

Петлінський І.І.

Державний університет «Одеська політехніка»

АКТУАЛЬНІСТЬ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З РІДКИМ ПОГЛИНАЧЕМ

Надзвичайно висока енергоємність і значні природні запаси ядерного палива сприяють широкому застосуванню ядерної енергії на транспорті, в енергетиці, космічній техніці.

Основною метою експлуатації АЕС в Україні є виробництво електроенергії. Найкращим режимом роботи ядерних реакторів з точки зору безпеки і надійності є режим роботи на номінальному рівні потужності. Але на практиці енергосистема накладає свої вимоги, тож необхідно забезпечення можливості змінювати потужність енергоблоку, щоб забезпечити режим проходження за навантаженням. Тому до сучасних систем автоматизації реакторних установок пред'являються підвищені вимоги, що в першу чергу стосується алгоритмів управління технологічними процесами, які повинні забезпечувати надійні та безпечні умови експлуатації.

Пріоритетними залишаються питання управління реакторними установками з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР) одиничною потужністю 1000 МВт, в яких безпосередньо відбувається ядерна реакція: в разі аварії реакторні установки є основними джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Застосування борного регулювання для управління реакторами типу ВВЕР-1000 дозволяє збільшити час роботи на максимальній потужності, забезпечуючи економічну ефективність експлуатації енергоблоку, а також підтримувати РУ в потрібних безпечних межах, які унеможливають виникнення і розвиток аварійних ситуацій.

У розробці та реалізації алгоритмів керування процесом борного регулювання доцільно прогнозувати зміну основних параметрів роботи енергоблоку з використанням систем імітаційного моделювання.

Надзвичайно важливою обставиною є той факт, що атомна енергетика довела свою економічну ефективність практично у всіх районах земної кулі. Крім того, навіть при великому масштабі енерговиробництва на АЕС атомна енергетика не створює транспортних проблем, оскільки вимагає малих транспортних витрат, звільняє суспільство від постійних перевезень органічного палива. У даний час на АЕС України експлуатується одинадцять РУ з ВВЕР-1000. Вони входять до складу Запорізької, Рівненської, Хмельницької та Південно-Української АЕС. Останні генерують близько 93% електроенергії українських АЕС і дозволяють заощадити понад 28 млн. тон вугілля або 16 млн. тон нафти щорічно.

Ключові слова: реактор, АЕС, РУ, реактивність, математична модель, аксіальний офсет, енергоблок, АСУТП, ВВЕР – 1000, автоматичний регулятор потужності.

Постановка проблеми. Основним керуючим впливом на енерговиділення в реакторі є концентрація борної кислоти, а точніше атомів бору ^{10}B . Результати дослідження АСР з таким регулятором наведені в ряді робіт.

Так, у роботі [7, с. 29–56] показано, що використання борної кислоти для управління потужністю реакторної установки дозволяє значно збільшити час експлуатації тепловиділяючих елементів, підвищуючи економічність експлуатації АЕС без зниження показників безпеки.

У роботі [6, с. 18] наведені результати дослідження системи автоматичного регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС. Показана принципова можливість застосування стандартного ПІ-закону

регулювання для керування нелінійним об'єктом.

Робота [3, с. 134–140] присвячена дослідженню регулятора потужності з рідким поглиначом для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. Показано, що при регулюванні потужності реактора зміною концентрації борної кислоти реактор без регулятора є стійким на всіх рівнях потужності. Стійкість забезпечується регулятором аксіального офсету.

Постановка завдання. Метою роботи є вивчення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку з рідким поглиначом, яка дозволяє підтримувати потужність енергоблоку регулюванням теплотехнічного параметра.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для бору характерна висока здатність

до поглинання теплових нейтронів, зумовлена реакцією $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$.

Основний внесок у поглинання нейтронів дає ізотоп ^{10}B , зміст якого в природному борі становить 19,7%. Перетин захоплення теплових нейтронів для ізотопу ^{10}B становить $\sim (3 \dots 4) \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$, для природної суміші ізотопів перетин захоплення $\sim 7,5 \cdot 10^{-26} \text{ м}^2$ [1].

У водо-водяних реакторах використовується добавка добре розчинної у воді борної кислоти H_3BO_3 , що циркулює через активну зону воду першого контуру.

В ядерних реакторах протягом кампанії реактора відбувається зміна запасу реактивності ядерного палива: після завантаження він дуже великий (30 ... 40 бєф для реакторів ВВЕР-1000) і зменшується в міру вигорання ядерного палива і його «шлакування», тобто накопичення продуктів поділу у вигляді стабільних і довго живучих нуклідів, які беруть участь в непродуктивному захопленні нейтронів (серед продуктів поділу ^{235}U більше 250 ядер, приблизно чверть з них є шлаками).

Безпосередньо робота системи борного регулювання в двоконтурних водо-водяних реакторах, як правило, забезпечується за допомогою системи підживлення та водоочищення першого контуру.

Оскільки в кислому середовищі посилюється корозія конструкційних матеріалів, рН розчину борної кислоти підтримується на рівні не менше 5.7 введенням в розчин лугів – аміаку і, для компенсації радіаційного розкладання аміаку, гідроксиду калію (для реакторів ВВЕР-1000, змішаний аміачно-калієвий водний режим реактора). У такому режимі максимальна концентрація борної кислоти в розчині становить до 16 г / кг.

Для зниження концентрації борної кислоти протягом реакторної кампанії використовується відбір і дистиляція води першого контуру, борна кислота регенерується в пристрої регенерації.

Великі кампанії активних зон енергетичних реакторів вимагають великих початкових запасів реактивності (15 - 22 бє), а значить, і великої кількості поглиначів для їх компенсації. Але переміщення в активній зоні «важких» поглиначів може викликати сильне спотворення нейтронного поля в реакторі, збільшуючи нерівномірність розподілу Φ (r, H) і тим самим знижуючи економічні показники роботи енергоблоку. Більш того, в деяких випадках перекося нейтронного поля можуть бути небезпечними, оскільки вони призводять до виникнення нестійкості нейтронного поля в реакторі.

Для того щоб уникнути цього реалізована ідея в борному регулюванні, рідкий поглинач (борна кис-

лота H_3BO_3) вводиться в теплоносій (воду) першого контуру, і оскільки теплоносій безперервно циркулює через активну зону реактора, в останній в будь-який момент часу буде міститися строго певну кількість бору, що дорівнює добутку концентрації борної кислоти в теплоносії на величину обсягу, займаного теплоносієм в активній зоні. Отже, якщо величина концентрації борної кислоти в воді першого контуру постійна, то що міститься в обсязі активної зони борна кислота компенсує певну постійну величину запасу реактивності, а якщо концентрація борної кислоти в першому контурі буде змінюватися, то буде змінюватися і скомпенсований запас реактивності реактора. У цьому – первинний сенс борного регулювання.

Таким чином, на початку кампанії, створюючи досить високу концентрацію борної кислоти в воді, домагаються компенсації здебільшого початкової загальної запасу реактивності, залишаючи на частку оперативного запасу невелику величину, необхідну для забезпечення маневрування реактора, що не перевищує величини 0.6 - 0.8 бє, що забезпечує виключення виникнення ядерно небезпечних ситуацій навіть при помилках операторів, пов'язаних із вивільненням великих позитивних реактивностей при переміщеннях рухомих поглиначів в активній зоні.

За необхідності підвищення величини оперативного запасу реактивності підживлення першого контуру ведеться вже не розчином борної кислоти, а чистим дистиллятом, тим самим змінюючи звичайний баланс між витоком борної кислоти (разом з протіканням першого контуру) і її заповненням (від системи борного регулювання). Простіше кажучи, підживленням першого контуру чистою водою домагаються зниження концентрації кислоти в контурі шляхом розведення розчину в ньому чистою водою.

Таким чином, головними гідностями борного регулювання, які зумовили застосування цього способу регулювання у вітчизняних ВВЕР, є:

- «м'якість» регулювання, тобто незмінність при регулюванні форми нейтронного поля в активній зоні реактора;

- можливість підтримки поточної величини оперативного запасу реактивності реактора в необхідних безпечних межах, що виключають виникнення режимів некерованого розгону реактора внаслідок вивільнення великих позитивних реактивностей при випадкових помилкових діях оперативного персоналу.

Ефективність борної кислоти $C_{бор}$ при концентрації $C_{бор}$ є величиною реактивності, яку

втрачає реактор при підвищенні концентрації борної кислоти в теплоносії від 0 до:

$$\rho_{бор}(C_{бор}) = \int_0^{C_{бор}} \alpha_{бор} dC_{бор},$$

де $\alpha_{бор} = f(C_{бор}) = \frac{\partial \rho_{бор}}{\partial C_{бор}}$ – коефіцієнт реактивності борної кислоти.

Величина $\alpha_{бор}$ визначалася з альбому НФХ для 284.72 ефективних діб (рисунок 1).

$$\alpha_{бор} = -1.58 \% / \text{г/кг} = -0.0158 \text{ л} / \text{г/кг}.$$

Зменшення концентрації борної кислоти в теплоносії відбувається за рахунок введення в теплоносій знесоленої води. Монотонне введення/виведення борної кислоти потрібне для зменшення кількості рідких радіоактивних відходів.

Із рисунку 2 видно, що зміна концентрації борної кислоти і знесоленої води відбувається за експоненціальним законом. Для моделювання цієї



Рис. 1. Залежність ефективності борної кислоти від ефективної доби вигорання палива:
1 – потужність реактора N=1500 МВт;
2 – N=2100МВт; 3 – N=2700 МВт; 4 – N=3000 МВт

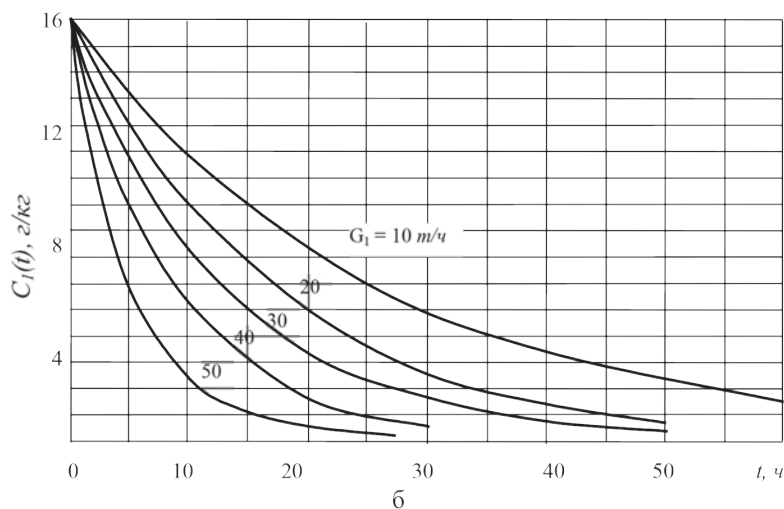
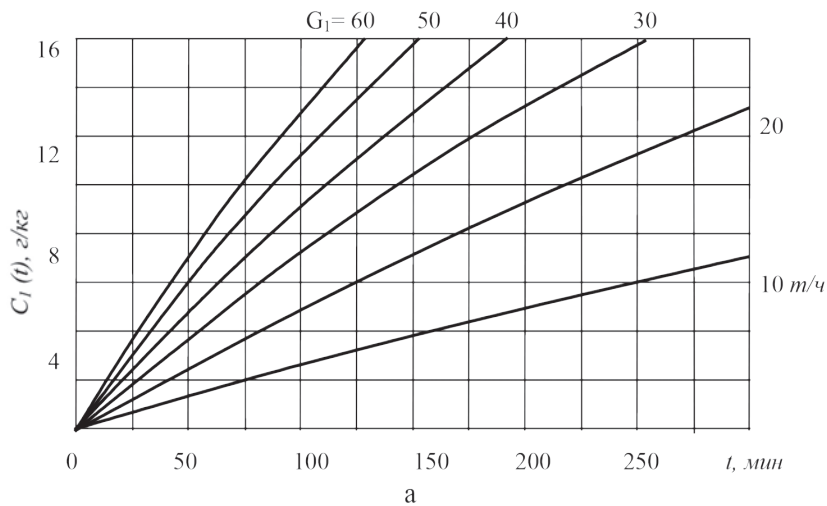


Рис. 2. Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії у разі підживлення концентрованою борною кислотою (а) і знесоленою водою (б)

залежності були ідентифіковані і описані диференціальними рівняннями:

при введенні розчину борної кислоти

$$T_4 \cdot \frac{dC_{бор}}{dt} + \Delta C_{бор} = k_4 \cdot \Delta G_{бор},$$

при введенні знесоленої води

$$T_5 \cdot \frac{dC_{бор}}{dt} + \Delta C_{бор} = k_5 \cdot \Delta G_{H2O},$$

де $C_{бор}$ – концентрація борної кислоти, г/кг;
 k_4, k_5 – коефіцієнти передачі, $\frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$;
 T_4, T_5 – постійні часу, с;
 $\Delta G_{бор}$ – зміна витрати борної кислоти, т/ч;
 ΔG_{H2O} – зміна витрати знесоленої води, т/ч.

Для розрахунку було прийнято, що номінальна витрата борної кислоти $G_{бор} = 40 \text{ т/ч}$, номінальна витрата знесоленої води $G_{H2O} = 40 \text{ т/ч}$. Для таких витрат борної кислоти і знесоленої води коефіцієнти передачі і постійні часу: $k_4 = 40 \frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$, $k_5 = 16 \frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$, $T_4 = 22318 \text{ с}$, $T_5 = 47714.7 \text{ с}$

Для процесів введення і виведення бору з теплоносія коефіцієнти передачі відрізняються у 2,5 разу, а постійні часу – у 2 рази. Отже, можна зробити висновок, що виведення з теплоносія борної кислоти введенням знесоленої води відбувається довше.

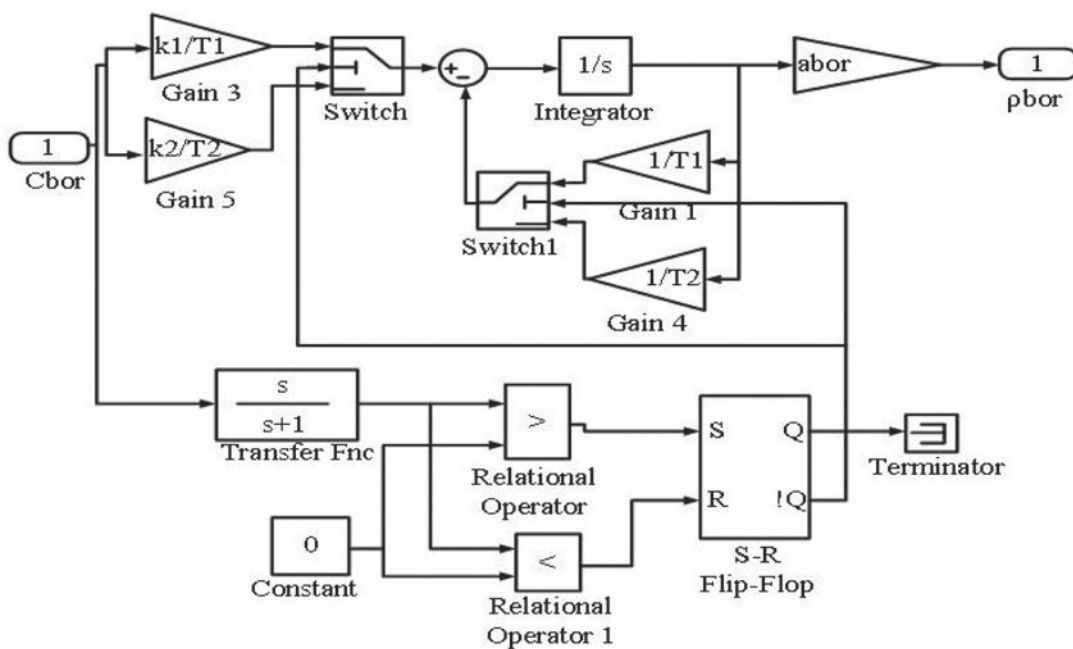


Рис. 3. Імітаційна модель впливу концентрації борної кислоти на реактивність для усієї АКЗ

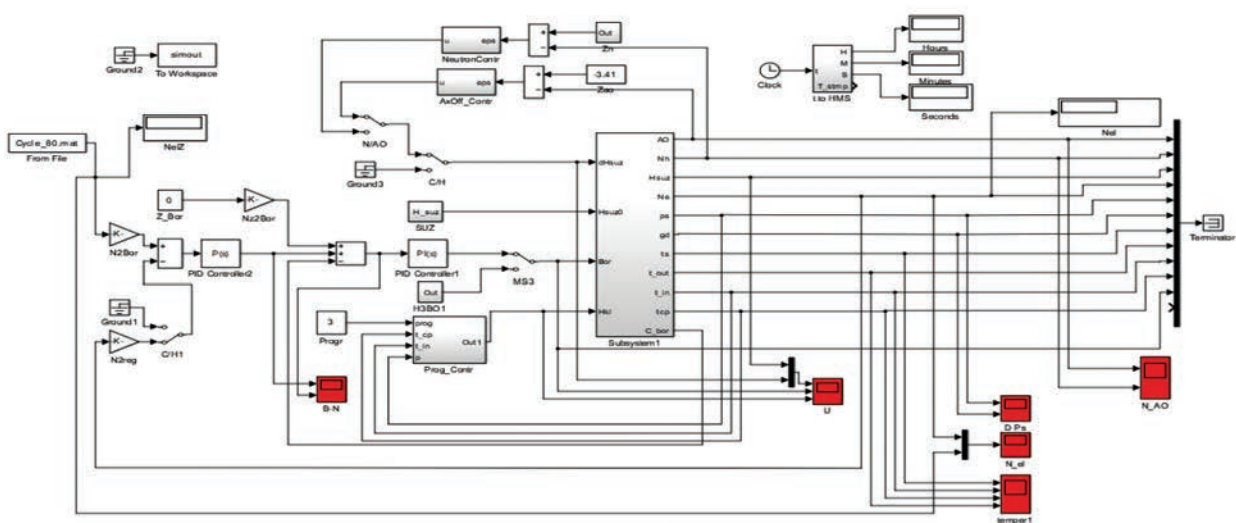


Рис. 4. Структурна схема АСР з борним регулюванням

Імітаційна модель впливу концентрації борної кислоти на реактивність для усієї АКЗ представлена в середовищі моделювання Simulink пакету Matlab (рисунок 3).

Структурна схема моделі АСУ в прикладному пакеті Simulink, підставимо знайдені настройки регулятора і скоректуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів (рисунок 4).

Моделювання при зміні концентрації борної кислоти

Висновки. Робота містить отримані результати, які полягають у створенні автоматизованої системи керування потужністю енергоблоку з рідким поглиначом, що дозволяє регулювати потужність енергоблоку за допомогою борного розчину. З'ясовано, що система регулювання потужності енергоблоку з рідким поглиначом є актуальною і дієвою.

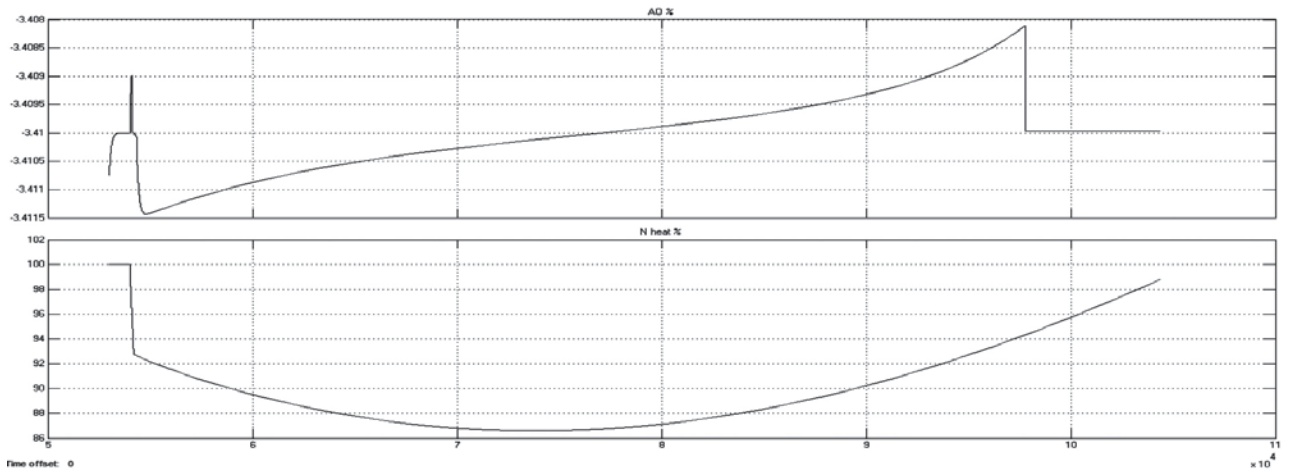


Рис. 5. Перехідний процес потужності аксіального офсет при включеному регуляторі борної кислоти

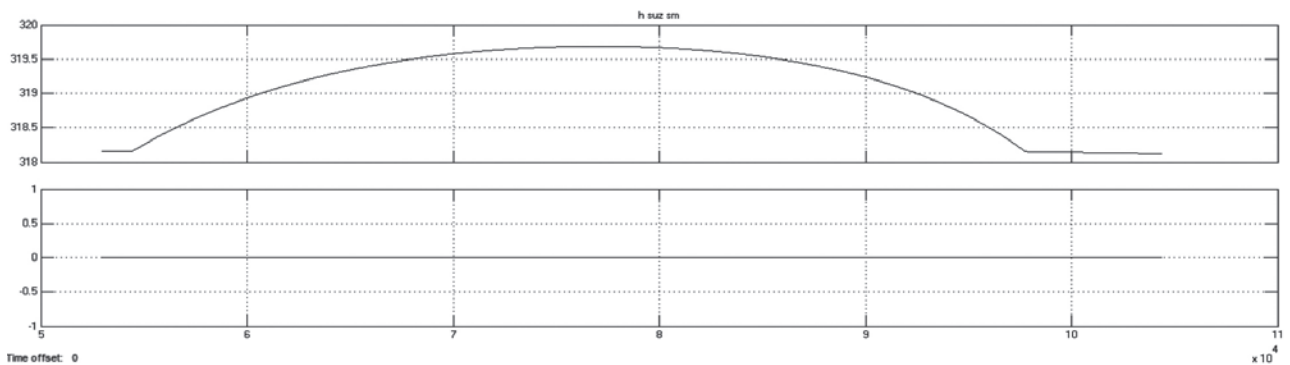


Рис. 6. Положення ОР СУЗ при включеному регуляторі борної кислоти

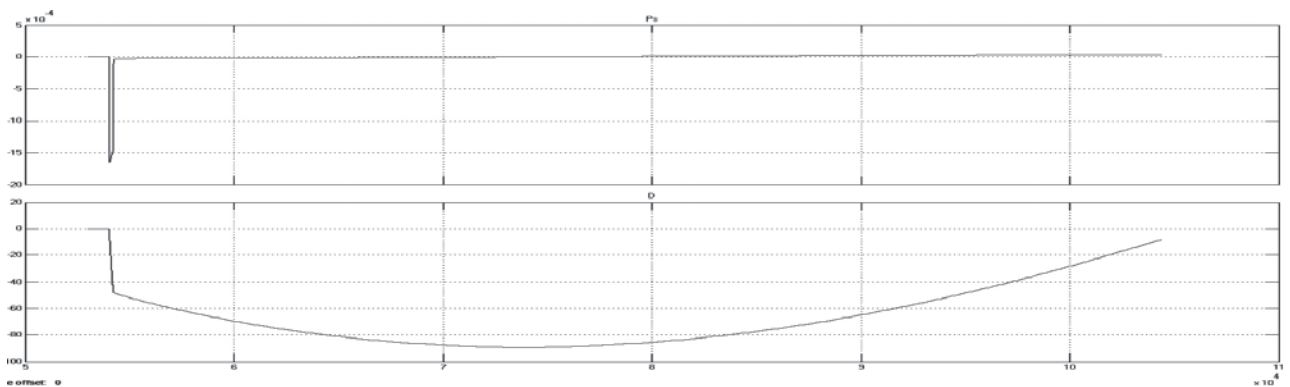


Рис. 7. Перехідний процес витрати пари і тиску при включеному регуляторі борної кислоти

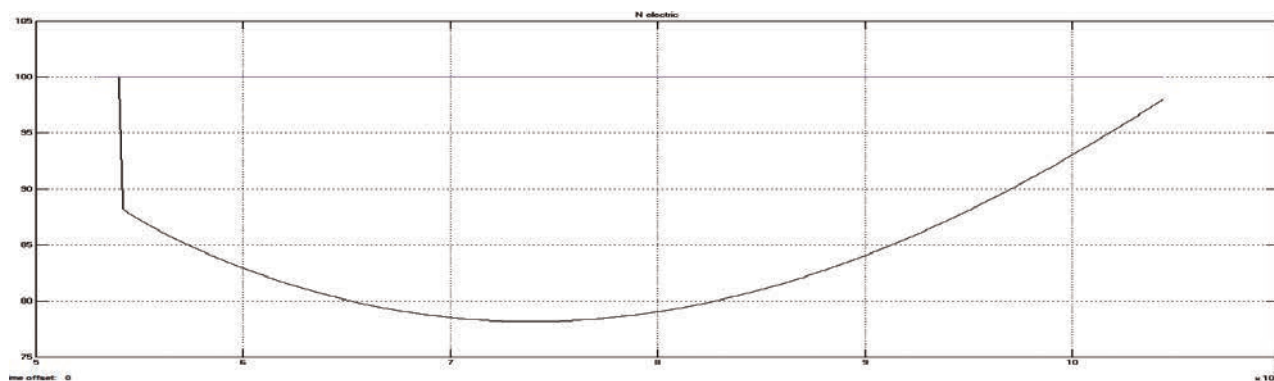


Рис. 8. Перехідний процес потужності електричного заряду при включеному регуляторі борної кислоти

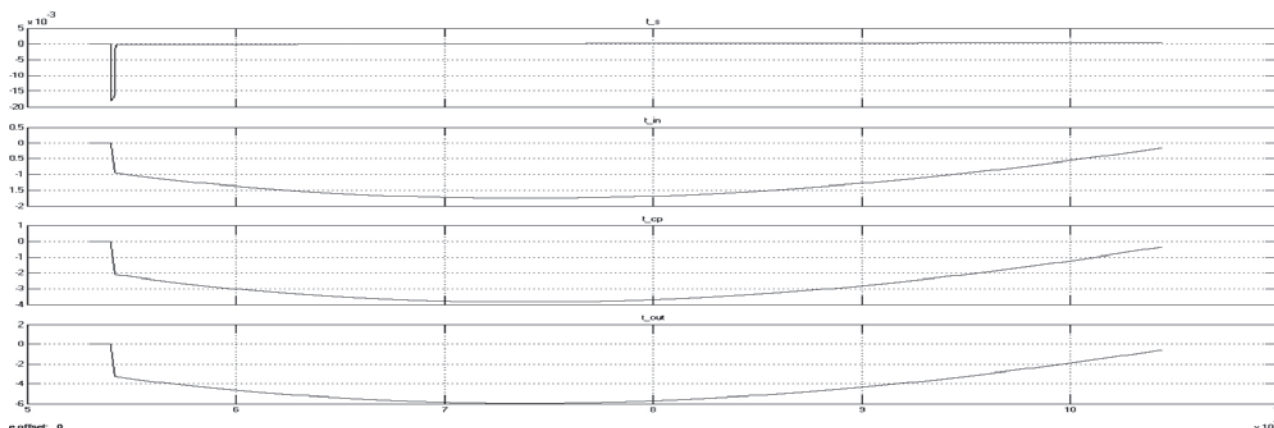


Рис. 9. Перехідні процеси температур при включеному регуляторі борної кислоти

Список літератури:

1. Демченко В.А. Автоматизація і моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС. Одеса : Астропринт, 2001. 305 с.
2. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Семенов Н.П., товарно А.Г. Настройка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами. Довідковий посібник. Москва : Енергія, 1977. 400 с.
3. Методичні вказівки з курсового проектування по дисципліні «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС». Одеса, 1988 р.
4. Довідник з ядерної енергетики на сайті «BBC» (укр.).
5. Запорізька АЕС, офіційний сайт (рос.).
6. Системи турбінного відділення (частина 1), центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000 р.
7. Тиск насиченої пари води. URL : <http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html>.

Petlinskyi I.I. RELEVANCE OF THE AUTOMATIC POWER CONTROL SYSTEM OF THE POWER PLANT OF A NUCLEAR POWER PLANT WITH A LIQUID ABSORBER

Extremely high energy intensity and significant natural reserves of nuclear fuel contribute to the widespread use of nuclear energy in transport, energy, and space technology.

The main purpose of NPP operation in Ukraine is electricity generation. The best mode of operation of nuclear reactors in terms of safety and reliability is the mode of operation at rated power. But in practice, the power system imposes its requirements, so it is necessary to provide the ability to change the capacity of the unit to ensure the mode of passage of the load. Therefore, modern systems for automation of reactor plants are subject to increased requirements, primarily for process control algorithms, which must provide reliable and safe operating conditions.

Priority remains the management of reactors with water-water power reactors (WWER) with a unit capacity of 1000 MW, in which a nuclear reaction takes place directly: in the event of an accident, the reactors are the main sources of radioactive contamination.

The use of boron control for the control of WWER-1000 reactors allows to increase the operating time at maximum capacity, ensuring the cost-effectiveness of the unit, as well as to maintain the RU within the required safe limits, which prevent the occurrence and development of emergencies.

When developing and implementing control algorithms for the process of boron control, it is advisable to predict the change in the basic parameters of the power unit using simulation systems.

An extremely important fact is the fact that nuclear energy has proven its economic efficiency in almost all parts of the globe. In addition, even with a large scale of energy production at nuclear power plants, nuclear energy will not create transport problems, as it requires low transport costs, frees society from the constant transportation of fossil fuels. Currently, eleven RUs with WWER-1000 are operated at Ukrainian NPPs. They are part of Zaporozhe, Rivne, Khmelnytsky and South Ukrainian NPPs. The latter generate about 93% of the electricity of Ukrainian nuclear power plants and save more than 28 million tons of coal or 16 million tons of oil annually.

Key words: reactor, NPP, RU, reactivity, mathematical model, axial offset, power unit, process control system, WWER - 1000, automatic power regulator.