин і випаровувань. Таких даних недостатньо для точного встановлення залишкового ресурсу електротехнічного обладнання, тому що для цього важливим є врахування впливу радіаційно обумовлених електричних полів, виникнення наведених електричних потенціалів, реакцій між різними групами продуктів радіолізу тощо. Усі необхідні дослідження, з урахуванням вищенаведеного, передбачено здійснювати одночасно в реакційній камері з використанням мегавольтних

електронів на електрофізичній радіаційній установці ІЯД [28] (див. рис. 4).

## 5. Висновки

З аналізу результатів підвищення надійності в ядерній енергетиці, досягнутих кваліфікацією критичного обладнання, можна зробити висновки, що для підвищення надійності експлуатації вітчизняної ядерної енергетики необхідно прискорити впровадження в практику експлуатації АЕС методів радіаційних функціональних випробувань. Це особливо важливо з огляду на подовження термінів позапроектної експлуатації ядерних реакторів, які вже фізично відпрацювали регламентні терміни, але ще потенційно здатні використовуватися як потужні джерела електроенергії при умові відповідного науково обґрунтованого вдосконалення технології експлуатації їх та створення оперативних методів контролю надійності. Запропоновані в ІЯД радіаційні методи випробувань сприяють і створюють умови для поширення в ядерній енергетиці автоматичних систем контролю за станом ядерного об'єкта та прогнозування його поведінки в найближчі й віддалені терміни. Лише в таких системах автоматично виключається вплив наведених на рис. 3 «людських» факторів [29].

З аналізу видно, що розробка для вітчизняної ядерної енергетики імітаторів, здатних випробувати критичне обладнання в їхніх робочих режимах при дії всіх експлуатаційних та аварійних факторів, є актуальною й економічно обґрунтованою задачею. На даному етапі цих робіт в ІЯД необхідно завершити роботи по «радіаційній» частині проекту – забезпечити імітацію «чистих» радіаційних полів та їхніх суперпозицій у великих об'ємах реакційної камери експериментальної радіаційної науково-технологічної установки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. С.И. Азаров, В.И. Сахно, В.В. Токаревский. Основные концепции системы предупреждения пожаров на АЭС. Препринт Ин-та ядерных исследований. АН УССР КИЯИ-90-8 (К., 1990) 12 с.
2. Разработка и исследование методов и средств контроля и прогнозирования взрывопожарных ситуаций на объекте «Укрытие». НТО о НИР по теме 42/91-49 (К.: ИЯИ АН Украины, 1992) 140 с.
3. В.И. Сахно, С.П. Томчай. Исследование проблем термоконтроля и создания систем раннего распознавания и предупреждения аварийных пожарных ситуаций на силовых кабельных коммуникациях АЭС. В кн.: *Международ. конф. УкрЯО «Безопасность и защита АЭС»* (Одесса, 1997) с. 22.
4. В.І. Сахно, С.П. Томчай, О.В. Сахно. Дослідження радіаційно-стимульованих факторів деградації обладнання АЕС. *Ядерна фізика та енергетика* 1(2) (2000) 102.
5. I.M. Vyshnevskiy et al. Radiation test of NPP's equipment. In: *Proc. Intern. Conf. "Current Problems in Nucl. Phys. and At. Energy"*, Kyiv, Ukraine, May 29 - June 3, 2006 (Kyiv, 2007) p. 838.
6. I.M. Vyshnevskiy et al. The problems of radiation methods usage of testing the NPP's equipment. In: *Proc. Intern. Conf. "Current Problems in Nucl. Phys. and At. Energy"*, Kyiv, Ukraine, June 9 - 15, 2008 (Kyiv, 2009) p. 699.
7. Н.А. Штейнберг, Ю.А. Каменев. Влияние качества электротехнического оборудования на функционирование атомной станции. *Электрические станции* 4 (1992) 41.
8. Г.Г. Счастливый, Г.М. Федоренко. Проблема надежной и безопасной эксплуатации электро-

- технического оборудования АЭС. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение 2-3 (62-63) (1994) 133.
9. [Международная шкала ядерных и радиологических событий \(ИНЕС\). Руководство для пользователей \(Вена: МАГАТЭ, 2010\).](#)
  10. В.И. Сахно. Техническая диагностика и защита оборудования ядерно-физических установок. [Препринт Ин-та ядерных исслед. НАН Украины КИЯИ-95-3 \(К., 1995\) 6 с.](#)
  11. С.П. Томчай. Розробка методів підвищення працездатності систем автоматизованого захисту обладнання АЕС. Автореф. дис. ... канд. техн. наук (Одеса, 1996) 14 с.
  12. О.В. Сахно. Проблеми експлуатації кабельних мереж на АЕС. [Препринт Ін-ту ядерних дослідж. НАН України КИЯД-00-2 \(К., 2000\) 8 с.](#)
  13. [Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій \(НП 306.1.02/1.034-2000\), затверджені наказом Державної адміністрації ядерного регулювання України від 09.12.1999 № 63 \(зарєєстровані у Міністерстві юстиції України 06.03.2000 за № 132/4353\).](#)
  14. [Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций \(ПНАЭ Г-1-024-90.\) Утверждены ГКАЭ СССР, 1991.](#)
  15. [IEEE 323-2003 – IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.](#)
  16. [ПР-Т.0.03.115-02. Предварительный перечень оборудования и элементов АЭС Украины, подлежащих квалификации \(для проекта ВВЭР-1000/В-320\) \(К.: НАЭК «Энергоатом», 2002\).](#)
  17. [02.09.841.03.00. Программа работ по квалификации оборудования АЭС Украины \(К.: НАЭК Энергоатом, 2000\).](#)
  18. [Загальні вимоги до продовження експлуатації АЕС у понад проектний строк за результатами здійснення періодичної оцінки безпеки \(НП 306.2.099-2004\), затверджені наказом Державної адміністрації ядерного регулювання України від 26.11.2004 № 181 \(зарєєстровано у Міністерстві юстиції України 15.12.2004 за № 1587/10186\).](#)
  19. [Вимоги до порядку та змісту робіт для продовження терміну експлуатації інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних електростанцій \(НП 306.5.02/2.068-2003\), затверджені наказом Державної адміністрації ядерного регулювання України від 18.03.2003 № 42 \(зарєє-](#)
  - [стровані у Міністерстві юстиції України 15.04.2003 за № 306/7627\).](#)
  20. [13АП-П05-01-02-94 – ЗІОУК-П02-07-09-04. Оценка текущего состояния эксплуатационной безопасности энергоблоков АЭС Украины \(Отчеты о нарушениях\).](#)
  21. [Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні в 2018 р. \(К., 2019\) 70 с.](#)
  22. А.В. Сахно. Исследование проблем повышения безопасности кабельных магистралей АЭС. В кн.: [Сб. матер. 5-й конф. Укр. Ядерного Об-ва \(Энергодар: ЗАЭС, УкрЯО, 2001\) с. 102.](#)
  23. Т.В. Ковалінська, І.А. Остапенко, В.І. Сахно. Технологія рівномірного електронного опромінення промислових виробів великих габаритів. [Ядерна фізика та енергетика 17\(2\) \(2016\) 199.](#)
  24. Т.В. Ковалінська, В.І. Сахно. Електрофізичний імітатор ушкоджуючих факторів ядерної енергії. [Ядерна фізика та енергетика 20\(1\) \(2019\) 84.](#)
  25. А.В. Сахно. Перспективы использования электрофизических установок для испытаний оборудования АЭС. [Ядерні та радіаційні технології 2\(3\) \(2003\) 44.](#)
  26. С.Є. Донець та ін. Випробування лопаток газотурбінних двигунів з застосуванням прискорювача сильноточових релятивістських електронів. [Ядерна фізика та енергетика 21\(1\) \(2020\) 95.](#)
  27. І.М. Вишневський та ін. Спеціалізований стенд для функціональних випробувань кабельних виробів АЕС. [Ядерна фізика та енергетика 1\(19\) \(2007\) 140.](#)
  28. И.Н. Вишневский и др. Радиационная установка с ускорителем электронов ИЯИ НАН Украины. [Атомная энергия 94\(2\) \(2003\) 163.](#)
  29. В.И. Сахно и др. Исследование перспектив создания систем технологической защиты оборудования ЭФУ на ранних стадиях формирования аварийных ситуаций. [Препринт Ин-та ядерных исслед. НАН Украины КИЯИ-95-4 \(К., 1995\) 6 с.](#)
  30. [Требования по ядерной и радиационной безопасности к информационным и управляющим системам, важным для безопасности атомных станций. НП 306.5.02/3.035-2000. Нормативно-правовой акт Государственной инспекции ядерного регулирования Украины.](#)
  31. [IEC 60780 \(1998\) Электростанции атомные. Электрооборудование системы безопасности. Квалификационная оценка \(ФГУП «Стандартинформ», 1998\) 62 с.](#)

I. A. Khomych, T. V. Kovalinska\*, V. I. Sakhno, Yu. V. Ivanov

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: sungel@i.ua

#### EFFICIENCY AND PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF MEASURES FOR QUALIFICATION OF EQUIPMENT IMPORTANT FOR SAFETY IN DOMESTIC NUCLEAR ENERGETICS

The results of implementing equipment qualification are analyzed. Such equipment is critical for the nuclear and technical safety of domestic nuclear power plants that are especially important for the implementation of the Program for extending the terms of out-of-project operation of power reactors that are capable of being used as powerful sources of electricity. Based on the comparison of published reliability indicators of domestic nuclear power plants before and

after implementing the qualification, it is shown that still there are problems to be solved. The perspective of further enhancing the reliability of the operation of domestic nuclear energetics is considered, by implementing radiation functional testing methods that are been developed at the INR NAS of Ukraine for a long period. The basis of this method is detailed research and operational control of all processes that occur in critical equipment in any operating modes of nuclear reactors to form a resource history of the equipment and to provide operational information about the remaining resource and the expected time of its failure to an on-line object operator.

*Keywords:* nuclear power reactor, reliability, critical equipment, qualification, radiation functional research.

#### REFERENCES

1. S.I. Azarov, V.I. Sakhno, V.V. Tokarevsky. Basic concepts of a fire prevention system at NPP. Preprint of the Institute for Nuclear Research of the Academy of Sciences of the UkrSSR KINR-90-8 (Kyiv, 1990) 12 p. (Rus)
2. Development and research of methods and means of control and forecasting of fire and explosion situations at the “Shelter” object. Scientific and technical report on the research work 42/91-49 (Kyiv, INR of the Academy of Sciences of Ukraine, 1992) 140 p. (Rus)
3. V.I. Sakhno, S.P. Tomchay. Investigation of the problems of thermal control and the creation of systems for early recognition and prevention of emergency fire situations at power cable communications of NPP. In: *Intern. Conf. of the Ukrainian Nuclear Society “Safety and protection of NPP”* (Odesa, 1997) p. 22. (Rus)
4. V.I. Sakhno, S.P. Tomchay, A.V. Sakhno. The research of radiation factors of the NPP's equipment degradation. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 1(2) (2000) 102. (Ukr)
5. I.M. Vyshnevskiy et al. Radiation test of NPP's equipment. In: *Proc. Intern. Conf. “Current Problems in Nucl. Phys. and At. Energy”*, Kyiv, Ukraine, May 29 - June 3, 2006 (Kyiv, 2007) p. 838.
6. I.M. Vyshnevskiy et al. The problems of radiation methods usage of testing the NPP's equipment. In: *Proc. Intern. Conf. “Current Problems in Nucl. Phys. and At. Energy”*, Kyiv, Ukraine, June 9 - 15, 2008 (Kyiv, 2009) p. 699.
7. N.A. Steinberg, Yu.A. Kamenev. The influence of the quality of electrical equipment on the operation of a nuclear power plant. *Elektricheskiye Stantsii* 4 (1992) 41. (Rus)
8. G.G. Schastlivyy, G.M. Fedorenko. The problem of reliable and safe operation of electrical equipment at NPP. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Ser.: Fizika Radiatsionnykh Povrezhdeniy i Radiatsionnoye Materialovedeniye* 2-3 (62-63) (1994) 133. (Rus)
9. IAEA-INES-2008-R. *International Nuclear and Radiological Events Scale. User manual.* (Vienna, IAEA, 2010). (Rus)
10. V.I. Sakhno. Technical diagnostics and protection of equipment of nuclear physics installations. *Preprint of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine KINR-95-3* (Kyiv, 1995) 6 p. (Rus)
11. S.P. Tomchay. Development of methods to increase the efficiency of automated NPP equipment protection systems. Thesis abstract of the candidate of Sciences in Technics (Odesa, 1996) 14 p. (Rus)
12. O.B. Sakhno. Problems of operation of cable networks at NPPs. *Preprint of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine KINR-00-2* (Kyiv, 2000) 8 p. (Ukr)
13. *General Provisions for Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants (NP 306.1.02/1.034-2000)*, approved by the order of the State Administration of Nuclear Regulation of Ukraine on 09.12.1999 No. 63 (registered by the Ministry of Justice of Ukraine on 06.03.2000 for No. 132/4353). (Ukr)
14. *Nuclear Safety Rules for Reactor Installations of Nuclear Power Plants (Moskva: Gospromatomnadzor of the USSR, 1990) p. 40.* (Rus)
15. *IEEE 323-2003 – IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.*
16. ПП-Т.0.03.115-02. Preliminary list of equipment and elements of Ukrainian NPPs subject to qualification (for the VVER-1000/V-320 Project) (Kyiv: National Nuclear Power Generation Company “Energoatom”, 2002). (Rus)
17. 02.09.841.03.00. Work Program for Qualifying Equipment for Ukrainian NPPs (Kyiv: National Nuclear Power Generation Company “Energoatom”, 2000). (Rus)
18. *General requirements for continued operation of NPPs beyond the design period based on the results of periodic safety assessment (HPI 306.2.099-2004)*, approved by the order of the State Administration of Nuclear Regulation of Ukraine on 26.11.2004 No. 181 (registered by the Ministry of Justice of Ukraine on 15.12.2004 for No. 1587/10186). (Ukr)
19. *Requirements for Order and Contents of Lifetime Extension Measures for Instrumentation and Control Systems Important to NPP Safety (NP.306.5.02/2.068-2003)*, approved by the order of the State Administration of Nuclear Regulation of Ukraine on 18.03.2003 No. 4226 (registered by the Ministry of Justice of Ukraine on 15.04.2003 for No. 306/7627). (Ukr)
20. 13АП-П05-01-02-94 – 3ЮК-П02-07-09-04. Assessment of the current state of operational safety of Ukrainian NPP power units (Reports on violations). (Rus)
21. *Report on the state of nuclear and radiation safety in Ukraine in 2018.* (Ukr)
22. A.V. Sakhno. Study of the problems of increasing the safety of cable lines at NPP. In: *Proc. of 5-th*



- Conf. of the Ukrainian Nuclear Society (Energodar: ZNPP, UkrYaO, 2001) p. 102. (Rus)
23. T.V. Kovalinska, I.A. Ostapenko, V.I. Sakhno. The technology of steady electron irradiation of large size industrial products. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 17(2) (2016) 199. (Ukr)
  24. T.V. Kovalinska, I.A. Ostapenko, V.I. Sakhno. Electrophysical simulator of nuclear energy striking factors. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 20(1) (2019) 84. (Ukr)
  25. A.V. Sakhno. Prospects for the use of electrophysical installations for testing NPP equipment. *Yaderni ta Radiatsiyni Tekhnolohiyi (Nuclear and Radiation Technologies)* 2(3) (2003) 44. (Rus)
  26. S.E. Donets et al. Testing of gas-turbine blades engines using the accelerator of high current relativistic electrons. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 21(1) (2020) 95. (Ukr)
  27. I.M. Vyshnevskiy et al. Specialized stands for functional testing of NPP cables products. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 1(19) (2007) 140. (Ukr)
  28. I.N. Vishnevsky et al. Radiation installation with an electron accelerator at INR of NAS of Ukraine. *Atomnaya Energiya* 94 (2) (2003) 163. (Rus)
  29. V.I. Sakhno et al. Investigation of the prospects for creating technological protection systems for EFU equipment at the early stages of emergencies. *Preprint of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine KINR-95-4 (Kyiv, 1995)* 6 p. (Rus)
  30. Requirements for Nuclear and Radiation Safety of Instrumentation and Control Systems Important to NPP Safety. NP 306.5.02/3.035-2000. Normative legal act of the State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine. (Rus)
  31. IEC 60780 (1998) Nuclear Power Plants. Electrical equipment of the safety system. Qualification (Federal State Unitary Enterprise "Standartinform", 1998) 62 p. (Rus)

Надійшла/Received 01.05.2020