

К. Н. КОБА, С. С. ЛИС, Т. Ю. КРАВЕЦЬ, О. Г. ЮРАСОВА, І. Р. ГАЛЯНЧУК

ОЦІНКА МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ МАСИ ТЕПЛОНОСІЯ ПЕРШОГО КОНТУРУ АЕС З БЛОКАМИ ВВЕР-1000

Під час проектування АЕС з блоками ВВЕР-1000, які сьогодні становлять основу атомної енергетики України, розвиток інформаційно-обчислювальних систем (ІОС) був недостатній для вирішення багатьох завдань через малі потужності обчислювальних систем. В даний час багато ІОС замінено на новіші, обчислювальні можливості яких у тисячі разів перевершують своїх попередників. Завантаження ІОС зараз не перевищує 1 % – 2 %, це пов'язано з використанням спрощених моделей. Запропоновано модель, яка адекватно описує розглянуті процеси та може працювати в режимі реального часу, що суттєво збільшує діапазон використання. Вона має незначну обчислювальну трудомісткість, отже, може бути реалізована на існуючій ІОС. Запропоновано методику, яка в результаті проведеного тестування показала свою ефективність і в ряді випадків, більш високу точність та роздільну здатність.

Ключові слова: інформаційно-обчислювальні системи, маса теплоносія, коефіцієнт використання встановленої потужності, вихідні події, теплова потужність реактора.

K. KOBA, S. LYS, T. KRAVETS, O. YURASOVA, I. GALYANCHUK ASSESSMENT OF THE MODEL FOR CALCULATING THE MASS OF THE COOLANT OF THE FIRST CIRCUIT OF THE NUCLEAR POWER PLANT WITH VVER-1000 UNITS

During the design of the nuclear power plant with VVER-1000 units, which today form the basis of the nuclear power industry of Ukraine, the development of information and computing systems (ICS) was insufficient to solve many tasks due to the small capacities of computing systems. Currently, newer ones, the computing capabilities of which are thousands of times greater than their predecessors, have replaced many ICS. ICS download currently does not exceed 1 %...2 %, this is due to the use of simplified models. A model is proposed that adequately describes the considered processes and can work in real time, which significantly increases the range of use. It has a small computational effort, so it can be implemented on the existing ICS. A method has been proposed which, as a result of testing, has shown its effectiveness and, in some cases, higher accuracy and resolution.

Key words: information and computing systems, mass of heat carrier, coefficient of use of the installed capacity, initial events, thermal power of the reactor.

Вступ

За часів проектування АЕС з блоками ВВЕР-1000, які нині становлять основу атомної енергетики України, розвиток інформаційно-обчислювальних систем (ІОС) був недостатнім для вирішення багатьох завдань. Через малі потужностей обчислювальних систем більшість завдань спрощувалося чи зводилося до зменшення трудомісткості. В даний час багато ІОС замінено на новіші, обчислювальні можливості яких у тисячі разів перевершують своїх попередників. Завантаження ІОС зараз не перевищує 1 %–2 %, це пов'язано з використанням спрощених моделей. Отже, існуючі модернізовані ІОС використовуються не ефективно.

Одне з питань, яке гостро постало останнім часом перед експлуатуючим персоналом, є ідентифікація малих течій першого контуру реакторів ВВЕР-1000, що є однією з небажаних сторін ядерної енергетики та причин опромінення персоналу або населення у разі виходу радіоактивних речовин за межі встановлені в проекті.

Течі першого контуру є причиною виходу радіоактивних речовин за межі першого контуру. На ЯЕУ, що діють в Україні, використовуються реактори з водою під тиском. При значних пошкодженнях першого контуру матиме місце течія першого контуру, яку без особливих проблем зафіксують датчики, що призведе до спрацьовування

захисту. Складніша ситуація при незначних пошкодженнях і течіях першого контуру.

Датчики мають певну чутливість, завдяки цьому на реакторах ВВЕР-1000 на даний момент немає можливості оперативної ідентифікувати течі до 3 м³/год. Але дані течі можуть завдати значної шкоди, особливо якщо вони утворюються на дорогому обладнанні, оскільки відбувається поступове руйнування та забруднення обладнання.

Захист першого контуру від течі заснований на контролі тиску в першому контурі і рівня в компенсаторі тиску (КТ). Для нас не є цікавими течі, за яких спрацьовуватиме автоматика, оскільки ідентифікація течі вже відбулася. Розглянемо ті проблеми, які є при ідентифікації малих течій.

Течія першого контуру веде до виходу радіоактивних речовин за межі першого контуру, що веде до зміни радіаційної обстановки. У зв'язку з використанням у [1] концепції течія перед руйнуванням необхідно найбільш рання її ідентифікація.

Мета роботи

Метою роботи є побудова програмно-технічного комплексу контролю основних параметрів реакторної установки. Розробити модель розрахунку маси теплоносія першого контуру АЕС з блоками ВВЕР-1000.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У існуючих ІОС немає автоматичної ідентифікації течій з витратою до $3 \text{ м}^3/\text{год}$, що веде до зниження надійності за рахунок людського фактора [1]–[4]. Необхідно відзначити роботу регулятора рівня першого контуру, зміну температури першого контуру та КТ. Усе це ускладнює визначення протікання першого контуру. Проведемо аналіз параметрів, щодо зміни яких можна говорити про течі першого контуру.

Одним з таких параметрів може бути рівень КТ, так як при зміні маси теплоносія змінюється і об'єм, а як наслідок це тягне за собою зміну рівня в КТ. Однак об'єм теплоносія в першому контурі залежить не тільки від маси теплоносія, але і від температури, тиску $H_{\text{КТ}} = f(M, t, P)$. Рівень КТ на реакторах ВВЕР-1000 підтримується регулятором рівня згідно із законом регулювання, який так само залежить від температури теплоносія [4].

Іншим параметром може бути поле іонізуючих випромінювань, яке змінюватиметься при появі течі. Датчики вимірювання поля іонізуючих випромінювань, зокрема потужності експозиційної дози мають значні похибки. Крім того, робота вентиляційних систем та іншого обладнання роблять додатковий внесок у похибки пов'язані з визначенням місця та розміру течі. Утворення свищів призводить до появи додаткових вібрацій резонанси яких знаходяться на певних частотах, отже, є можливість ідентифікувати течію акустичними датчиками.

Виходячи з вище сказаного, ми можемо зробити висновок, що параметри, які вимірюються в реакторних установках типу ВВЕР-1000 для ідентифікації течі, вимагають додаткового аналізу. Цей аналіз нині проводить оперативний персонал, що у одних і тих випадках може призводити до неоднозначності трактування події через відмінності у сприйнятті. На даний момент розвиток обчислювальної техніки, зокрема обчислювальні потужності ІОС, дозволяють проводити значні обчислення та аналіз групи параметрів у реальному масштабі часу. У зв'язку з цим необхідно проводити дослідження у сфері пошуку ефективних моделей і методів пошуку малих течій, дана вимога описана в [1] і є необхідною для ліцензування нових енергоблоків.

На даний момент ведуться роботи з розробки різних систем пошуку течій першого контуру [5]–[7]. Розглянемо переваги та недоліки найперспективніших на наш погляд.

Система, заснована на вимірі поля іонізуючого випромінювання, є найбільш поширеною. До переваг даної моделі або системи, побудованої на основі даної моделі, можна віднести найбільшу вивченість, достатню надійність при експлуатації,

можливість перенесення моделі з блоку на блок без зміни. До недоліків віднесемо дорожнечу системи, ретельність налаштування, необхідність періодичної перебудови системи.

Система, заснована на вимірі шуму течі, в даний час ведуться роботи з розробки моделей та методів пошуку та діагностування типу та місця течі. Перевагою цієї моделі є низька ціна, простота установки, висока надійність; недоліком є складність використання на нерегулярних структурах, необхідність перегляду алгоритму при виході з ладу одного або кількох датчиків, ймовірність помилкових спрацювань.

Система у вигляді програмної надбудови ІОС для аналізу технологічних параметрів реакторної установки [4, 7, 8]. Ця система випала з поля зору більшості дослідників і розробників хоч і є досить перспективною, оскільки не вимагає додаткових вкладень в обладнання, через однотипність основного обладнання може бути перенесена з блоку на блок без значних доробок. До недоліків можна віднести необхідність тестування вихідних даних для запобігання хибних спрацювань, неможливість оперативного визначення малих течій до $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$.

З вище сказаного найефективніше застосування гібридних систем, у яких найповніше враховані особливості діагностованого устаткування, і навіть економічна доцільність. Модулі пошуку течій зі змін радіаційних параметрів реалізовано у вигляді автоматизованої системи радіаційного контролю (АСРК), акустичного, програмного модуля діагностування малих течій реалізованого в системі надання параметрів безпеки (СНПБ).

Збільшення точності та однозначності наданих ІОС даних

Одним з питань, які вимагають уточнення є визначення поточної маси теплоносія першого контуру і, це може забезпечити розширення можливостей програмного модуля діагностування малих течій реалізованого в системі надання параметрів безпеки. Визначення поточної маси необхідне для коректної роботи регулятора рівня компенсатора тиску. Згідно з даними ОКБ «Гідропрес», робота регулятора рівня в КТ повинна підтримувати постійну масу теплоносія першого контуру при змінах потужності реакторної установки (РУ). Також зміна маси теплоносія першого контуру [4] характеризує наявність та розмір виток теплоносія.

У СНПБ існує програмний модуль визначення маси теплоносія першого контуру [4]. Він працює на основі наступної формули:

$$M = \text{const} + \Delta M, \quad (1)$$

$$\Delta M = 4,2\Delta H_{\text{КТ}} + 6,9(\Delta H_{\text{ТК}} + \Delta H_{\text{ТГ}}) +$$

$$+ 16\Delta H_{\text{ББ}} - 0,65\Delta \bar{T}_{\text{1К}}, \quad (2)$$

де M – приріст маси теплоносія в першому контурі, м³/год;

ΔH – зміна рівня в компенсаторі тиску ($\Delta H_{\text{КТ}}$), деаераторі підживлення ($\Delta H_{\text{ТК}}$), баку організованих протікань ($\Delta H_{\text{ТУ}}$), барботажному баку ($\Delta H_{\text{ББ}}$), м/год;

ΔT – середня температура теплоносія першого контуру, °С/год.

Результати розрахунку маси за СНПБ характеризуються значними флуктуаціями, тому до них застосовано згладжування на відрізках часу 5, 10, 15, 30, 60 хвилин. Даний модуль, не повною мірою враховує всі процеси, що мають місце при експлуатації РУ, оскільки розроблений на основі сильно спрощеної моделі РУ з використанням обмеженої кількості вхідних параметрів.

Було розроблено альтернативну методику розрахунку маси теплоносія першого контуру. Розроблена методика заснована на уточненні деяких параметрів, що входять у рівняння (2). Дана методика розраховує масу теплоносія, а не її приріст M , і може бути реалізована на існуючих ІОС в режимі реального часу. Крім того, уточнюється ряд основних розрахункових параметрів першого контуру.

Розроблена методика є програмною надбудовою, яка не втручається в роботу ІОС та не змінює вихідні дані, всі розрахункові дані можуть бути оброблені за допомогою різних статистичних методів, що необхідно у разі використання їх у вигляді даних для експертної системи.

Одним із таких ефективних прийомів короткострокового прогнозування та згладжування динамічного ряду з метою відсіювання флуктуацій з урахуванням «старіння» даних є використання експоненційної середньої [4] Q_i (згладженого значення рівня ряду) на момент t_i , яка для ряду $\{H_i\}_i$ має вигляд

$$Q_i = \alpha H + (1 - \alpha) Q_{i-1}, \quad (3)$$

де α – параметр згладжування, $0 < \alpha \leq 1$, задає вагу поточного спостереження.

Можна показати, що похибка розрахунку згідно (2) становить близько 1 м³ і це в стаціонарному режимі, запропонована методика дозволяє вийти на 0,2 – 0,3 м³ без використання згладжування, 0,1 м³ з використанням згладжування.

$$\bar{T}_{\text{1К}} = \frac{V_{\text{реакт}} \bar{T}_{\text{реакт}} + V_{\text{КТ}} T_{\text{КТ}} + \sum_{i=1}^4 (T_{\text{ГН}i} V_{\text{ГН}i} + \bar{T}_{\text{ПГ}i} V_{\text{ПГ}i} + T_{\text{ХН}i} V_{\text{ХН}i})}{V_{\text{1К}}}. \quad (5)$$

Параметри та методи контролю

Середня температура, точність розрахунків. Проблеми, пов'язані з точністю розрахунку протікання першого контуру, пов'язані в першу чергу, не тільки з точністю та достовірністю вимірювання рівня в компенсаторі тиску, а також з точністю визначення середньої температури теплоносія.

Як видно з (2) у стаціонарних режимах визначення середньої температури теплоносія першого контуру, як середнього арифметичного між температурою гарячих та холодних ниток, задовільно для пошуку дебалансу теплоносія.

Однак при нестаціонарних режимах, а також у перехідних режимах в режимах з відключеним головним циркуляційним насосом визначення середньої температури першого контуру, як середнього арифметичного температур гарячих і холодних ниток не прийнятно. Тому виникає необхідність розрахунку реальної середньої температури першого контуру, яка має прийнятну точність у всіх режимах нормальної експлуатації та при порушеннях нормальної експлуатації.

Запропонуємо метод розрахунку середньої температури першого контуру на основі використання вимірюваних температур першого контуру та усереднення за обсягами з однаковою температурою. Об'єм теплоносія першого контуру в устаткуванні наведено в табл. 1. Дані характеристики можуть уточнюватися та наведені як приблизні значення для обґрунтування методики.

Визначимо повний об'єм першого контуру, який займає теплоносії при номінальних параметрах:

$$V_{\text{1К}} = V_{\text{реакт}} + V_{\text{КТ}} + 4V_{\text{ГН}} + 4V_{\text{ПГ}} + 4V_{\text{ХН}}, \quad (4)$$

де $V_{\text{реакт}} = 107,6$ м³; $V_{\text{КТ}} = 56,7$ м³; $V_{\text{ГН}} = 5,7$ м³; $V_{\text{ПГ}} = 21$ м³; $V_{\text{ХН}} = 15,1$ м³.

Крім того, необхідно врахувати $V_{\text{ГЦН}} = 2,5$ м³, як об'єм холодної нитки головного циркуляційного трубопроводу.

$$V_{\text{1К}} = 107,6 + 56,7 + 4 \cdot 5,7 + 4 \cdot 21 + 4 \cdot 15,1 + 4 \cdot 2,5 = 341,5 \text{ м}^3.$$

Запишемо формулу для визначення середньої температури теплоносія першого контуру як функцію вимірюваних температур та об'ємів, що зайняті цими температурами:

Таблиця 1 – Геометричні характеристики обладнання першого контуру

Найменування обладнання та елементів	Об'єм, м ³	Довжина тракту (висота), м	Діаметр (ширина), м	Мінімальний прохідний переріз, м ²
Реактор, у тому числі:	107,6	–	–	–
– вхідний патрубок	0,4	0,63	0,85	0,567
– кільцевий опускний канал	20,0	7,08	0,263	2,15
– нижня камера змішування	12,4	1,76	–	1,7
– активна зона	14,8	3,53	–	4,17
– верхня камера змішування	59,6	6,87	–	4,6
– вихідний патрубок	0,4	0,63	0,85	0,567
Гаряча нитка петлі	5,7	10,1	0,85	0,567
Холодна нитка петлі	15,1	26,6	0,85	0,567
Парогенератор, у тому числі:				
– вхідний колектор	2,4	4	0,834	0,546
– трубочатка	16,2	11,1 (середня)	0,013 (одна трубка)	1,46
– вихідний колектор	2,4	4	0,834	0,546
Компенсатор тиску, у тому числі:				
– корпус*	79 (55 вода)	(11,2)	3,0	7,06
– трубопровід	1,69	18	0,346	0,094
Пасивна частина системи аварійного охолодження активної зони (САОЗ), у тому числі:				
– ємність САОЗ*	60 (50 вода)	(8,5)	3,00	7,06
– трубопровід, що з'єднує ємність САОЗ із нижньою камерою змішування	1,6	26,5	0,279	0,061
– трубопровід, що з'єднує ємність САОЗ з верхньою камерою змішування	1,8	29,3	0,279	0,061

* Величина змінна.

Як слід зауважити, ми розглядаємо температуру теплоносія за парогенератором і реактором як середню температуру. Середню температуру по парогенератору розглядатимемо як просто серед-

ню температуру. Для реактора розглянемо кілька об'ємів:

$$V_{\text{реакт}} = V_{\text{ВхіддоАЗ}} + V_{\text{АЗ}} + V_{\text{АЗВихід}} \quad (6)$$

Тоді температуру визначимо, як:

$$\bar{T}_{\text{реакт}} = \frac{V_{\text{ВхіддоАЗ}} T_{\text{ВхіддоАЗ}} + \bar{T}_{\text{АЗ}} V_{\text{АЗ}} + T_{\text{АЗВихід}} V_{\text{АЗВихід}}}{V_{\text{реакт}}} \quad (7)$$

де $\bar{T}_{\text{АЗ}} = \frac{T_{\text{ВхіддоАЗ}} + T_{\text{АЗВихід}}}{2}$; $V_{\text{ВхіддоАЗ}} = 32,8 \text{ м}^3$,

$V_{\text{АЗ}} = 14,8 \text{ м}^3$, $V_{\text{АЗВихід}} = 60 \text{ м}^3$.

Ми визначили середню температуру першого контуру як функцію, в якій постійними величинами є об'єми, які займає теплоносій, за винятком об'єму компенсатора тиску, який є функцією від температури [2], [3]. Температури що у формулі може бути виміряні. Об'єми можуть бути уточнені у процесі адаптації методу до конкретного енергоблоку.

Для розрахунку середньої температури першого контуру необхідно врахувати, що об'єм теплоносія в компенсаторі тиску є функцією від максимального значення перепаду температур на петлі. Тобто об'єм першого контуру є функцією температури, що ускладнює методику розрахунку.

Алгоритм розрахунку рівня КТ. Розрахунок проводиться тільки при достовірних вхідних параметрах за наступним алгоритмом: Якщо $T_{\text{ниж}} \leq T_{\text{max}} \leq T_{\text{верх}}$, то регламентне значення рівня КТ визначається за формулою, закладеною в регуляторі YPC02:

$$L_{\text{рег}} = \frac{877 - 570}{T_{\text{верх}} - T_{\text{ниж}}} (T_{\text{пих}} - T_{\text{ниж}}) + 570 \quad (8)$$

Якщо $T_{\text{max}} > T_{\text{верх}}$, то $L_{\text{рег}} = 877$; $T_{\text{max}} < T_{\text{ниж}}$, то $L_{\text{рег}} = 570$.

Поставимо у відповідність до регламентного рівня в КТ обсяг теплоносія: якщо $T_{\text{ниж}} \leq T_{\text{max}} \leq T_{\text{верх}}$, то

$$V_{\text{рег}} = L_{\text{рег}} S_{\text{КТ}} + 33,3 \quad (9)$$

Ми визначили обсяг теплоносія для режимів роботи ЯЕУ на потужності, і можемо розрахувати зміну маси теплоносія першого контуру, використовуючи достовірні значення рівня КТ. Необхідно

лише внести деякі зміни до констант, що використовуються у розрахунках. Як говорилося вище, достовірність цієї методики в інтервалі рівнів 380 – 1010 см. Наведемо послідовність обчислень до розрахунку маси теплоносія у першому контурі.

$$V_{KT\text{ зм}} = (H_{зм} - 380)S_{KT} + 19,9. \quad (10)$$

Об'єм КТ необхідно розраховувати щоразу для періоду розрахунку протікання теплоносія першого контуру. Трудомісткість розрахунку трьох операцій розраховуємо за рівнянням (6).

Об'єм реактора можна розрахувати один раз, трудомісткість трьох операцій, і зберігати в пам'яті.

$$V_{IK} = V_{\text{реакт, КТ, петлі}} + V_{KT}, \quad (11)$$

де

$$V_{\text{реакт, КТ, петлі}} = V_{\text{реакт}} + 4V_{ГН} + 4V_{ПГ} + 4V_{ХН}. \quad (12)$$

Об'єм першого контуру, який розраховується щоразу, має трудомісткість в одну операцію,

$$\bar{T}_{\text{реакт}} = \frac{V_{\text{ВхіддоАЗ}}T_{\text{ВхіддоАЗ}} + \bar{T}_{\text{АЗ}}V_{\text{АЗ}} + T_{\text{АЗВихід}}V_{\text{АЗВихід}}}{V_{\text{реакт}}}, \quad (15)$$

Для температури реактора необхідно шість операцій, а середньої температури першого контуру необхідно 17 операцій.

Для розрахунку маси теплоносія першого контуру необхідно знайти щільність теплоносія при номінальному тиску де $\rho_{\text{середн}} \Leftrightarrow \bar{T}_{IK}$. Слід зазначити, що щільність меншою мірою залежить від тиску теплоносія, тому щільністю складової можна знехтувати.

$$M_{\text{const}} = \rho_{\text{середн}}V_{IK}, \quad (16)$$

де M_{const} – маса теплоносія першого контуру у певний момент часу. ΔM можна розрахувати як різницю між масою теплоносія в даний момент і масою в попередній момент часу. Відхилення маси теплоносія від регламентного значення можна розрахувати, як різницю регламентованої маси для поточного значення часу та вимірної. ΔM можна також розраховувати, використовуючи формулу (2) для відхилення від регламентного значення та за останній період.

Трудомісткість розрахунків для ΔM незначна. Однак, коефіцієнт при ΔT , визначений експериментально, необхідно уточнити для значення середньої температури. У випадку цей коефіцієнт є функцією від температури.

Реалізація та результати тестування

Розроблену методику розрахунку маси теплоносія першого контуру було реалізовано у вигляді програмного комплексу, який тестувався з використанням реальних даних протоколів ІОС блоку № 1 Хмельницької АЕС. Ця тестова модель призначена для розрахунку маси теплоносія першого контуру та інших основних об'ємів, що бе-

оскільки розраховується один раз, з трудомісткістю шість операцій, і зберігається у пам'яті.

$$\bar{T}_{\text{АЗ}} = \frac{T_{\text{ВхіддоАЗ}} + T_{\text{АЗВихід}}}{2}, \quad (13)$$

$$\bar{T}_{\text{ПГі}} = \frac{T_{\text{ХНі}} + T_{\text{ГНі}}}{2}. \quad (14)$$

Враховуючи, що $T_{\text{ВхіддоАЗ}} = (\Sigma T_{\text{ХНі}})/4$, $T_{\text{АЗВихід}} = (\Sigma T_{\text{ГНі}})/4$, трудомісткість розрахунку середньої температури по АЗ становить 12 операцій, для парогенератора дві операції для кожного парогенератора. Слід зазначити, що $T_{\text{ХНі}}$, $T_{\text{ГНі}}$ будемо розглядати як середнє арифметичне датчиків температурного контролю, це не вимагатиме додаткових обчислювальних затрат, оскільки ці значення розраховуються в СВРК і передаються в ІОС.

руть участь у балансі теплоносія першого контуру. Запропоновану модель немає можливості порівняти з аналогічними моделями, тому що на даний момент відсутні відповідні дані про існування аналогічних моделей в інших країнах, що використовують реакторні установки типу ВВЕР-1000.

Проведене тестування показало адекватність запропонованої моделі, а також не повноту її реалізації (не було враховано аспекти, пов'язані зі зміною маси теплоносія у трубопроводах підживлення-продування та інших супутніх систем). Слід зауважити, що на даному етапі роботи ставилася мета перевірки застосування розробленого підходу, а не створення максимально повної моделі. Нижче викладемо деякі отримані результати.

Тестування проводилося з використанням даних, отриманих при протіканні різних режимів роботи РУ (стаціонарний стан, зниження потужності, скидання навантаження), дане тестування не можна назвати повним, оскільки не було проведено тестування на даних з реальною течією в нестаціонарних умовах, а також в інших нестаціонарних процесах.

Запропонована методика дозволяє врахувати деякі важливі аспекти, що не враховуються існуючими моделями. Для порівняння, надалі будуть наведені результати обчислення режимів, прийнятих до розгляду за методикою, застосованою в СНПБ блоку № 1 Хмельницької АЕС.

При тестуванні розробленої методики застосовувалися архівні дані ІОС блоків для перехідних та стаціонарних процесів, що мали місце при експлуатації. На аналізованому етапі проаналізовано такі режими: стаціонарний, короткочасне припинення підживлення першого контуру, зниження потужності, спрацювання АЗ реактора.

Стаціонарний режим. Для попереднього тестування методики при даному режимі розроблено програму отримання вихідних даних. Згідно з цією програмою проводилися зміни рівнів у компенсаторі тиску та деаераторі підживлення 1-го контуру при незмінних масі та середній температурі теплоносія першого контуру (перший тест), а також проводилася зміна середньої температури теплоносія першого контуру при незмінних рівнях у деаераторі підживлення та масі теплоносія першого контуру (другий тест). Зміни параметрів проводилися за дотримання регламентованих експлуатаційних меж. Результати наведено на наступних графіках. Потужність реакторної установки становила близько 690 МВт електричних.

Тест 1

На рис. 2 і 3 показано взаємний перерозподіл маси теплоносія за рахунок зміни витрати підживлення першого контуру. Певна несиметричність графіків обумовлена роботою регулятора рівня баку організованих протікань.

На рис. 4 повинна вийти пряма лінія так як не проводилося небалансне скидання або підживлення контуру у складі першого контуру деаератора підживлення-продування, і баку організованих

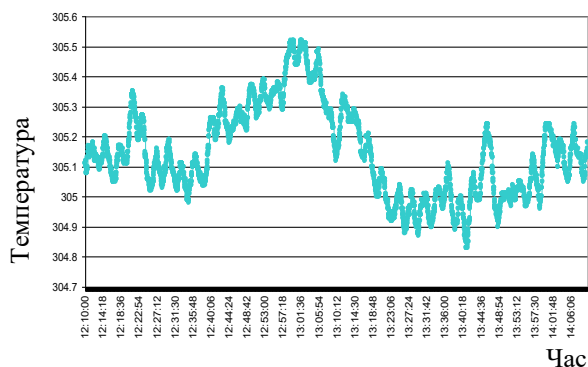


Рис. 1 – Середня розрахункова температура першого контуру

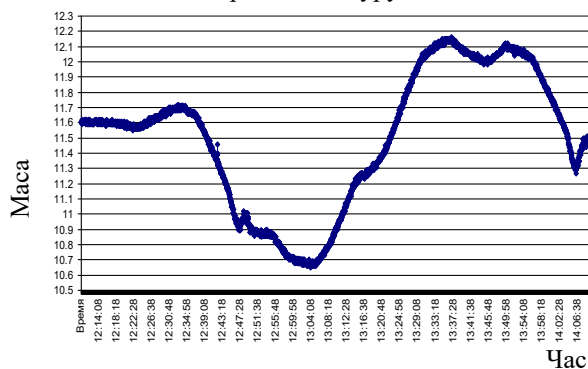


Рис. 3 – Маса теплоносія в деаераторі підживлення-продування

протікань. Але як говорилося вище, через неповноту моделі зміна маси теплоносія в лініях підживлення продування не враховується.

Як видно з графіків (рис. 1–4) точність моделі обмежена такими факторами:

- «шум» датчиків, який у перерахунку на вихідний параметр становить $0,2 - 0,3 \text{ м}^3$;
- похибка самої моделі $0,2 - 0,3 \text{ м}^3$ внаслідок спрощень.

Як вже було сказано, при виконанні цього етапу роботи не ставилася мета розробки максимально повної моделі, проте навіть для спрощеної моделі і без застосування методів статистики, досягнуто результатів, порівнянних (а в частині випадків, переважаючих) з результатами існуючого розрахунку, реалізованого в СНПБ.

Тест 2

Стаціонарний режим із зміною середньої температури першого контуру. При зміні температури першого контуру не змінюється його маса. Результати наведено на наступних графіках рис. 5–9. Потужність реактора була близько 690 МВт.

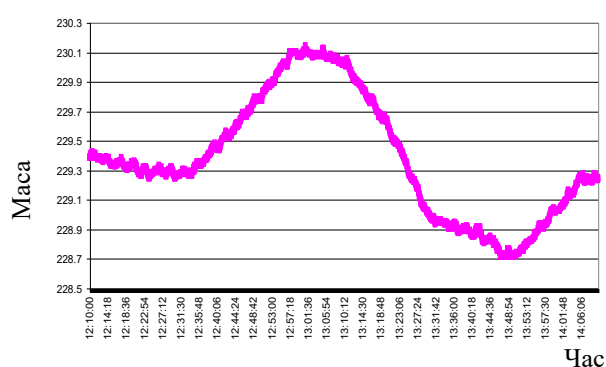


Рис. 2 – Маса теплоносія першого контуру

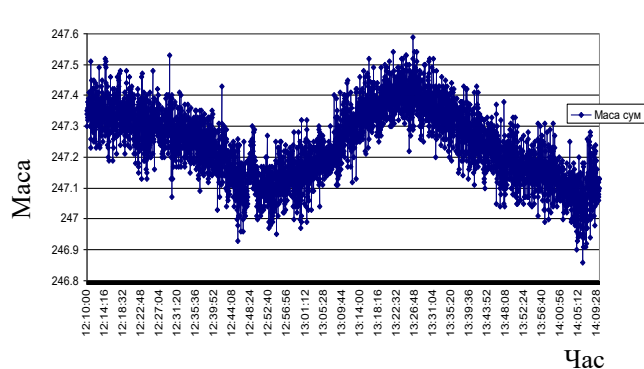


Рис. 4 – Сумарна маса теплоносія в деаераторі підживлення-продування, першому контурі та баку організованих протікань

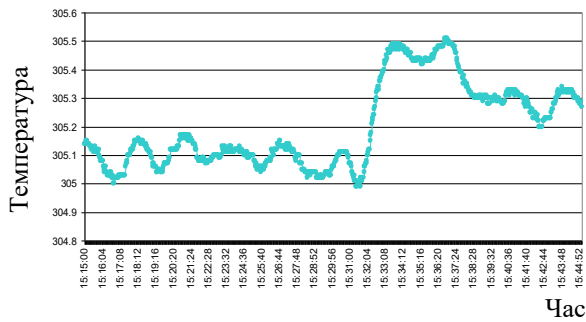


Рис. 5 – Середня розрахункова температура першого контуру

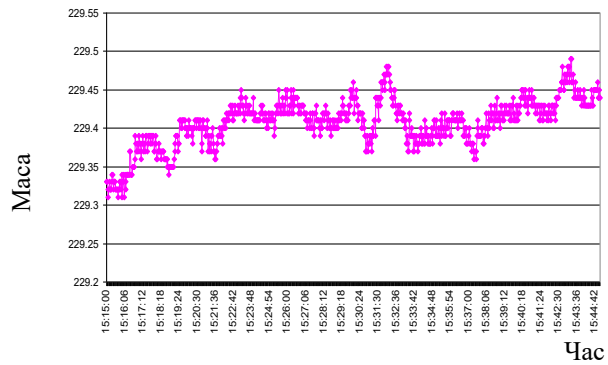


Рис. 6 – Маса теплоносія першого контуру

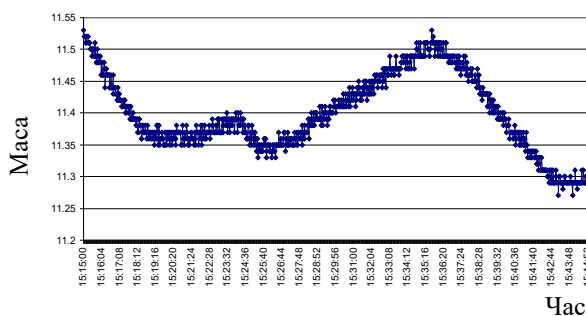


Рис. 7 – Маса теплоносія в деаераторі підживлення-продування

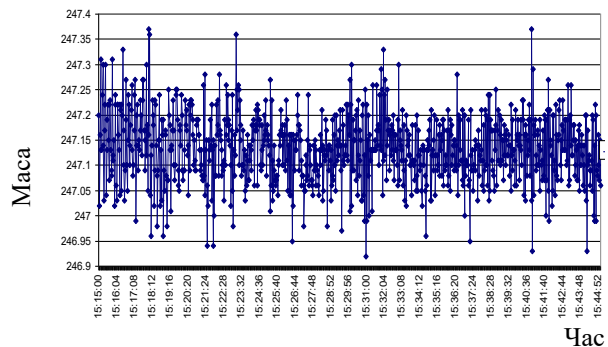


Рис. 8 – Сумарна маса теплоносія в деаераторі підживлення-продувки, першому контурі та баку організованих протікань

На рис. 6 видно, що маса теплоносія першого контуру постійна незважаючи на те, що відбулося збільшення рівня в КТ і на це збільшення відреагувала існуюча система. Зміна маси теплоносія в деаераторі підживлення-продування (рис. 7) відбувається за рахунок роботи регулятора рівня в баку організованих протікань.

Сумарна маса першого контуру залишається постійною в межах шуму датчиків (рис. 8).

Цей режим досить точно описується запропонованою методикою з похибкою 0,2 – 0,3 м³ (шум датчиків), існуюча методика не дає відповідних результатів, ідентифікуючи збільшення маси теплоносія.

Зниження потужності РУ. Для цього режиму було використано дані внаслідок реальної зміни потужності РУ АЕС. Дане зниження потужності проводилося відповідно до ТРБЕ та ІЕ, при цьому не проводилося виведення теплоносія за межі замкнутої схеми першого контуру. Зниження

потужності проводилося за рахунок подачі борного концентрату на вхід насосів підживлення та зміни положення регулюючої групи. Результати наведено на рис. 9–14.

Рис. 11 показує, що у першому контурі відбувається збільшення маси теплоносія. Цей факт підтверджується наявністю позитивного небалансу по лініях підживлення-продування. У разі збільшення потужності ми спостерігаємо зворотний ефект, але чисельно його підтвердити досить складно через низьку точність вимірювальної апаратури.

Як видно із рис. 13 і 14 сумарна зміна маси в першому контурі разом з деаератором підживлення-продування і баку організованих протікань дорівнює зменшенню маси в ТВ10 баках, що свідчить про правильність запропонованої методики. Засобами СНПБ цю зміну маси теплоносія впевнено ідентифікувати не вдалося.

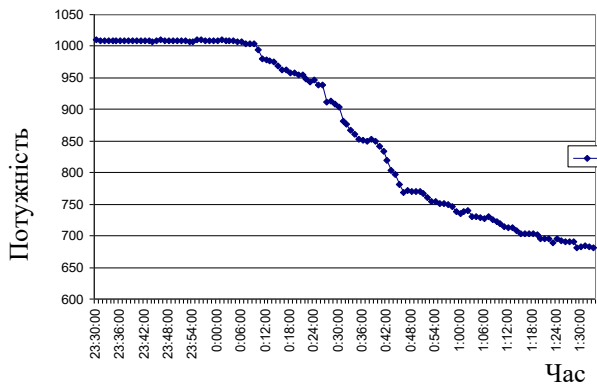


Рис. 9 – Електрична потужність РУ

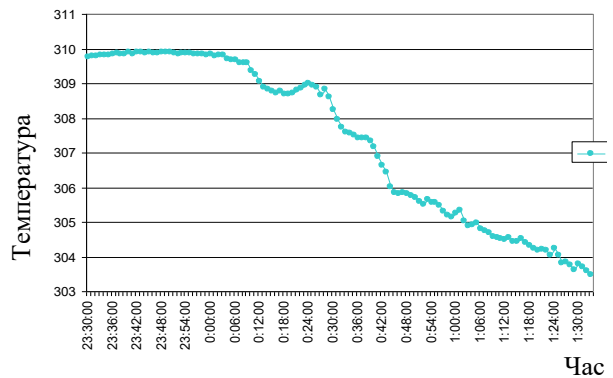


Рис. 10 – Середня розрахункова температура першого контуру

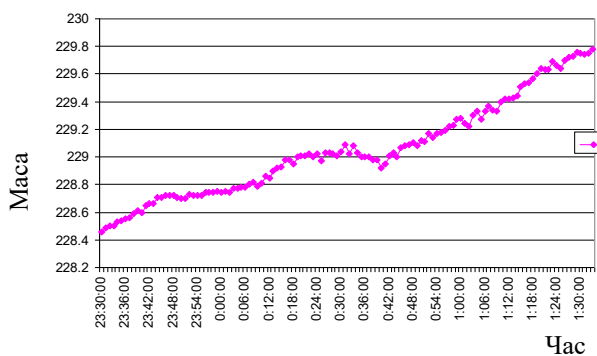


Рис. 11 – Маса теплоносія першого контуру

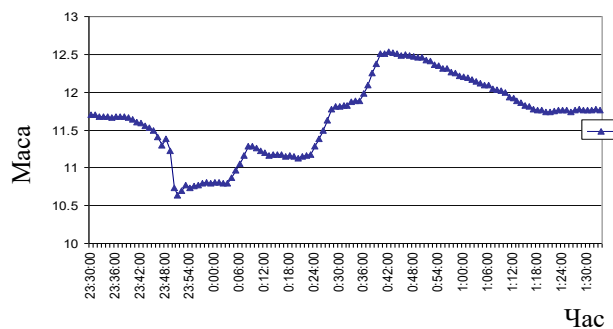


Рис. 12 – Маса теплоносія в деаераторі підживлення-продування

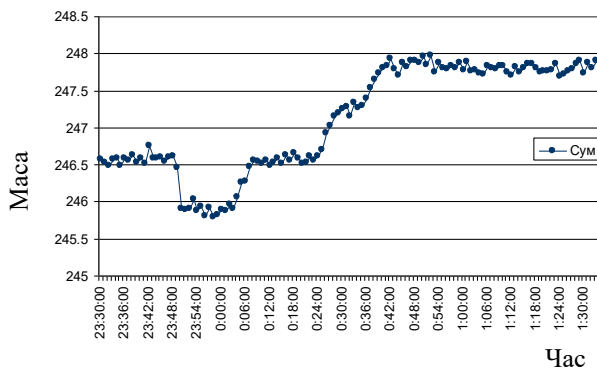


Рис. 13 – Сумарна маса теплоносія в першому контурі, деаераторі підживлення-продування і баку організованих протікань

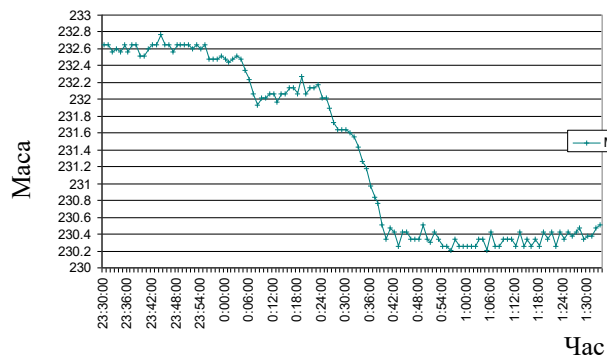


Рис. 14 – Маса теплоносія у баках борного концентрату

Висновки

Запропонована модель адекватно визначає розглянуті процеси. Ця модель може працювати в режимі реального часу, що суттєво збільшує діапазон використання. Має не значну обчислювальну трудомісткість, отже, може бути реалізована на існуючій ІОС.

Запропоновано методику, яка дозволяє розрахувати достовірний рівень у компенсаторі

об'єму, проаналізувати працездатність датчиків рівня.

Запропонована методика в результаті проведеного тестування показала свою ефективність і в ряді випадків, більш високу точність та роздільну здатність.

Список літератури

References (transliterated)

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ СТАНЦІЙ // Затверджено Наказ Державного комітету ядерного регулювання України 19.11.2007 N 162. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 25 січня 2008 р. за № 56/14747.
2. 1.GT.0122.IE-04. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 1 (ТРБЭ). – Хмельницкий: ХАЭС, 2004. – 291 с.
3. 2.РЦ.3390.IE-03. Інструкція по експлуатації першого контура блока № 2 ХАЭС. – Хмельницький: ХАЭС, 2003. – 124 с.
4. Коба К. Н. Модели и методы решения задач оценки распределения агрессивной среды при техногенных авариях / К.Н. Коба // Автоматизированные системы управления и приборы автоматизации, 2003. – Вып. 123. – С. 72–80. – ISSN 0135-1710 (print).
5. Fedorov D. Critical flow prediction models for the coolant at supercritical parameters / D. Fedorov, V. Tuz, S. Klevtsov // POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY, 2021. – No. 1. – P. 81–87. – DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242182>.
6. Shvetsov D. M. Analysis of acoustic leak signals for enhancing sensitivity of control due to the creation of effective diagnostic indicators / D. M. Shvetsov, E. L. Trykov, S. T. Leskin, A. Yu. Puzakov // Nuclear Energy and Technology. – 2018. – No 4(2). – P. 141–147. – DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.4.30775>.
7. Lys S. S. Analysis of reliability of automatic core protection function of the reactor V-412 in response to local parameters: maximum linear power, departure from nucleate boiling ratio / S. S. Lys, M. M. Semerak, A. I. Kanyuka // Problems of atomic science and technology. – Kharkiv, 2021. – № 5(135). – P. 88–97. – DOI: <https://doi.org/10.46813/2021-135-088>
8. Koba K. Construction of the Software and Technical Complex of Control Basic Parameters of Reactor Installation / K. Koba, S. Lys, T. Kravets, O. Yurasova, I. Galyanchuk // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2022. – № 1–2(9–10). – С. 40–52. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.05>.
1. (2008), GENERAL NUCLEAR PLANT SAFETY PROVISIONS. The Order of the State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine 11/19/2007 N 162 was approved. Registered in the Ministry of Justice of Ukraine on January 25, 2008 under No. 56/14747.
2. (2004), 1.GT.0122.IE-04. Tehnologicheskij reglament bezopasnoj jekspluatacii jenerglobloka No 1 [1.GT.0122.IE-04. Technological regulations for the safe operation of power unit No. 1, (TRBE)], HAJeS, Khmel'nitsky, 291 p.
3. (2003), 2.RC.3390.IE-03. Instrukcija po jekspluatacii pervogo kontura bloka No 2 HAJeS [2.RTs.3390.IE-03. Instruction for operation of the primary circuit of unit No. 2 of KhNPP], HAJeS, Khmel'nitsky, 124 p.
4. Koba K. N. (2003), "Modeli i metody reshenija zadach ocenki raspredelenija agressivnoj sredy pri tehnogennyh avarijah [Models and methods for solving problems of assessing the distribution of an aggressive environment in man-made accidents], Automated control systems and automation devices, Is. 123, pp. 72–80, ISSN 0135-1710 (print).
5. Fedorov D., Tuz V., Klevtsov S. (2021), "Critical flow prediction models for the coolant at supercritical parameters", POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY, no. 1, pp. 81–87, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242182>.
6. Shvetsov D. M., Trykov E. L., Leskin S. T., Puzakov A. Yu. (2018), "Analysis of acoustic leak signals for enhancing sensitivity of control due to the creation of effective diagnostic indicators", Nuclear Energy and Technology, No 4(2), pp. 141–147, DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.4.30775>.
7. Lys S. S., Semerak M. M., Kanyuka A. I. (2021), "Analysis of reliability of automatic core protection function of the reactor V-412 in response to local parameters: maximum linear power, departure from nucleate boiling ratio", Problems of atomic science and technology, No 5(135), pp. 88–97, DOI: <https://doi.org/10.46813/2021-135-088>.
8. Koba K., Lys S., Kravets T., Yurasova O., Galyanchuk I. (2022), "Construction of the Software and Technical Complex of Control Basic Parameters of Reactor Installation", Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment, no. 1–2(9–10), pp. 40–52, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.05>.

Надійшло (received) 03.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Коба Костянтин Миколайович (Koba Kostyantyn Mykolayovych) – кандидат фізико-математичних наук, головний інспектор, ВП «Хмельницька АЕС», вул. Енергетиків, 20, м. Нетішин, Хмельницька обл., Україна, 30100; e-mail: lysss@ukr.net, тел.: +380 (3842) 9-13-48.

Лис Степан Степанович (Lys Stepan) – кандидат технічних наук, доцент; доцент, Кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013; e-mail: lysss@ukr.net, тел.: (032) 258-25-15; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7359-1177>.

Кравець Тарас Юрійович (Kravets Taras) – кандидат технічних наук, доцент; доцент, Кафедра теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: kravetst@ukr.net, тел.: (032) 258-25-15, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7186-926X>.

Юрасова Оксана Георгіївна (Yurasova Oksana) – кандидат технічних наук; доцент, Кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», 12, м. Львів, Україна; e-mail: oksjanchuk@gmail.com, тел.: (032) 258-25-15.

Галіячук Ігор Романович (Galyanchuk Igor) – кандидат технічних наук; доцент, Кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: ihor.g.halianchuk@lpnu.ua, тел.: (032) 258-25-15.