

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАБОРОНИ ОДНОЧАСНОГО ВВЕДЕННЯ ПОЗИТИВНОЇ РЕАКТИВНОСТІ ДВОМА ТА БІЛЬШЕ СПОСОБАМИ

Основною причиною виникнення заборони одночасного введення позитивної реактивності двома і більше способами є вимоги в правилах ядерної безпеки реакторних установок. Повинно бути виключено введення позитивної реактивності засобами впливу на реактивність, передбаченими технічним проектом реакторної установки, якщо робочі органи аварійного захисту не приведені в робоче положення. Технічними заходами повинна бути виключена можливість введення позитивної реактивності одночасно двома і більш передбаченими засобами впливу на реактивність, а також введення позитивної реактивності засобами на впливу реактивність при завантаженні і вивантаженні палива. Швидкість збільшення реактивності засобами впливу на реактивність має не перевищувати 0,07  $\beta$ ef/s. Для робочих органів системи управління та захисту з ефективністю понад 0,7  $\beta$ ef введення позитивної реактивності має бути кроковим, з вагою кроку не більше 0,3  $\beta$ ef (забезпечується технічними заходами). У технічному проекті РУ має бути зазначена величина кроку, пауза між кроками та швидкість збільшення реактивності.

Наслідком введення позитивної реактивності двома і більше способами можливе порушення умов нормальної експлуатації реакторних установок атомних станцій, через неконтрольоване збільшення нейтронного потоку в робочих і аварійних режимах реактора. Встановлений попереджувальний захист другого роду, що повинен вирішувати дану проблему має недоліки у своїй роботі, що приводять до явного порушення дійсної заборони на одночасне введення позитивної реактивності двома і більше способами. На основі проведених досліджень визначено та проаналізовано наявну похибку у роботі ПЗ-2. Для уникнення проблеми з одночасним введенням позитивної реактивності двома і більше способами запропоновано модернізація системи ПЗ-2 з подальшою її роботою від показників реактивності.

**Ключові слова:** попереджувальний захист, модернізація, позитивна реактивність, ядерна безпека.

### Вступ

В п.3.3.42 НП 306.2.145-2008 «Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском» вказана вимога про те, що технічними засобами унеможливується введення позитивної реактивності одночасно двома і більше засобами впливу на реактивність, а також введення позитивної реактивності засобами впливу на реактивність при завантаженні і вивантаженні палива[1].

Наразі можливі порушення цієї вимоги під час роботи ядерної установки типу ВВЕР-1000.

Актуальність теми обумовлена необхідністю виконання вимог ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском.

Метод дослідження – розрахунок впливу «чистого конденсату» на реактивність, аналіз літератури, технічної документації і інструкцій з даної теми.

Об'єктом дослідження є ядерна безпека реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском.

Предметом дослідження є дослідження можливого введення позитивної реактивності одночасно двома і більше способами.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що отримані рекомендації та висновки дозволять унеможливити введення позитивної реактивності одночасно двома та більше способами.

Практичне значення одержаних результатів - результати дисертаційної роботи можуть бути впроваджені в практичну діяльність ДП «НАЕК «Енергоатом» ВП Південноукраїнська АЕС» для виконання вимог ядерної безпеки.

Внаслідок проведених практичних досліджень доведена наявність даної проблеми. Причини, що впливають на роботу ПЗ-2 проаналізовані та зроблені висновки.

У роботі запропоновані рекомендації для покращення роботи попереджувального захисту другого роду, проаналізовано системи, що впливають на можливе одночасне введення позитивної реактивності двома і більше способами.

#### **Аналіз літературних джерел**

Засобами, які могли вносити позитивну реактивність, є:

- лінія подачі чистого конденсату з послідовно розташованою арматурою TN30S04, TN30S06 системи штатного підживлення першого контуру;
- система групового та індивідуального управління органів регулювання системи управління захистом(ОР СУЗ).

Цілями впровадження заборони одночасного введення позитивної реактивності двома і більше способами захисту системи управління захистом(СУЗ) енергоблоку є:

- підвищення рівня безпеки експлуатації енергоблоку шляхом впровадження додаткового попереджувального захисту II роду;
- приведення характеристик системи у відповідність чинним вимогам нормативної документації(НД) щодо безпеки атомних електричних станцій(АЕС)[2].

Впровадження нового захисту виконується на зупиненому реакторі під час проведення планово - попереджувального ремонту під час перебування реакторної установки в режимі «зупинка перевантаження».

Для виключення одночасного введення позитивної реактивності за рахунок підйому ОР СУЗ і дистилату в активну зону реактора в програмно-технічному комплексі аварійного та попереджувального захисту(ПТК АЗ-ПЗ) формується попереджувальний захист 2-го роду(ПЗ-2)(заборона на підйом ОР СУЗ) за фактом початку відкриття арматури TN30S04 при відкритій арматурі TN30S06 або за фактом початку відкриття арматури TN30S06 при відкритій арматурі TN30S04, що дозволяє підвищити безпеку роботи реакторної установки. Сигнал спрацьовування ПЗ-2 знімається за фактом закриття будь-якої арматури TN30S04, TN30S06.

Сигнали від кінцевих вимикачів арматури TN30S04, TN30S06 передаються на вхід ПТК АЗ-ПЗ, де формується алгоритм роботи захисту. На відеокдрах робочої станції відображається формування та стан проходження сигналу. З ПТК АЗ-ПЗ сигнали за фактом одночасного незакритого стану арматури TN30S04, TN30S06 передаються на блочному щиті управління(БЩУ) (першопричина) та інформаційно обчислювальну систему(ІОС) (для реєстрації)[3].

Програмно-технічний комплекс системи аварійного та запобіжного захисту реактора за нейтронно-фізичними та технологічними параметрами призначений для ініціювання дії захисних систем безпеки реактора при неприпустимих відхиленнях роботи РУ, а також здійснення контролю та управління у процесі виконання ними захисних функцій.

Припинення реакції або зниження потужності РУ відбувається шляхом видачі відповідних сигналів у системі групового та індивідуального управління реактором(СГРУ-Р) органами регулювання реактора(ОР СУЗ)[4].

ПТК АЗ-ПЗ виконує функції системи безпеки, що керує. Згідно з НП 306.2.141-2008 ПТК АЗ-ПЗ відноситься до класу 2У. Компоненти ПТК АЗ-ПЗ, які не беруть участь у виконанні керуючих функцій (робоча станція(РС), робоче місце оператора(РМО), робоче місце технолога(РМТ)) відносяться до класу безпеки 3 і мають класифікаційне позначення 3Н. ПТК АЗ-ПЗ розрахований на режим цілодобової безперервної роботи з урахуванням проведення технічного обслуговування та ремонту[2].

АЗ та ПЗ формують команди на припинення, швидке зниження або уповільнення ланцюгової реакції у разі виникнення аварійних ситуацій.

Передбачено два комплекти ПТК АЗ-ПЗ. Обидва комплекти розділені по лініях зв'язку, електроживлення, вхідних та вихідних сигналів та розміщені в різних приміщеннях.

Кожен комплект ПТК АЗ-ПЗ спроектований таким чином, що у всьому проектному діапазоні зміни технологічних параметрів реакторної установки забезпечується аварійний захист не менше ніж трьома незалежними каналами за кожним технологічним параметром, за яким необхідно здійснювати захист.

Кожен комплект виконаний триканальним та працює за мажоритарним принципом «два з трьох».

Усі сигнали поділені на сигнали аварійного захисту (АЗ), попереджувального захисту першого роду (ПЗ-1) та попереджувального захисту другого роду (ПЗ-2). За цими сигналами відбуваються такі впливи на ОР СУЗ:

- аварійні сигнали (АЗ) викликають падіння всіх ОР СУЗ під впливом своєї ваги до крайнього нижнього положення. Припинення дії сигналу АЗ не може перервати падіння всіх ОР СУЗ до крайніх нижніх положень;

- попереджувальні сигнали першого роду (ПЗ-1) викликають почерговий рух донизу всіх груп ОР СУЗ (у порядку зменшення їх номерів) з робочою швидкістю. Рух ОР СУЗ донизу припиняється при зникненні сигналу ПЗ-1;

- попереджувальні сигнали другого роду (ПЗ-2) забороняють рух ОР СУЗ вгору до зняття сигналу ПЗ-2.

ПТК АЗ-ПЗ видає дискретні керуючі сигнали аварійного та попереджувального захисту (команди захисних дій) до інших систем енергоблоку:

- «АЗ» – у схему управління вимикачами вводів живлення виконавчих механізмів органів регулювання (ОР) системи управління та захисту (СУЗ): команда відключення живлення ОР СУЗ змінним струмом;

- «АЗ» – у підсистему живлення виконавчих механізмів ОР СУЗ постійним струмом, команда зняття резервного живлення з виконавчих механізмів ОР СУЗ;

- «АЗ» – у СДІУ-Р, команда зняття силового живлення з приводів ОР СУЗ;

- «АЗ» – у систему технологічних захистів та блокувань (ТЗБ);

- «АЗ» – до системи борного регулювання, команда включення насоса (УСБ);

- «ПЗ-1» – у СДІУ-Р, команда на опускання виділеної групи ОР СУЗ до зникнення сигналу;

- «ПЗ-1» – у ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, команда заборони автоматичного регулювання АРМ на час дії сигналу;

- «ПЗ-1» – у ПТК СРТ, команда зменшення потужності турбіни;

- «ПЗ-2» – у СДІУ-Р, команда заборони на підйом ОР СУЗ;

- «ПЗ-2» – у ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, команда заборони для АРМ збільшення потужності РУ;

- «ПЕРЕВІРКА» – у ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, сигнал про виведення першого (другого) комплексу ПТК АЗ-ПЗ у режим «ПЕРЕВІРКА».

У ПТК АЗ-ПЗ вжито заходів для фізичного захисту технічних засобів від несанкціонованого доступу, що передбачають закриття шаф на замки та пломбування.

Формування сигналів АЗ, ПЗ-1, ПЗ-2 забезпечується трьома незалежними каналами (трьома ШФС) ідентичними за своїм конструктивним виконанням та виконуваними функціями.

Інформація щодо кожного технологічного параметра вводиться від трьох незалежних джерел для кожного ШФС через відповідні ШПК, які виконують функцію сполучення. Конструкція ШФС дозволяє замість вхідних сигналів датчиків подавати сигнали від стенду перевірки каналу (СПК), який імітує вхідні сигнали.

Кожен канал реалізований на основі мажоритарної логіки, приймаючи сигнали захисту від двох інших каналів. На виході формуються сигнали «два з трьох», які надходять до КШВ.

КШВ реалізовано таким чином, що на його виході сигнали аварійного та попереджувального захисту сформуються тільки в тому випадку, якщо ці сигнали будуть сформовані хоча б двома ШФС.

Інформація від КШВ по оптоволоконним кабелям передається на РС. На моніторі РС подається візуальний контроль стану вхідних, вихідних та інформаційних сигналів, формування сигналів АЗ, ПЗ-1, ПЗ-2 у КШВ та в кожному з трьох каналів (ШФС), і даний режим роботи ПТК АЗ-ПЗ («РОБОТА», «ПЕРЕВІРКА»).

Діагностична та технологічна інформація формується в БДН кожного ШФС і по оптоволоконних кабелях передається на РС.

ШФС забезпечує:

- Прийом поточних значень технологічних параметрів;

- формування керуючих сигналів АЗ, ПЗ-1 ПЗ-2 при виході контрольованих технологічних параметрів за межі встановлених граничних значень (уставок);

- діагностику технічних та програмних засобів ПТК АЗ-ПЗ, що передбачає безперервний автоматичний контроль працездатності.

Важливою системою у даному питанні є також система підживлення-продування першого контуру.

Система підживлення-продування призначена для:

- компенсації неорганізованих протікань теплоносія першого контуру

(До 2,0 м<sup>3</sup>/год);

- заповнення та дозаповнення першого контуру розчином борної кислоти;

- підйому тиску в першому контурі під час проведення гідравлічних випробувань першого контуру;

- очищення та повернення в контур організованих протікань;

- зміни концентрації борної кислоти, у міру вигорання палива при змінах навантаження, при пусках та зупинках реактора;

- забезпечення у всіх нормальних режимах роботи енергоблока необхідної якості теплоносія першого контуру, величина підживлення-продування при цьому становить від 20,0 т/год до 60,0 т/год;

- подачі замикаючої води на ущільнення ГЦН (до 2,0 м<sup>3</sup>/год на кожний ГЦН);

- здійснення режиму дезактивації першого контуру та дегазації теплоносія;

- розхолодження КД при непрацюючих ГЦН;

- початкового заповнення ГЕ САОЗ;

- підтримки заданого рівня теплоносія в КД, що відповідає рівню потужності реактора;

- введення хімеагентів у перший контур з метою коригування водного режиму першого контуру;

- можливості подачі в перший контур у режимі знеструмлення, розчину борної кислоти з концентрацією не нижче поточної в деаераторі підживлювальної води;

- зниження тиску в першому контурі впрорскуванням в КД при відмові впрорскування від ГЦН або

необхідності екстреного зниження тиску в першому контурі.

Система функціонує в режимах нормальної експлуатації, включаючи перехідні режими енергоблоку, а також порушення в системі нормального енергопостачання (знеструмлення енергоблоку). В аварійних ситуаціях, пов'язаних із розущільненнями першого чи другого контурів, необхідність працездатності системи у кожній конкретній ситуації визначається відповідною процедурою. У режимах нормальної експлуатації система забезпечує перелічені вище вимоги.

Критерієм виконання системою своїх функцій є забезпечення необхідних витрат, температури, концентрації борної кислоти теплоносія першого контуру. У цих режимах устаткування та арматура перебувають у робочому становищі, тобто. працює один з підживлювальних насосів, відкрита арматура на лініях продування та підживлення, введені в роботу регулятори на лініях продування та підживлення.

Враховуючи, що система підживлення-продування повинна безперервно функціонувати в період нормальної експлуатації енергоблоку на потужності, насосні агрегати продубльовано з метою можливості виведення агрегатів на технічне обслуговування та ремонт.

До складу системи підживлення-продування першого контуру (ТК) входять такі підсистеми:

- продування першого контуру;
- деаерації продувної та підживлювальної води першого контуру;
- підживлення першого контуру та подачі ущільнюючої води на ГЦН.

Підсистема продувки першого контуру включає:

- регенеративний теплообмінник продування 1ТС30W01;
- доохолоджувач продування 1ТС30W02;
- трубопроводи, запірну та регулюючу арматуру, ЗВТ.

Підсистема деаерації включає:

- деаератор підживлення 1ТК10В01;
- деаератор борного регулювання 1ТН30В01;
- регенеративний теплообмінник підживлювальної води 1ТК10W01;
- регенеративний теплообмінник «чистого» конденсату 1ТН30W01;
- доохолоджувач підживлювальної води 1ТК11W01;
- трубопроводи, запірну та регулюючу арматуру, ЗВТ.

Підсистема підживлення першого контуру та подачі ущільнюючої води на ГЦН включає:

- три підживлювальні насосні агрегати з допоміжними системами мастила та охолодження 1ТК21(22,23)D01,02;
- трубопроводи, запірну та регулюючу арматуру, ЗВТ.

Усі підсистеми технологічно пов'язані між собою, а також із системами організованих протікань першого контуру (ТУ), СВО-1 (ТС), СВО-2 (ТЕ), «чистого» конденсату (ТН), спалювання водню (ТС), борного концентрату (ТД), бакового господарства (ТВ), пари низького тиску (РС), що гріє, технічної води відповідальних споживачів (VF), промконтуру (TF), спецгазоочищення (ТС), гідровипробувань та продування датчиків КВП (UD), вимірювання концентрації борної кислоти (СІКЛ) [7].

Деаератор борного регулювання 1ТН30В01 підключений до всмоктуючого трубопроводу підживлювальних насосів паралельно деаератору 1ТК10В01. Деаератори 1ТН30В01 та 1ТК10В01 з пристроєм однакові.

У деаераторі 1ТН30В01 знаходиться «чистий» конденсат, який використовується для подачі в перший контур зниження концентрації борної кислоти. Заповнюється деаератор 1ТН30В01 лише від системи чистого конденсату.

«Чистий» конденсат з деаератора 1ТН30В01, перш ніж вступити на всмоктування підживлювальних агрегатів, проходить через регенеративний теплообмінник 1ТН30W01. Охолодним середовищем служить «чистий» конденсат.

Дренаж та перелив 1ТН30В01 можливий лише в баки «чистого» конденсату.

Під час дослідження також важливою складовою є вплив та взаємодія попереджувального захисту 2 роду з ПТК АРП-РОП-ППЗ.

ПТК АРП-РОП-ППЗ у складі СУЗ енергоблоку призначений для виконання таких основних функцій:

- група функцій АРП - автоматичне регулювання потужності реактора в режимі підтримки заданого значення густини нейтронного потоку (режим "Н") або тиску в головному паровому колекторі (режим "Т"), або в режимі обмеження потужності залежно від тиску в головному паровому колекторі (режим "С");

- група функцій РОП - обмеження і зниження до безпечного рівня теплової потужності реактора в разі її підвищення або в разі відключення основного технологічного обладнання енергоблоку - ГЦН, ТПН, СКТГ, БВТГ. Рівень обмеження автоматично встановлюється залежно від стану основного технологічного обладнання енергоблоку;

- група функцій УПЗ - формування та видавання сигналів, що ініціюють спрацьовування прискореного попереджувального захисту в разі непланових вимкнень основного технологічного

обладнання енергоблока[7].

### **Мета роботи**

Метою даної роботи є проведення оцінки та можливостей щодо введення позитивної реактивності одночасно двома та більше способами, розроблення рекомендацій до роботи попереджувального захисту другого роду, аналіз систем, що впливають на можливе одночасне введення позитивної реактивності двома і більше способами.

### **Метод дослідження впливу на реактивність**

1. Розглянуті неспрацьовування сигналізацій першопричини спрацьовування ПЗ-1, ПЗ-2 за будь-якої з умов у двох комплектах. В такому разі необхідно зменшити потужність реакторної установки до  $50\%N_{ном}$  та усунути проблему протягом 24 годин. Якщо проблему не усунуто, то реакторна установка переводиться у режим «гарячого зупину» до усунення проблеми.

2. Проаналізовано використання допоміжних ОР СУЗ.

У перехідних процесах рекомендується початковий керуючий вплив на офсет здійснювати зміною концентрації борної кислоти в ТПК. Це забезпечує найменше збільшення коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення протягом перехідного процесу. Переміщенням груп ОР СУЗ варто підтримувати АО в інтервалі  $\pm 1\%$  від заданого значення  $AO_3$  при потужності РУ більше 80 %. Якщо потужність РУ знаходиться в діапазоні 30-80 %, то рекомендований інтервал АО дорівнює  $\pm 5\%$ .

Якщо впливу робочої групи на офсет недостатньо, варто ввести в активну зону допоміжні ОР СУЗ. Занурення допоміжних ОР СУЗ здійснюється ключом індивідуального управління кроками по 5-10 % від висоти активної зони послідовно кожен ОР СУЗ до положення, при якому значення АО опиниться в допустимому діапазоні від  $AO_3$ , і  $Kv_{ij}$  знаходиться в допустимих межах. Занурення допоміжних ОР СУЗ допускається не нижче, аніж до положення 60 % при рівні теплової потужності більше 80 %; при потужності менше 80% глибина занурення не обмежується.

Вилучення введених в активну зону допоміжних ОР СУЗ проводиться або при подальшому підйомі потужності за рахунок компенсації температурного і потужнісного ефекту реактивності, або при прогнозованій тривалій, більше 24 годин, роботі реактора на зниженому рівні потужності за рахунок підвищення концентрації борної кислоти в теплоносії. Компенсація реактивності при переміщеннях робочої групи ОР СУЗ та при вилученні допоміжних ОР СУЗ повинна здійснюватися шляхом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії[5].

3. Проаналізована система підживлення-продування, що безпосередньо впливає на проблему «транспортного запізнення» чистого конденсату, що й викликає похибки у роботі ПЗ-2. Розглянуто характеристики відцентрового насосу ЦН60-180, а також регенеративні теплообмінники 1TK10W01 та 1TN30W01[6].

4. Управління аксіальним розподілом поля енерговиділення в активній зоні реактора.

Допустимий аксіальний офсет ( $AO_d$ ) – граничне значення аксіального офсету з урахуванням відхилення на  $\pm 5\%$  і  $\pm 15\%$  від заданого значення ( $AO_d = AO_3 \pm 5\%$  для потужності РУ 80-100 % і  $AO_d = AO_3 \pm 15\%$  для потужності РУ 30-80 %).

Для реакторних установок, на яких не впроваджені У-алгоритми управління полем енерговиділення, при роботі реактору в нормальних умовах експлуатації на рівні потужності більше 80 %, відхилення офсету від його заданого стаціонарного значення не повинно перевищувати 5 %. У випадку неможливості виконати дане обмеження, реактор повинен бути розвантажений до рівня теплової потужності менше 80 % переміщенням вниз робочої групи ОР СУЗ.

У випадку зниження потужності в діапазоні 80-100 % від номінальної в результаті дії автоматичних регуляторів і захистів, допускається відхилення поточного офсету від його заданого стаціонарного значення більше аніж на 5 % на час не більше 12 годин від початку зниження потужності.

При збільшенні потужності в діапазоні 80-100% від номінальної відхилення офсету від його заданого стаціонарного значення не повинно перевищувати 5%.

При роботі реактору на рівні теплової потужності в діапазоні 30-80 % від номінальної відхилення поточного АО від заданого значення не має перевищувати 15 %. У разі неможливості виконати дане обмеження, реактор повинен бути розвантажений до рівня теплової потужності менше 30 %, якщо протягом 1 години засобами впливу на реактивність не вдалося повернути поточний офсет у допустимі межі ( $\pm 15\%$  від заданого значення).

При роботі реактору на рівні теплової потужності нижче 30 % від номінальної відхилення поточного АО від заданого значення не контролюється, але повинні виконуватися обмеження по допустимим значенням  $Kq$  і  $Kv$ .

При тривалій роботі РУ на рівнях потужності 90-100 % значення АО рекомендується підтримувати в інтервалі  $\pm 2\%$  від заданого значення  $AO_3$ , а у разі відхилення АО з будь-яких причин рекомендується якнайшвидше (протягом 0,5 години) повернути АО у зазначений інтервал. Інакше ускладнюється завдання утримання АО і виникають передумови збільшення амплітуди ксенонових коливань

У перехідних режимах часткового розвантаження/навантаження енергоблоку ( $W \geq 80\%$ ) з регламентною швидкістю розвантаження/навантаження рекомендується поточне значення АО підтримувати в інтервалі  $\pm 1\%$  від заданого значення АО<sub>з</sub>, що відповідає моменту закінчення стаціонарного режиму роботи РУ[5].

4. Аналіз зміни концентрації борної кислоти в теплоносії.

Необхідний об'єм підживлення для зміни концентрації борної кислоти в теплоносії визначається залежністю[5]:

$$V_{\text{підж}} = V_{1к} \cdot \frac{\rho_{1к}}{\rho_{\text{підж}}} \cdot \ln \frac{C_{\text{поч}} - C_{\text{підж}}}{C_{\text{кін}} - C_{\text{підж}}}, \quad (1)$$

де  $V_{\text{підж}}$  – об'єм підживлення, м<sup>3</sup>;

$V_{1к}$  – об'єм ТПК (при рівні в КТ, що відповідає  $W_{\text{ном}}$ ), в даній симуляції прийнятий рівним 413 м<sup>3</sup>;

$\rho_{1к}$  – густина ТПК, в даній симуляції прийнята рівною 720,5 кг/м<sup>3</sup> (160 кгс/см<sup>2</sup>, 303,3 °С);

$\rho_{\text{підж}}$  – густина підживлення, за нормальних умов рівна 1000 кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{поч}}$ ,  $C_{\text{кін}}$  – початкова і кінцева концентрація борної кислоти в ТПК, г/кг;

$C_{\text{підж}}$  – концентрація борної кислоти в підживленні, г/кг.

Поточне значення концентрації борної кислоти в ТПК при підживленні РБК або дистиллятом в залежності від часу після початку водообміну визначається залежністю:

$$C(t) = C_{\text{підж}} + (C_{\text{поч}} - C_{\text{підж}}) \cdot \exp\left(-\frac{\rho_{\text{підж}} \cdot G_{\text{підж}} \cdot t}{\rho_{1к} \cdot V_{1к}}\right), \quad (2)$$

де  $G_{\text{підж}}$  – об'ємна витрата підживлення, м<sup>3</sup>/год.

5. Практичні дослідження на тренажері реакторної установки доводять, що сигнал ПЗ-2 знімається через хвилину після закриття арматур на введення чистого конденсату, при тому, що наявна позитивна реактивність зберігається близько 10 хвилин після їх закриття. Проведені три досліди показали подібні результати, що вказують на наявність проблеми у роботі попереджувального захисту другого роду.

#### Обговорення результатів

Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні модернізації систем для безпеки ядерних установок типу ВВЕР-1000. Це може бути здійснене при модернізації системи підживлення-продувки, а також попереджувального захисту другого роду. Такі модернізації дозволять зменшити «транспортну затримку», а також внести зміни у роботу ПЗ-2.

Модифікації насосного обладнання системи підживлення-продування дозволять за менший час подавати чистий конденсат, що призведе до зменшення часу заборони ПЗ-2, що дозволить краще та ефективніше керувати ядерною установкою.

Модифікація системи попереджувального захисту другого роду дозволять у повній мірі виконувати вимогу на технічну заборону одночасного введення позитивної реактивності двома та більше способами.

#### Висновки

1. Пропонується змінити роботу попереджувального захисту другого роду, аби вона залежала від показників реактивності в активній зоні реактора.

2. Виправити проблему «транспортної затримки» шляхом модернізації системи підживлення-продування, або змін у роботі ПЗ-2 з врахуванням часу «транспортної затримки».

#### Список використаної літератури

1. Про затвердження Правил ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском. Держатомрегулювання України; Наказ, Правила від 15.04.2008 № 73 Посилання: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0512-08#Text>

2. Програма технічного обслуговування програмно-технічного комплексу системи аварійного та попереджувального захисту (ПТК АЗ-ПЗ) енергоблок № 1 ПМ.1.0011.0224

3. Технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку №1 ПАЕС. РГ.1.3810.007.

4. Програмно-технічний комплекс системи аварійного та попереджувального захисту енергоблоку № 1 Інструкція з експлуатації ІЕ.1.0011.0631

5. Альбом нейтронно-фізичних характеристик 38-го паливного завантаження реактора енергоблоку №1 ПАЕС. НФ.1.0023.0065.

6. Система підживлення-продування першого контуру енергоблоку № 1. Інструкція з експлуатації. ІЕ.1.0001.0098

Програмно-технічний комплекс автоматичного регулювання, розвантаження та обмеження потужності реактора та прискореного попереджувального захисту. Енергоблок №1. ІЕ.1.0011.0635

T.Bibik<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-0134-6022

I.Ostapenko<sup>1</sup>, engineer, ORCID 0000-0003-3980-1609

V.Kuzmenko<sup>1</sup>, master student, ORCID 0009-0007-4306-3078

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE BAN ON THE SIMULTANEOUS INTRODUCTION OF POSITIVE REACTIVITY IN TWO OR MORE WAYS

*The main reason for the prohibition of simultaneous injection of positive reactivity in two or more ways is the requirements of the nuclear safety rules for reactor installations. The introduction of positive reactivity by the means of influence on reactivity, provided for by the technical design of the reactor installation, should be excluded, if the emergency protection working bodies are not brought to the working position. Technical measures should exclude the possibility of introducing positive reactivity simultaneously by two or more provided means of influencing reactivity, as well as introducing positive reactivity by means of influencing reactivity during fuel loading and unloading. The rate of increase in reactivity by means of influencing the reactivity should not exceed 0.07  $\beta_{eff}/s$ . For the working bodies of the control and protection system with an efficiency of more than 0.7  $\beta_{eff}$ , the introduction of positive reactivity should be stepwise, with a step weight of no more than 0.3  $\beta_{eff}$  (provided by technical measures). In the technical design of the RU, the size of the step, the pause between steps and the rate of increase in reactivity should be indicated.*

*The consequence of introducing positive reactivity in two or more ways is a possible violation of the conditions for normal operation of nuclear power plants due to an uncontrolled increase in the neutron flux in operating and emergency modes of the reactor. The installed second-type warning protection, which is supposed to solve this problem, has shortcomings in its operation that lead to a clear violation of the current prohibition on the simultaneous introduction of positive reactivity in two or more ways. On the basis of the conducted research, the existing error in the operation of the PP-2 was identified and analyzed. To avoid the problem with the simultaneous introduction of positive reactivity in two or more ways, it is proposed to modernize the system of PP-2 with its further operation on reactivity indicators.*

**Keywords:** preventive protection, modernization, positive reactivity, nuclear safety.

### References

1. On the approval of the Nuclear Safety Rules for reactor installations of nuclear plants with pressurized water reactors. State Nuclear Regulation of Ukraine; Order, Rules of 04/15/2008 No. 73 Ref: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0512-08#Text>
2. Maintenance program of the software and hardware complex of the emergency and preventive protection system (SHC EP-PP) power unit No. 1 MP.1.0011.0224
3. Technological regulations for the safe operation of unit No. 1 of the SUNPP. RG.1.3810.007.
4. Software and hardware complex of the emergency and preventive protection system of power unit No. 1 Operating Manual OM.1.0011.0631
5. Album of neutron-physical characteristics of the 38th fuel loading of the reactor of power unit No. 1 of SUNPP. NP.1.0023.0065.
6. Supply-blow system of the first circuit of power unit No. 1. Operating Manual. OM.1.0001.0098
7. Software and technical complex of automatic regulation, unloading and limitation of reactor power and accelerated warning protection. Power unit No. 1. OM.1.0011.0635

Надійшла: 12.08.2024

Received: 12.08.2024