

О.В. Сангінова, аспір.

Національний технічний університет України "КПІ"

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ АЛГОРИТМІВ БОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ДЛЯ РЕАКТОРНИХ УСТАНОВОК ТИПУ ВВЕР-1000**

(Представлено проф. Р.Б. Медведевим)

Проведений аналіз процесу борного регулювання на АЕС із реакторною установкою типу ВВЕР-1000.

Запропоновано організувати процес борного регулювання із врахування зміни реактивності та нерівномірності розподілу енерговиділення реактора в реальному часі.

Розглянуті технологічні алгоритми керування процесом із врахуванням зміни реактивності та нерівномірності розподілу потужності енерговиділення реактора.

Результатом роботи є набір технологічних алгоритмів, які можуть бути ефективно використанні у складі системи інформаційної підтримки оперативного персоналу АЕС при проведенні процесу борного регулювання.

Вступ

В даний час оптимальне проведення процесу борного регулювання (БР) на діючих реакторних установках України практично неможливо із-за відсутності необхідних технологічних засобів вимірювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру. Існує кілька проектів упровадження нового технічного забезпечення для контролю бору, яке, так чи інакше, повинне звестись до заміни існуючого лабораторного методу на оперативний, що допускає присутність у базі даних технологічних параметрів достовірних відомостей про концентрацію борної кислоти в теплоносії.

Поява нового технічного забезпечення потребує розробки нового підходу до здійснення процесу БР та створення відповідного програмного забезпечення.

В цій роботі запропоновано організувати проведення БР із врахуванням реактивності та нерівномірності розподілу енерговиділення реактора в реальному часі. Розрахунок реактивності буде виконуватися із застосуванням даних бази даних реального часу, розрахункових значень нейтронно-фізичних характеристик активної зони реактора та розрахункових значень концентрації борної кислоти в контурі.

Така організація процесу БР дозволить зменшити час стабілізації стану реактора, досягати заданого положення робочої групи в момент стабілізації стану реактора, запобігти розвитку ксенонових коливань висотного розподілу енерговиділення та зменшити стрибки лінійного теплового навантаження на твєли.

Розрахунок реактивності

Зміна запасу реактивності між двома станами реактора обчислюється як арифметична сума ефектів реактивності [1]:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{ОРСУЗ} + \Delta\rho_{бор} + \Delta\rho_N + \Delta\rho_t + \Delta\rho_{\chi_e}, \tag{1}$$

де $\Delta\rho_{ОРСУЗ}$ – внесок реактивності, пов’язаний зі зміною положення органів регулювання системи управління та захисту реактора (ОР СУЗ); $\Delta\rho_{бор}$ – внесок реактивності, пов’язаний зі зміною концентрації борної кислоти в активній зоні (2); $\Delta\rho_N$ – внесок реактивності, пов’язаний зі зміною потужності реактора; $\Delta\rho_t$ – внесок реактивності, пов’язаний зі зміною середньої температури теплоносія в активній зоні; $\Delta\rho_{\chi_e}$ – внесок реактивності, пов’язаний зі зміною концентрації поглиначів.

Внесок реактивності, пов’язаний зі зміною концентрації борної кислоти в активній зоні, обчислюється за формулою:

$$\Delta\rho_{бор} = \Delta\rho'_{бор} * \Delta C_{бор}, \tag{2}$$

де $\Delta\rho'_{бор}$ – зміна реактивності, що обумовлена зміною концентрації борної кислоти в першому контурі на 1 г/кг; $\Delta C_{бор}$ – різниця концентрацій між двома станами реактора.

Розрахунок ефектів реактивності є однією із задач фізичного розрахунку реактора [2], тому в цій роботі були використані результати програми розрахунку нейтронно-фізичних характеристик "Альбом" [3]. © О.В. Сангінова, 2001

Визначити сумарну зміну реактивності $\Delta\rho$ між двома станами можна, порівнявши два стани реактора (табл. 1). При цьому необхідно враховувати, що при роботі реактора на стаціонарному (незмінному) рівні потужності реактивність дорівнює нулю.

Таблиця 1

Стан реактора	t , ч	N , %	H , %	C , г/кг	T , °С	ρ , %
---------------	---------	---------	---------	------------	----------	------------

I	t_1	N_1	H_1	C_1	T_1	$\rho_1 = 0$
II	t_2	N_2	H_2	C_2	T_2	$\rho_2 = ?$
Ефекти реактивності		$\Delta\rho_N$	$\Delta\rho_{OP\ CV3}$	$\Delta\rho_{бор}$	$\Delta\rho_t$	$\Delta\rho$

В табл. 1 прийнято такі позначення:

t – час, год.;

N – потужність активної зони, %;

H – висота стрижнів, %;

C – концентрація борної кислоти у теплоносії першого контуру, г/кг;

T – середня температура теплоносія в активній зоні, °C;

ρ – реактивність, %.

За знаком отриманого значення $\Delta\rho$ можна судити, в якому стані буде знаходитися активна зона, у другому стані – підкритичному (якщо $\Delta\rho < 0$) або надкритичному (якщо $\Delta\rho > 0$).

Таким чином, щоб вивести реактор у критичний стан, необхідно компенсувати реактивність, яка визначає підкритичний або надкритичний стан активної зони. На реальному блоці це можна зробити, змінивши концентрацію рідкого поглинача, або, змінивши положення *OP CV3*. Оскільки за “Технологічним регламентом” [4] заборонено виводити реактор у критичний стан шляхом переміщення *OP CV3*, то необхідно розрахувати, яку кількість борної кислоти або чистого конденсату необхідно додати, щоб компенсувати цю реактивність.

Розрахунок об’єму борної кислоти або чистого конденсату

Розрахувати об’єм борної кислоти або чистого конденсату можна, якщо перейти до третього стану активної зони (табл. 2). Цей стан відмінний від другого тільки тим, що значення реактивності активної зони, що дорівнює нулю, відомо заздалегідь, а концентрацію борної кислоти необхідно визначити.

Таблиця 2

Стан реактора	T , ч	N , %	$H_{суз}$, %	$C_{бор}$, г/кг	T , °C	ρ , %
II	t_2	N_2	H_2	C_2	T_2	$\rho_2 = \Delta\rho$
III	$t_3 = t_2$	$N_3 = N_2$	$H_3 = H_2$	$C_3 = ?$	$T_3 = T_2$	$\rho_3 = 0$
Ефекти реактивності		$\Delta\rho_N = 0$	$\Delta\rho_{OP\ CV3} = 0$	$\Delta\rho_{бор} = ?$	$\Delta\rho_t = 0$	$\Delta\rho$

Для знаходження концентрації використаємо (1). В цьому випадку маємо:

$$\Delta\rho_{OP\ CV3} = \Delta\rho_N = \Delta\rho_t = \Delta\rho_{Хе} = 0, \text{ тому } \Delta\rho = \Delta\rho_{бор}.$$

Враховуючи (2), отримаємо:

$$\Delta C_{бор} = \Delta\rho_{бор} / \Delta\rho'_{бо}. \tag{3}$$

Таким чином, нова концентрація, що повинна встановитися в контурі, дорівнює:

$$C_3 = C_2 - \Delta C_{бор}.$$

Зміна концентрації у першому контурі здійснюється введенням борної кислоти (якщо $C_3 > C_2$) або чистого конденсату ($C_3 < C_2$).

Об’єм теплоносія $V_{підж}$, що необхідно ввести, розраховуємо за формулою [1]:

$$V_{підж} = -V_{IK} \ln\left(\frac{C_3 - C_{підж}}{C_2 - C_{підж}}\right), \tag{4}$$

де V_{IK} – об’єм першого контуру, м³/ч; C_3 – нова концентрація в першому контурі, г/кг; C_2 – початкова концентрація у першому контурі, г/кг, $C_{підж}$ – концентрація борної кислоти у воді підживлення першого контуру, г/кг.

Технологічні алгоритми БР

Алгоритми, що пропонуються [5, 6, 7], охоплюють наступні режими роботи реакторної установки:

1. Робота на стаціонарному рівні потужності.
 - 1.1. Підтримання постійного рівня потужності.
 - 1.2. Підтримання рекомендованого значення офсету.
 - 1.3. Попередження гранично допустимих значень коефіцієнта нерівномірності розподілу потужності енерговиділення по висоті активної зони Kq .
 - 1.4. Попередження гранично допустимих значень об’ємного коефіцієнта нерівномірності розподілу потужності енерговиділення Kv .
2. Планові зміни потужності:
 - 2.1. Планове підвищення потужності з виходом у стаціонарний стан.
 - 2.2. Планове зниження потужності з виходом у стаціонарний стан.
 - 2.3. Короткочасне зниження потужності (менше, ніж 24 год.).

У всіх нижченаведених алгоритмах реактивність розраховується згідно з (1), зміна концентрації у першому контурі – згідно з (3), а об’єм борної кислоти або чистого конденсату – згідно з (4).

Наведемо прийняті умовні позначення:

- АРП* – автоматичний регулятор потужності;
Нном – номінальна потужність активної зони;
H_{роб. групи ОР СУЗ} – висота робочої групи *ОР СУЗ*;
Kq – коефіцієнт нерівномірності розподілу потужності енерговиділення по висоті активної зони;
Kv – об’ємний коефіцієнт нерівномірності розподілу потужності енерговиділення;

1. Алгоритм підтримання постійного рівня потужності.

ЯКЩО відбувся витяг робочої групи *ОР СУЗ* автоматично, за допомогою АРП (через зменшення реактивності унаслідок вигорання палива), ТО виконати наступні дії:

- Розрахувати реактивність, що виникла в результаті зміни положення *ОР СУЗ* (> 0).
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти ($C_2 < C_1$).
- Розрахувати об’єм чистого конденсату, який необхідно ввести, щоб повернути групу у вихідне положення.

2. Алгоритм підтримання рекомендованого значення офсету.

ЯКЩО $Nном \geq 55\%$ ТА $H_{роб. групи ОР СУЗ} \leq 70\%$, ТО:

- Розрахувати величину, на яку необхідно зсунути робочу групу, щоб досягти цього положення.
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти.
- Розрахувати об’єм борної кислоти або чистого конденсату, який знадобиться, щоб зсунути групу на розраховану величину.

ЯКЩО $Nном < 55\%$ ТА $H_{роб. групи ОР СУЗ} \neq 70\%$, ТО:

- Розрахувати величину, на яку необхідно зсунути робочу групу, щоб досягти цього положення.
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти.
- Розрахувати об’єм борної кислоти або чистого конденсату, який знадобиться, щоб зсунути групу на розраховану величину.

3. Алгоритм попередження гранично допустимих значень *Kq*.

ЯКЩО робоча точка на *Kq*-міцнісній діаграмі [4] досягла границі забороненої області, ТО виконати наступні дії:

- Розрахувати величину, на яку слід знизити потужність реактора.
- Розрахувати реактивність, що при цьому виникає (< 0).
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти ($C_2 > C_1$).
- Розрахувати об’єм борної кислоти, яку необхідно ввести, щоб знизити потужність.

4. Алгоритм попередження гранично допустимих значень *Kv*.

ЯКЩО робоча точка на *Kv*-міцнісній діаграмі [4] досягла границі забороненої області у нижній половині активної зони, ТО виконати наступні дії:

ЯКЩО Регламентом дозволено пересувати групу, ТО:

- Розрахувати величину, на яку необхідно витягти робочу групу.
- Розрахувати реактивність, яка при цьому виникне.
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти ($C_2 > C_1$).
- Розрахувати об’єм борної кислоти, введення якої дозволяє підтримувати потужність реактора на колишньому рівні (компенсувати реактивність, що виникла внаслідок витягу робочої групи).

ІНАКШЕ

- Розрахувати величину, на яку потрібно знизити потужність реактора.
- Розрахувати реактивність, яка при цьому виникне (< 0).
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти ($C_2 > C_1$).
- Розрахувати об’єм борної кислоти, яку необхідно ввести, щоб знизити потужність.

ЯКЩО робоча точка на *Kv*-міцнісній діаграмі досягла границі забороненої області у верхній половині активної зони, ТО виконати наступні дії:

ЯКЩО Регламентом дозволено пересувати групу, ТО:

- Розрахувати величину, на яку необхідно опустити робочу групу.
- Розрахувати реактивність, яка при цьому виникне.
- Розрахувати кінцеву концентрацію борної кислоти ($C_2 > C_1$).
- Розрахувати об’єм чистого конденсату, введення якого дозволить підтримувати потужність реактора на колишньому рівні (компенсувати реактивність, що виникла внаслідок опускання робочої групи).

ІНАКШЕ

- опустити групу зі зниженням потужності.

5. Алгоритм планового підвищення потужності з виходом у стаціонарний стан.

Згідно з регламентом [4], підвищення потужності виконується в декілька етапів:

1) Підвищення до проміжного рівня та робота на ньому до стабілізації стану реактора. Таких етапів може бути декілька, в залежності від початкового рівня потужності. Кількість етапів визначається регламентом.

2) Підвищення потужності до номінальної та робота на номінальному рівні.

ВИКОНУВАТИ:

– Розрахувати об'єм чистого конденсату, що необхідно для підвищення потужності до проміжного рівня. Положення робочої точки на діагоналі офсет-офсетної діаграми [4] підтримується витягом робочої групи.

– Розрахувати розотруєння реактора (вигорання ксенону).

– Розрахувати об'єм борної кислоти, що необхідно для компенсації розотруєння. Робоча група підтримує постійне значення офсету.

ПОКИ наступний рівень потужності не дорівнює 100 % від $N_{ном.}$:

– Розрахувати об'єм чистого конденсату, що необхідно для підвищення потужності до номінального рівня. Положення робочої точки на діагоналі офсет-офсетної діаграми підтримується витягом робочої групи.

– Розрахувати розотруєння або отруєння реактора.

– Розрахувати об'єм борної кислоти або чистого конденсату, необхідного для компенсації розотруєння або отруєння. Підтримання постійного значення офсету виконується витягом робочої групи.

6. Алгоритм короткочасного зниження потужності (менше, ніж на 24 години).

ЯКЩО має бути короткочасне розвантаження до потужності $> 75\% \text{ ТО}$:

Використовувати алгоритм “просторової локалізації ксенонівих процесів” [6, 8]. Розвантаження виконується двома групами таким чином, що, в основному, зміна потужності приходиться на верхню половину активної зони, а потужність нижньої половини зберігається.

ІНАКШЕ

*Зниження потужності:

– Розрахувати отруєння, що виникло внаслідок уводу робочої групи (зниження потужності).

– Розрахувати об'єм чистого конденсату, що необхідно для компенсації цього отруєння.

*Підйом потужності:

– Швидкість підйому потужності обмежується підвищенням концентрації борної кислоти та вводом робочої групи.

– Розрахувати розотруєння або отруєння реактора.

– Розрахувати об'єм борної кислоти або чистого конденсату, необхідного для компенсації розотруєння або отруєння. Підтримання постійного значення офсету виконується витягом робочої групи.

7. Алгоритм планового зниження потужності з виходом у стаціонарний стан.

ЯКЩО точка на фазовій діаграмі знаходиться поблизу нижньої границі рекомендованої області, ТО виконати алгоритм РОЗВАНТАЖЕННЯ БОРОМ.

ЯКЩО точка на фазовій діаграмі знаходиться поблизу верхньої границі рекомендованої області, ТО виконати алгоритм РОЗВАНТАЖЕННЯ ГРУПАМИ.

ЯКЩО точка на фазовій діаграмі знаходиться не поблизу границі рекомендованої області, ТО запитати мету управління у оператора:

ЯКЩО мета управління – мінімізація кількості рідких відходів АБО мета управління – мінімізація водообміну системи БР, ТО виконати алгоритм РОЗВАНТАЖЕННЯ ГРУПАМИ.

ІНАКШЕ – виконати алгоритм РОЗВАНТАЖЕННЯ БОРОМ.

Алгоритм РОЗВАНТАЖЕННЯ БОРОМ

* Розвантаження.

– Розрахувати реактивність, яка виникне в результаті зниження потужності реактора (< 0).

– Розрахувати об'єм борної кислоти, яку необхідно ввести, щоб знизити потужність до заданого рівня.

* Робота на зниженому рівні потужності

Виконати алгоритм підтримання рекомендованого значення офсету.

Алгоритм РОЗВАНТАЖЕННЯ ГРУПАМИ

* Розвантаження.

Розвантаження виконувати групами, змінюючи їх положення у штатній послідовності згідно з регламентом.

* Робота на зниженому рівні потужності.

– Розрахувати реактивність, що виникла в результаті зниження потужності реактора та зміни положення *ОР СУЗ*.

– Розрахувати об’єм борної кислоти або чистого конденсату, яку необхідно ввести, щоб компенсувати реактивність.

– Виконати алгоритм підтримання рекомендованого значення офсету.

Висновок

Запропоновані алгоритми можуть бути ефективно використанні у складі системи інформаційної підтримки оперативного персоналу АЕС із реакторною установкою типу ВВЕР-1000, що дозволить підвищити оперативність розрахунків при проведенні БР та спростити процес прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Овчинников Ф.Я., Семенов В.В.* Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.
2. *Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Алхутов М.С.* Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
3. *Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П.* Программа “Имитатор реактора” для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000. – Атомная Энергия, 1998. – Т. 84. – Вып. 6.
4. Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320). ТРВ-1000-3, 1988. – 312 с.
5. *Митин В.И., Калинушкин А.У., Филимонов П.Е., Астахов С.А.* Предложения по управлению потужністю и энергораспределением в активной зоне в маневренных режимах эксплуатации РУ с ВВЭР-1000. РИЦ КИ, 1999. – № 32/1-3-299.
6. *Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Астахов С.А., Олейник С.Г., Климов С.П., Депенчук А.А.* Разработка усовершенствованного алгоритма управления мощностью и энергораспределением активной зоны серийного ВВЭР-1000 с учетом результатов опытных маневров п отужності на 5-ом блоке Запорожской АЭС. Отчет РИЦ КИ, 1998. – № 32/1-64-498.
7. *Аверьянова С.П., Павлов В.И., Павловичев А.М., Филимонов П.Е.* Анализ методов управления мощностью и распределением енерговиділення в активной зоне для базового режима работы (Ляньюньганская АЭС). Отчет РИЦ КИ, 1999. – № 32/1-5-299.
8. *Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Олейник С.Г., Климов С.П., Депенчук А.А.* Испытания маневренности ВВЭР-1000 на 5-ом блоке Запорожской АЭС. Атомная энергия, 1998. – Т. 85 – Вып. 5.

САНГІНОВА Ольга Вікторівна – аспірантка кафедри кібернетики інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

– формалізація задач управління складними процесами та комплексами, розробка критеріїв оцінки їх функціонування;

– моделювання об’єктів та систем управління (статистичні та динамічні, імітаційні моделі, логіко-динамічні моделі, тощо

– ідентифікація об’єктів управління;

– інформаційне та програмне забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесами та комплексами у складі інтегрованих виробництв;

– комп’ютерно-інтегрованими

– автоматизовані технологічні комплекси, як складова частина комп’ютерно-інтегрованого виробництва.

Тел. (дом.): (044) 274-61-61

E-mail: Sanginova@xtf.ntu-kpi.kiev.ua

Подано 29.05.2001