

Аналіз експлуатаційних подій, викликаних дефектами цифрових інформаційних та керуючих систем атомних електростанцій

Бутова О. М.

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6633-5020>

Клевцов О. Л.

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5665-5039>

Печериця О. В.

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8711-0242>

Трубочанінов С. О.

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4256-5192>

Ястребенецький М. О.

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3662-9519>

Стаття присвячена аналізу порушень у роботі атомних електростанцій (АЕС) України, викликаних відмовами та дефектами інформаційних та керуючих систем. Подана статистична інформація щодо кількості та частки порушень у роботі АЕС України через неправильне функціонування інформаційних та керуючих систем. У статті наведено стислий огляд нещодавно опублікованого Технічного звіту Об'єднаного Дослідницького Центру Європейської Комісії щодо досвіду експлуатації цифрових інформаційних та керуючих систем на АЕС закордонних країн. Наведені причини експлуатаційних подій, викликаних дефектами вказаних систем, та основні рекомендації щодо їх запобігання в подальшому. З використанням підходу, аналогічного прийнятому у Технічному звіті, у статті виконано детальний аналіз безпосередніх і корінних причин, а також коригувальних заходів стосовно порушень у роботі АЕС України у період з 2013 по 2018 роки, викликаних цифровими інформаційними та керуючими системами. Окремо розглянуті чотири групи порушень через дефекти: компонентів периферійної частини цифрових інформаційних та керуючих систем (датчиків, виконавчих механізмів), компонентів центральної частини цифрових інформаційних та керуючих систем (програмно-технічних комплексів), кабельних ліній зв'язку та електронних компонентів аналогових інформаційних та керуючих систем (вбудованих електронних елементів). Додатково проведений аналіз корінних причин порушень через цифрові інформаційні та керуючі системи за типами систем і стадіями життєвого циклу та розглянуті основні джерела виникнення порушень у межах систем.

Ключові слова: експлуатаційна подія, цифрова інформаційна та керуюча система, порушення в роботі АЕС, статистика.

© Бутова О. М., Клевцов О. Л., Печериця О. В., Трубочанінов С. О., Ястребенецький М. О. 2019

Поняття порушень в роботі АЕС визначено в НП 306.2.100-2004 [1], в якому міститься також класифікація цих порушень. Ці визначення і класифікація застосовні при аналізі порушень, викликаних дефектами всіх систем АЕС, охоплюючи інформаційні та керуючі системи (ІКС).

Поняття «інформаційні та керуючі системи» було наведено у НП 306.5.02/3.035-2000 [2], потім дещо змінено у НП 306.2.202-2015 [3]. У цих документах (як і у стандартах Міжнародної електротехнічної комісії, наприклад, IEC 61513 [4]) відсутнє визначення меж ІКС. Контур управління АЕС в загальному випадку показаний на рисунку 1.

До складу ІКС входять датчики, центральна частина у вигляді програмно-технічного комплексу (ПТК), виконавчі механізми, засоби відображення та управління. Гермопроходки, арматура і регулюючі органи, як правило, відносяться до технологічного устаткування. Дискусійним є питання про входження імпульсних ліній в технологічне обладнання або в ІКС. Далі будемо вважати, що імпульсні лінії є частиною ІКС.

Поняття цифрова ІКС («digital I&C system») не стандартизовано. Це поняття неоднозначне, тому що в сучасних системах цифрове обладнання є не тільки в ПТК, але і в датчиках (наприклад, в інтелектуальних датчиках «Сафір» типів Ф і К виробництва ПрАТ «Манометр-Харків» з вбудованим програмним забезпеченням) і виконавчих механізмах (наприклад, в позиціонерах системи

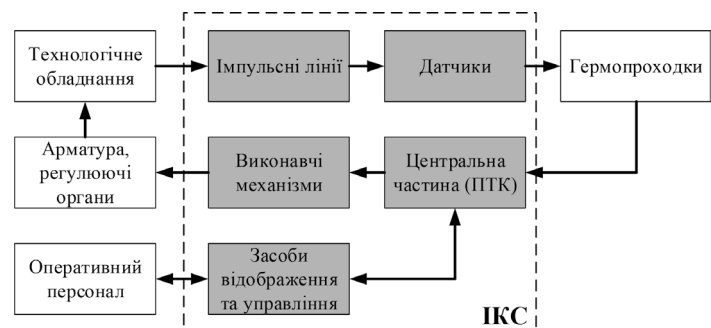


Рисунок 1 — Контур управління технологічним процесом АЕС

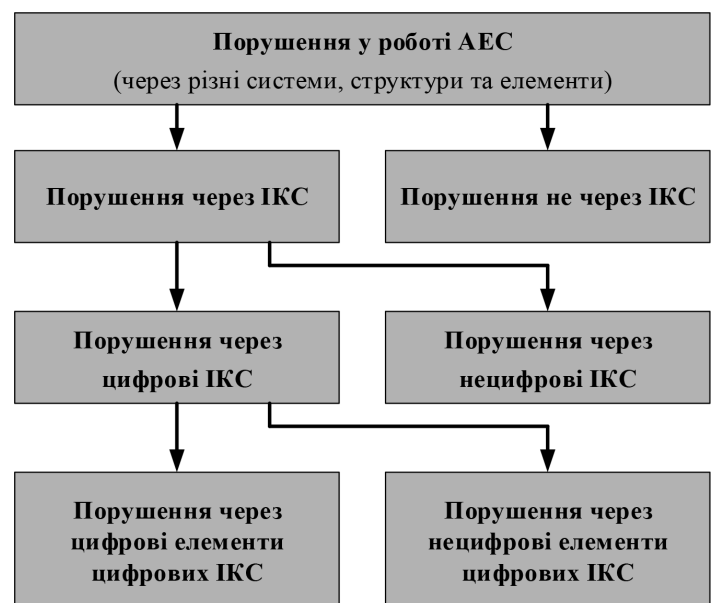


Рисунок 2 — Взаємозв'язок видів порушень у роботі АЕС

управління живильною водою енергоблоків № 1, 2 ВП Южно-Українська АЕС (ЮУ АЕС)). У цій статті прийнято допущення, що до цифрових віднесено ІКС, у яких алгоритм управління та/або контролю виконується на цифрових технологіях з використанням цифрової обчислювальної техніки. До складу цифрових ІКС зазвичай входять не тільки цифрові, але й нецифрові елементи. Порушення у роботі АЕС можуть бути викликані відмовами різного устаткування (ІКС або інше обладнання), різних ІКС (цифрових або нецифрових) та різних елементів цифрових ІКС (цифрових або нецифрових). Взаємозв'язок видів порушень у роботі АЕС, які розглядаються у цій статті, наведений на рисунку 2.

Зазначимо, що у статті не розглядаються порушення, які викликані відхиленням нормальних умов експлуатації ІКС за передбаченим проектом межі (наприклад, внаслідок затоплення приміщення, несправності систем вентиляції та кондиціонування тощо).

Огляд Технічного звіту JRC «Досвід експлуатації цифрових інформаційних та керуючих систем на атомних електростанціях»

Роботи з аналізу різних подій, що мають місце під час експлуатації цифрових ІКС АЕС, здійснює Об'єднаний дослідницький центр Європейської комісії (European Commission Joint Research Centre – JRC) [5], [6].

ДНТЦ ЯРБ проаналізовано Технічний звіт JRC «Досвід експлуатації цифрових інформаційних та керуючих систем на атомних електростанціях» [6], де відображені результати аналізу експлуатаційних подій (порушень або відхилень) у роботі АЕС, пов'язаних з цифровими ІКС за період з січня 2013 р. по вересень 2018 р.

У якості вихідних даних для проведення аналізу JRC були використані відомості з двох баз даних:

1) «Міжнародна система звітності про досвід експлуатації» (IRS), яка обслуговується спільно МАГАТЕ та Nuclear Energy Institute.

2) «Звіти ліцензіатів про події» (LER), яка обслуговується Комісією ядерного регулювання США.

З вказаних баз даних відбиралися лише події, пов'язані з відмовами виключно цифрових ІКС, окремих комп'ютерів або технічних засобів з програмним забезпеченням (у тому числі, вбудованим). З урахуванням цих обмежень до розгляду було відібрано 25 подій (13 з бази даних IRS та 12 з бази даних LER) для подальшого поглибленого аналізу.

Основною метою аналізу було виявлення особливостей, притаманних лише для цифрових ІКС, що можуть призводити до порушень та відхилень у роботі АЕС.

Усі події були згруповані стосовно конкретних ІКС, через відмову яких сталися ці події. Виявлено, що більшість подій не стосуються систем безпеки АЕС.

Було сформовано розподіл подій стосовно етапів життєвого циклу, до яких відносяться корінні причини подій. Виявлено, що третина корінних причин подій відноситься до етапу проектування.

В рамках проведеного аналізу було сформовано три основні групи подій, які відбувалися найчастіше. До цих груп відносяться події, пов'язані з:

використанням інтелектуальних пристроїв (датчиків та виконавчих механізмів з вбудованим програмним забезпеченням) — 5 подій;

управлінням конфігурацією (документуванням модифікацій) — 4 події;

цифровим зв'язком (з використанням локальних обчислювальних мереж) — 3 події.

За результатами аналізу JRC було зроблено 6 практичних рекомендацій стосовно ІКС:

1) Огляд вбудованого програмного забезпечення. Допущення та інженерні рішення, які використовуються при розробці програмного забезпечення, вбудованого у цифрові компоненти ІКС, мають бути чітко ідентифіковані та верифіковані персоналом, який ознайомлений з проектом та експлуатацією АЕС, незалежно від постачальника компонентів.

2) Відмови із загальної причини у програмному забезпеченні. Якщо вимагається доказ дотримання принципу одиначної відмови у цифровій ІКС, то реальне виконання цієї вимоги має бути ретельно проаналізовано, верифіковано та валідовано (з урахуванням перевірки незалежності резервованих каналів).

3) Взаємодія між функціями безпеки та допоміжними функціями програмного забезпечення. Проект цифрових ІКС, пов'язаних з безпекою, має бути таким, щоб допоміжні функції системи не впливали на виконання функцій безпеки.

4) Оптиковолоконні технології. Монтаж та технічне обслуговування оптиковолоконних ліній передачі даних має виконуватися відповідно до детально визначеної процедури та після відповідного навчання.

5) Вплив модифікацій програмного забезпечення на експлуатаційні процедури. Зміни експлуатаційних процедур цифрової ІКС внаслідок модифікації програмного забезпечення мають бути валідовані.

6) Ергономіка інтерфейсу «людина-машина» цифрових ІКС. Особлива увага має приділятися ергономіці дисплеїв та сенсорних екранів, які використовуються для управління в устаткуванні, важливого для безпеки.

ДНТЦ ЯРБ раніше виконував роботи з аналізу порушень у роботі АЕС через ІКС [7], [8]. Деякі результати цих робіт, пов'язані з оцінкою функціональної безпеки ІКС, були представлені на конференціях Американської ядерної спілки (International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies) [9], [10].

Статистика порушень на АЕС України

За період з 1996 по 2018 роки на енергоблоках АЕС України відбулося 167 порушень через неправильне функціонування ІКС (включаючи аналогові та цифрові системи). На рисунку 3 наведено кількість порушень через ІКС за кожний рік.

З рисунку 3 видно, що модернізація ІКС та перехід на цифрові технології призвели до тенденції зниження кількості порушень через ІКС. Зазначимо, що кількість порушень через ІКС, на енергоблоках ВВЕР-440 (у середньому складає 0,28 на 1 енергоблок за 1 рік), що є меншим, ніж на енергоблоках ВВЕР-1000 (у середньому складає 0,51 на 1 енергоблок за 1 рік).

Аналіз порушень у роботі АЕС (зокрема, й викликаних дефектами ІКС) за період з 1996 по 2012 роки виконувався ДНТЦ ЯРБ раніше та був відображений у [8]. Тому у цій статті наведений аналіз порушень в роботі АЕС України через дефекти цифрових ІКС за період з 2013

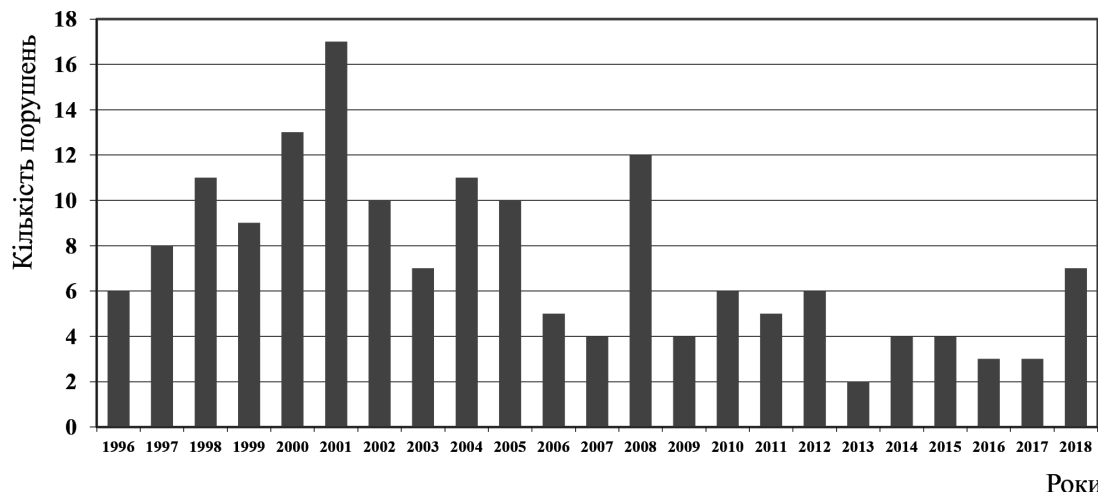


Рисунок 3 — Кількість порушень в роботі АЕС через ІКС

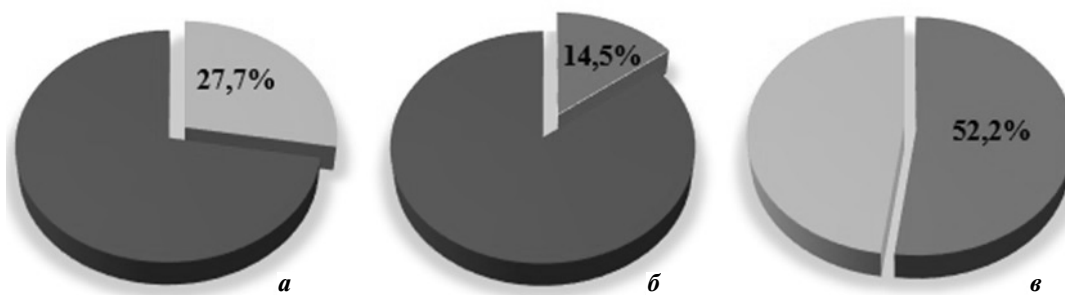


Рисунок 4 — Частка порушень у роботі АЕС України:
 а) всіх ІКС від усіх порушень;
 б) цифрових ІКС від усіх порушень;
 в) цифрових ІКС від усіх ІКС

по 2018 роки із застосуванням підходу, аналогічного описаному у Технічному звіті JRC [6].

За вказаний період на енергоблоках АЕС України всього відбулося 83 порушення, із них 23 порушення внаслідок ІКС (включаючи як аналогові, так і цифрові системи). За результатами аналізу встановлено, що із загальної кількості порушень через ІКС, 12 порушень викликані дефектами цифрових ІКС.

Частки порушень ІКС та цифрових ІКС від усіх порушень у роботі енергоблоків АЕС України, а також частка порушень цифрових ІКС від порушень ІКС за період, що розглядається, наведені на рисунку 4.

Аналогічно до підходів технічного звіту JRC [6], нижче розглядаються тільки порушення, що відбулися внаслідок дефектів цифрових ІКС, оскільки на даний час переважна більшість ІКС на АЕС України є цифровими, а аналогові системи, що залишаються в експлуатації, також поступово замінюються цифровими.

Залежно від причин та наслідків порушення відносяться до однієї з категорій, встановлених у НП 306.2.100-2004 [1]. Аналіз 12 порушень у роботі АЕС України, які виникли через неправильне функціонування цифрових ІКС за період з 2013 по 2018 роки, показав, що вони віднесені до наступних категорій:

П05/1 (зупинка реакторної установки дією аварійного захисту (АЗ)) — 6 порушень (50 % від загальної кількості порушень через цифрові ІКС у період з 2013 по 2018 роки);

П05/2 (відключення устаткування, важливого для безпеки, яке відноситься до класу безпеки 2) — 1 порушення (8 %);

П07/1 (відмова устаткування, яке відноситься до класу безпеки 2 згідно з НП 306.2.141-2008 [11]) — 3 порушення (25 %);

П09 (спрацьовування систем безпеки) — 2 порушення (17 %).

У звітах про розслідування, розглянутих 12 порушень, вказаний найнижчий базовий рівень класифікації згідно зі шкалою INES [12] «нижче шкали/рівень 0».

Опис порушень та їх корінних причин, що виникли через компоненти цифрових ІКС

Групування порушень через цифрові ІКС виконано у відповідності до джерел дефектів, у якості яких розглядаються: компоненти, що входять до складу периферійної частини ІКС; компоненти, що входять до складу центральної частини ІКС; кабельні лінії.

Порушення через дефекти компонентів периферійної частини цифрових ІКС. За період 2013–2018 рр. на енергоблоках АЕС України відбулося 6 порушень через відмови периферійних компонентів цифрових ІКС: 1 порушення через заміщення імпульсної лінії, 1 порушення внаслідок відмов виконавчого механізму, 4 порушення через відмови датчиків*.

Порушення «Відключення енергоблоку № 3 від мережі внаслідок зниження тиску у головному паровому колекторі (ГПК) до уставки спрацьовування технологічного захисту турбіни» (енергоблок №3 ВП Рівненської АЕС (РАЕС), 2017 рік) виникло внаслідок відмови плати управління блоку вбудованої електроніки сервоклапана електронної частини системи регулювання турбіни (ЕЧ СРТ)

* Одне з порушень, викликано не тільки відмовою датчика, але й відмовою компонентів центральної частини ІКС

через відсутність пристрою обмеження сили струму. Коригувальними заходами виконана установка пристрою обмеження сили струму у схему електроживлення.

Три порушення в роботі енергоблоків № 1 ВП Хмельницької АЕС (ХАЕС) (2013 рік), № 2 ВП Запорізької АЕС (ЗАЕС) (2014 рік), №3 ВП ЗАЕС (2013 рік) полягали у втраті індикації положення органів регулювання системи управління та захисту (ОР СУЗ) та виникли через відмову датчиків у складі системи групового та індивідуального управління (СГІУ). Вказані датчики замінені у рамках реалізації коригувальних заходів.

Порушення через дефекти компонентів центральної частини цифрових ІКС. За період дослідження на енергоблоках АЕС України відбулося 6 порушень через компоненти центральної частини цифрових ІКС.

Порушення «Відмова елементів апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП), що призвела до спрацьовування пристрою регулювання та обмеження потужності (РОП) при виведенні енергоблока № 3 у гарячий резерв» (енергоблок № 3 ВП ЗАЕС, 2013 рік) виникло через помилкові дії оперативного персоналу та відсутність процедури виведення з роботи РОП під час його «помилкової» роботи. Як корінна причина вказана відсутність документації з описом дій оперативного персоналу при виникненні аварійного руху ОР СУЗ вниз у ситуаціях, коли це не потрібно. Коригувальні заходи передбачають доповнення інструкції з експлуатації ПТК автоматичного регулювання потужності, розвантаження та обмеження потужності, прискореного попереджувального захисту (АРП-РОП-ППЗ) та відповідне навчання персоналу.

Порушення «Зупинка реакторної установки енергоблока № 1 дією АЗ внаслідок закриття стопорних клапанів останньої працюючої турбіни через надлишкове спрацьовування технологічного захисту при підвищенні рівня у сепаратозбірнику сепаратора-пароперегрівача до 2-ої межі» (енергоблок № 1 ВП РАЕС, 2014 рік) виникло внаслідок несправності блоків випрямлювача мережевого типу БВС-2 в ПТК АРП, РОП (розробки НВП «Хартрон-Аркос») через фізичне старіння елементної бази цих блоків. Коригувальними заходами заплановано передбачити можливість забезпечення модернізації комплексів ПТК АРП, РОП на енергоблоках № 1, 2 ВП РАЕС.

Порушення «Зупинка реакторної установки енергоблока № 2 дією АЗ через проходження короточасних помилкових сигналів від 2-го та 3-го каналів першого комплексу ПТК аварійного захисту та попереджувального захисту (АЗ-ПЗ), викликаних зовнішнім впливом природного походження (гроза)» (енергоблок №2 ВП ЗАЕС, 2015 рік) сталося через короточасну, потужну електромагнітну перешкоду, яка вплинула на 2-й і 3-й вимірювальні канали ПТК АЗ-ПЗ. Корінною причиною визнано удар блискавки у систему блискавкозахисту або контур заземлення енергоблока, який викликав у ланцюгах передачі безперервних сигналів аномальні перешкоди, інтенсивність яких значно перевищує випробувальні впливи, прийнятні у технічному завданні (ТЗ) та нормативних документах (НД). Коригувальними заходами передбачено виконати заміну блоків живлення у шафах ПТК АЗ-ПЗ розробки ПАТ «НВП «Радій», провести контроль якості контурів заземлення апаратури ПТК АЗ-ПЗ, корпусів первинних перетворювачів тощо. Звіт про вказане порушення був доопрацьований за зауваженнями ДНТЦ ЯРБ (зокрема, як додатковий коригувальний захід передбачено дослідження захисних властивостей контуру блискавкозахисту

енергоблоку № 2 ВП ЗАЕС). Вказане дослідження було виконано у 2016 році. За його результатами були виявлені недоліки у контурі блискавкозахисту та зроблені рекомендації щодо їх усунення. Модернізація існуючого блискавкозахисту енергоблоку № 2 ВП ЗАЕС виконана у 2018 році.

Порушення «Зупинка реакторної установки дією АЗ за фактом відключення 3-х з 4-х головних циркуляційних насосів (ГЦН) внаслідок закриття локалізуючої арматури дією технологічного захисту, ініційованого діями персоналу» (енергоблок № 2 ВП ЮУ АЕС, 2016 рік) виникло через помилкову імітацію оперативним персоналом технологічного захисту, що не передбачено програмою перевірок. Зазначений супутній фактор, а саме особливість монітора блоку керування (БК), що зберігає активність сенсорної панелі у «сплячому» режимі. При проведенні перевірки монітор БК перейшов в «сплячий» режим. Персонал, що проводив перевірку, активував БК дотиком до сенсорного екрану (одночасно з активацією екрану стався вибір некоректного параметру з переліку, відображеного на екрані), після чого оператор підтвердив вибір цього параметру, не витримавши паузу та не переконавшись у правильності обраного параметра. Коригувальні заходи, щодо доопрацювання програмного забезпечення БК енергоблоків № 1, 2 ВП ЗАЕС, були реалізовані ПАТ «НВП «Радій». У доопрацьованому програмному забезпеченні відсутній вплив на активні елементи під час виведення монітору із «сплячого» режиму доторканням до сенсорного екрану.

Порушення «Відкриття швидкодіючої редуційної установки скидання пари в атмосферу (ШРУ-А) 2 ТХ80S05 та запуск механізмів першого каналу керуючої системи безпеки (КСБ) за сигналом «Рпп < 50 кгс/см², ΔТs > 75 °С» внаслідок помилкових дій персоналу» (енергоблок № 2 ВП ХАЕС, 2017 рік) виникло через помилковий вплив персоналу на елементи захисту та автоматики при виконанні робіт зі зняття програмних блокіраторів у рамках технічного обслуговування (ТО) ПТК системи автоматичного регулювання (САР) КСБ. Як супутній фактор відзначені недоліки проекту, щодо інтерфейсу «людина-машина» у сервісному програмному забезпеченні, пов'язані з відсутністю інформування персоналу про стан блокувань (введенні/виведенні) на фрагменти інженерної станції і робочого місця САР блокового щита управління (БЩУ). У 2018 році ПрАТ «СНВО «Імпульс» доопрацював сервісне програмне забезпечення та відновив працездатність ПТК САР КСБ у повному обсязі.

Порушення «Зупинка реакторної установки енергоблока дією АЗ-1 при проведенні планового ТО схеми формування АЗ 2-го комплекта ПТК АЗ» (енергоблок № 2 ВП РАЕС, 2018 рік) виникло через відмову блокіратора ПТК АЗ. Як корінна причина вказано конструктивний недолік блокіратора ПТК АЗ, що не забезпечує контроль усіх контактних з'єднань роз'єму та не дозволяє надійно перевести комплект ПТК АЗ у режим перевірки. На даний час у рамках реалізації коригувальних заходів ведуться роботи щодо модернізації контактної групи роз'єму, посилення конструкції блокіратора та уточнення допустимої періодичності виведення схеми формування аварійних захистів у стан технічного обслуговування.

Порушення через дефекти кабельних ліній. За досліджений період на АЕС відбулося 1 порушення через дефект кабельних ліній у роботі енергоблоку № 2 ВП ЗАЕС (2018 рік).

Порушення через дефекти електронних компонентів аналогових ІКС. Окремо розглянемо 1 порушення, яке виникло через відмову електронного компонента периферійної частини аналогової ІКС на енергоблоці № 3 ВП РАЕС у 2014 році.

Порушення «Розвантаження енергоблока № 3 через відключення двох ГЦН-2, 4 внаслідок самовільного закриття пневмовідсичної арматури ЗУD60S04 та ЗУD60S09 непарної мастилосистеми ГЦН» стало наслідком прихованого дефекту у електронній платі управління інвертором. Як корінна причина вказаний недолік програми дослідження технічного стану інверторів з метою виявлення прихованих дефектів плати управління інвертором. Коригувальними заходами передбачено виконати заміну автоматичних блоків живлення (АБЖ) каналів систем безпеки енергоблока № 3 ВП РАЕС, виконання щорічної перевірки електричних параметрів електронних елементів каналів захистів по напрузі блоків діагностування інверторів до заміни АБЖ.

Аналіз порушень через цифрові ІКС за стадіями життєвого циклу цих ІКС

Для запобігання та усунення порушень через компоненти цифрових ІКС суттєве значення має дослідження зв'язку корінних причин таких порушень з етапами життєвого циклу ІКС, по аналогії з технічним звітом JRC [6]. Аналіз корінних причин порушень внаслідок неправильного функціонування цифрових ІКС визначив їх зв'язок з наступними етапами життєвого циклу: проектування; монтаж; експлуатація. У таблиці 1 наведено відомості про порушення внаслідок цифрових ІКС з розподілом їх корінних причин за етапами життєвого циклу цих ІКС.

Таблиця 1 — Розподіл порушень через цифрові ІКС за етапами життєвого циклу

Назва цифрової ІКС, через яку відбулося порушення	Етап життєвого циклу			Кількість порушень
	проектування	монтаж	експлуатація	
Аварійний захист (АЗ)	3	—	—	3
Система групового та індивідуального управління (СГІУ)	—	—	1	1
Керуюча система безпеки (КСБ)	1	1	1	3
Регулювання та обмеження потужності (РОП)	—	—	1	1
Система керування живильною водою (СКЖВ)	—	1	—	1
Система регулювання турбіною (СРТ)	1	—	—	1
Всього порушень	5	2	3	10

Зауважимо, що в таблицю 1 не включено 2 порушення, оскільки не для всіх пов'язаних з ними аномальних подій визначені корінні причини.

Причинами порушень на етапі проектування стали недоліки проекту (4 порушення) та недоліки документації

(1 порушення). Причинами порушень на етапі проведення монтажу були недоліки документації (2 порушення). Причинами порушень на етапі експлуатації були старіння елементів (1 порушення), недоліки конструкції щодо захисних властивостей заземлення (1 порушення) та недоліки документації (1 порушення).

При аналізі порушень у роботі енергоблоків АЕС України через цифрові ІКС за період з 2013 по 2018 роки не було виявлено повторів аналогічних корінних причин.

Додатково проаналізовані основні джерела порушень у межах цифрових ІКС. За результатами цього аналізу встановлено, що серед 12 порушень:

- 4 порушення виникли через відмови неелектронних компонентів периферійної частини цифрової ІКС (імпульсні лінії, блоки живлення, датчики положення ОР СУЗ);
- 1 порушення виникло через відмову електронного компонента периферійної частини цифрової ІКС (плата електроніки приводу);
- 2 порушення виникли внаслідок дефектів програмного забезпечення центральної частини та помилок персоналу при технічному обслуговуванні;
- 3 порушення виникли через відмови технічних засобів (електронних компонентів) центральної частини ІКС;
- 1 порушення виникло, як через відмову периферійного пристрою, так й через недоліки документації та помилку персоналу при роботі з центральною частиною ІКС;
- 1 порушення виникло внаслідок дефекту при прокладанні кабельних ліній.

Таким чином, лише половина з 12 порушень через цифрові ІКС сталася через відмови цифрових компонентів, а інші порушення виникли внаслідок відмов нецифрових компонентів цифрових ІКС.

Основна частина порушень (9 порушень із 12) стосується систем безпеки АЕС (КСБ, СГІУ, АЗ).

Доля порушень, викликаних неправильним функціонуванням цифрових ІКС, по відношенню до загального числа порушень внаслідок всіх ІКС (аналогових та цифрових) в роботі енергоблоків АЕС України за період 2013–2018 складає 52,2 %. При цьому слід враховувати, що 6 порушень через цифрові ІКС виникли через відмови нецифрових компонентів. Таким чином, загалом порушення через відмови цифрових компонентів ІКС складають 26,1 % від загальної кількості відмов через аналогові та цифрові ІКС.

Серед 12 порушень мало місце 2 порушення внаслідок дефектів програмного забезпечення. Ці порушення виникли під час технічного обслуговування внаслідок недоліків при проектуванні програмного забезпечення ІКС. Порушень при роботі енергоблоків АЕС на потужності через дефекти програмного забезпечення не було.

Висновки

Аналіз подій у Технічному звіті JRC та аналіз порушень внаслідок відмов цифрових ІКС енергоблоків АЕС України з реакторами ВВЕР проводився за період з 2013 по 2018 роки.

У Технічному звіті JRC розглядалися тільки порушення, викликані дефектами цифрових компонентів цифровими ІКС. На противагу цьому, при аналізі порушень на АЕС України розглядалися дефекти як цифрових, так й нецифрових компонентів цифрових ІКС. При цьому слід враховувати, що половина порушень у цифрових ІКС виникли внаслідок відмов нецифрових компонентів.

Результати обох досліджень показали наступне:

– Більшість корінних причин порушень виникли на етапі проектування ІКС;

– Одна з проблем, розглянутих у Технічному звіті JRC, стосується інтерфейсу «людина-машина», зокрема ергономіки дисплеїв та сенсорних екранів. Серед порушень через цифрові ІКС АЕС України мало місце порушення внаслідок недоліків при проектуванні інтерфейсу «людина-машина» у сервісному програмному забезпеченні.

– Згідно з Технічним звітом JRC 20 % порушень сталися через відмови інтелектуальних периферійних пристроїв з вбудованими електронними елементами управління. Це є актуальним й для України, оскільки 16,7 % порушень виникли через відмови плат управління периферійного обладнання (сервоклапану цифрової ІКС та інвертора аналогової ІКС). За рекомендацією Технічного звіту JRC для програмного забезпечення вбудованих електронних компонентів має забезпечуватися повна та незалежна верифікація і валідація.

Додатково при аналізі подій на АЕС України виявлено наступне:

– При порушеннях внаслідок цифрових ІКС спостерігається повторюваність порушень через відмови датчиків положення ОР СУЗ (за досліджений період було 3 порушення).

– Одне з порушень виникло через вплив електромагнітних перешкод внаслідок удару блискавки у безпосередній близькості від енергоблоку № 2 ЗАЕС, що призвело до відмови за загальною причиною в двох каналах системи АЗ-ПЗ. Коригувальними заходами передбачене додаткове обстеження блискавкозахисту енергоблоку № 2 ЗАЕС.

– За результатами проведеного аналізу встановлено, що значна кількість порушень (4 порушення через відмови цифрових ІКС та 3 порушення через відмови аналогових ІКС) виникла не тільки через відмови або дефекти устаткування, але й супроводжувалася помилками оперативного та ремонтного персоналу.

– Необхідно окремо відзначити, що за розглянутий період більшість порушень виникла через відмови аналогових ІКС та неелектронних компонентів цифрових ІКС. Це пояснюється тим, що при розробці, виготовленні і впровадженні ІКС розробниками приділена велика увага дотриманню принципів резервування, незалежності, різноманітності, використанню сучасних високонадійних електронних елементів, застосуванню технічного діагностування, верифікації, валідації тощо. Завдяки цьому досягається висока надійність, оскільки одиничні відмови окремих елементів не призводять до відмов ІКС в цілому, швидко виявляються та усуваються. Проте доцільно проводити окремий аналіз одиничних відмов елементів цифрових ІКС, навіть у випадку, якщо такі відмови не призвели до порушень у роботі АЕС. Подібні дослідження дозволять виявити негативні тенденції щодо роботи конкретних ІКС, реалізації певних технічних рішень, використання тих чи інших електронних елементів та своєчасно прийняти відповідні коригувальні заходи.

Список використаної літератури

1. НП 306.2.100-2004 Положення про порядок розслідування та обліку порушень в роботі атомних станцій. Київ: Державний комітет ядерного регулювання України. 2004. 55 с. —URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1594-04>.

2. НП 306.5.02/3.035-2000 Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних і керуючих систем, важливих до безпеки атомних станцій. Київ: Державна адміністрація ядерного регулювання України. 2000. 86 с.

3. НП 306.2.202-2015 Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій. *Офіційний вісник України*. 2015. С. 99–151. — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0954-15>.

4. IEC 61513. Nuclear power plants — instrumentation and control important to safety — General requirements for systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011.

5. Semenas R., Kaijanen M. JRC Science and Policy Report. European Clearinghouse Analysis of events related to NPPs digital instrumentation and control systems. European Commission. Joint Research Center. 2014.

6. Miguel P. V. JRC Technical Report. Operating Experience with digital I&C Systems at Nuclear Power Plants. European Commission. Joint Research Center. 2018. — ISBN 978-92-79-98751-9.

7. Бутова О. Н., Инюшев В. В., Спектор Л. И., Ястребенський М. А. Нарушения в работе АЭС, вызванные системой управления технологическими процессами энергоблока. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2004. № 1. С.54–64.

8. Ястребенський М. А., Клевцов А. Л., Бутова О. Н. К рассмотрению потоков событий при функционировании критических объектов. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2013. № 2 (58). С.20–26.

9. Yastrebenetsky M., Spector L., Butova O., Klevtsov A. Evaluations of NPP I&C functional safety measures. 5-th American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies. 2006.

10. Yastrebenetsky M., Siora A. Operating Reliability of WWER NPP Digital I&C Systems. 6th American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies. 2009.

11. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. — Київ: Державний комітет ядерного регулювання України. 2008. 59 с. — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08>.

12. INES. The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's manual. 2008 Edition. IAEA, Vienna, 2013.

References

1. NP 306.2.100-2004. Provision about the procedure of investigation and accounting of operational events at nuclear power plants. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2004, 55 p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1594-04>.

2. NP 306.5.02/3.035-2000. Requirements for nuclear and radiation safety of the instrumentation and control systems important to safety of nuclear power plants. Kyiv: State Nuclear Regulatory Administration of Ukraine, 2000, 86 p.

3. NP 306.2.202-2015. Requirements for nuclear and radiation safety of the instrumentation and control systems important to safety of nuclear power plants. *Official Journal of Ukraine*, 2015, 99–151. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0954-15>.

4. IEC 61513. Nuclear power plants — instrumentation and control important to safety. General requirements for systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011, ISBN 978-2-88912-663-7.

5. Semenas, R., Kaijanen, M. (2014). JRC Science and Policy Report. European Clearinghouse analysis of events related to NPP digital instrumentation and control systems. European Commission, Joint Research Center, ISBN 978-92-79-37802-7.

6. Miguel, P. V. (2018). JRC Technical Report. Operating experience with digital I&C systems at nuclear power plants. European Commission, Joint Research Center, ISBN 978-92-79-98751-9.

7. Butova, O., Inyushev, V., Spector, L., Yastrebenetsky, M. (2004). NPP operational events caused by the unit process control system. *Nuclear and Radiation Safety*, No. 1, 54–64.

8. Yastrebenetsky, M., Klevtsov, A., Butova, O. (2013). Flow of events in performance of critical objects. *Nuclear and Radiation Safety*, No. 2 (58), 20–26.

9. Yastrebenetsky, M., Spector, L., Butova, O., Klevtsov, A. (2006). Evaluations of NPP I&C functional safety measures. 5-th American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies.

10. Yastrebenetsky, M., Siora, A. (2009). Operating reliability of WWER NPP digital I&C systems. 6th American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies.

11. NP 306.2.141-2008. General safety requirements for nuclear power plants. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2008, 59 p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08>.

12. INES. The International Nuclear and Radiological Event Scale. User's manual, 2008 Edition, IAEA, Vienna, 2013.

Анализ эксплуатационных событий, вызванных дефектами цифровых информационных и управляющих систем атомных электростанций

Бутова О. Н., Клевцов А. Л., Печерица А. В., Трубчанинов С. А., Ястребенецкий М. А.

Государственное предприятие «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Киев, г. Харьков, Украина

Статья посвящена анализу нарушений в работе атомных электростанций (АЭС) Украины, вызванных отказами и дефектами информационных и управляющих систем. В статье содержится статистическая информация о количестве и доле нарушений в работе АЭС Украины из-за неправильного функционирования аналоговых и цифровых информационных и управляющих систем по отношению к общему количеству нарушений. Рассмотрены категории этих нарушений в соответствии с международной и отечественной классификацией. В статье приведен краткий обзор недавно опубликованного Технического отчета Объединенного Исследовательского Центра Европейской Комиссии об опыте эксплуатации цифровых информационных и управляющих систем на АЭС зарубежных стран на основе сведений из баз данных МАГАТЭ и Комиссии ядерного регулирования США. Приведены причины эксплуатационных событий, вызванных дефектами указанных систем, и основные рекомендации по их предотвращению в дальнейшем. С использованием подхода, аналогичного принятому в Техническом отчете, в статье выполнен детальный анализ непосредственных и коренных причин, а также корректирующих мероприятий в отношении нарушений в работе АЭС Украины в период с 2013 по 2018 годы, вызванных цифровыми информационными и управляющими системами. Отдельно рассмотрены четыре группы нарушений из-за дефектов: компонентов периферийной части цифровых информационных и управляющих систем (датчиков, исполнительных механизмов), компонентов центральной части цифровых информационных и управляющих систем (программно-технических комплексов), кабельных линий связи и электронных компонентов аналоговых информационных и управляющих систем (встроенных электронных элементов). Дополнительно проведен

анализ коренных причин нарушений из-за цифровых информационных и управляющих систем по типам систем и стадиями жизненного цикла (проектирование, монтаж, эксплуатация) и рассмотрены основные источники возникновения нарушений в рамках систем (программное обеспечение, технические средства автоматизации, кабели и т. д.).

Ключевые слова: эксплуатационное событие, цифровая информационная и управляющая система, нарушение в работе АЭС, статистика.

Analysis of Operational Events Caused by Faults of NPP Digital Instrumentation and Control Systems

Butova O., Klevtsov O., Pecherytsia O., Trubchaninov S., Yastrebenetsky M.

State Enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety", Kharkiv, Kyiv, Ukraine

The paper presents the analysis of operational events at nuclear power plants (NPPs) of Ukraine caused by failures and defects of the instrumentation and control systems (I&C systems). The effort contains statistical information about the number and the share of operational events at Ukrainian NPPs due to incorrect performance of analog and digital I&C systems in the general amount of events. The categories of these events according to the international and national classifications have been considered. The paper provides for the brief overview of the recently published EC Joint Research Center Technical Report on digital I&C systems at NPPs of foreign countries based on the information from IAEA and U.S. NRC databases. There are causes of operational events due to defects of the specified systems and main recommendations on their prevention. Using the approach similar to the one in the Technical Report, the paper presents the detailed analysis of direct and root causes, as well as correction measures for the operational events at Ukrainian NPPs from 2013 to 2018 caused by digital I&C systems. The experts considered separately four groups of events due to defects of components in the peripheral part of the digital I&C systems (sensors, actuators), central part of digital I&C systems (software and hardware), cable lines and electronic components of analog I&C systems (built-in components). There is an additional analysis of root causes of events related to digital I&C systems by the types of systems and lifecycle stages (design, mounting, operation) and main sources of occurrences within the systems (software, hardware, cables, etc.).

Keywords: operational event, digital instrumentation and control system, NPP operational event, statistics.

Отримано 24.04.2019