ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.25:621.039:661.654

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/04>

Козоровська К.А.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ В ПЕРШОМУ КОНТУРІ АЕС ЯК НЕЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТА

Концентрація борної кислоти як об'єкт регулювання має різні статичні та динамічні властивості під час нанесення керівного впливу з різними знаками. Тому виникає завдання плавного регулювання потужності енергоблоків атомної електростанції (далі – АЕС). Одним із методів регулювання є зміна концентрації борної кислоти в теплоносії першого контура АЕС. Протягом добового циклу в енергосистемі є невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії, а сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми дуже мала, тому актуальною є адаптація дієвих енергоблоків АЕС до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління енергоблоку потужністю в маневрених режимах. Хоча обладнання першого контура і допускає експлуатацію в режимах маневрування потужністю, всі АЕС із ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні. Раніше було запропоновано нові алгоритми управління потужністю енергоблоку за компромісно-комбінованою програмою регулювання. Одним з елементів зазначеної системи регулювання є регулятор потужності енергоблоку, який урахує нелінійні властивості об'єкта регулювання та покращити якість перехідних процесів під час зміни потужності енергоблоку АЕС у маневровому режимі. Усі АЕС із ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контура допускає експлуатацію в режимах маневрування потужністю. Ще одним елементом зазначеної системи регулювання є адаптивний регулятор потужності, який впливає на реактор зміною концентрації рідкого поглинача. Таким чином, розглянемо в статті властивості зазначеного регулятора.

Ключові слова: енергоблок АЕС, борне регулювання, нелінійна модель, маневрування, потужність, адаптивний регулятор.

Постановка проблеми. Одним із методів управління потужністю реактора типу вододіючого енергетичного реактора (далі – ВВЕР) є борне регулювання. Натепер борне регулювання використовується для компенсації надлишкової реактивності ядерного палива, яке завантажуються до реактора на початку його експлуатації. Унаслідок цього борне регулювання енерговиділення виконується дискретно та під час оперативного регулювання потужності не використовується. Однією з причин цього факту є нелінійні властивості об'єкта керування. Це належить як до контура керування концентрацією борної кислоти в теплоносії як частині системи керування потужністю ядерного реактора, так і до

контура керування потужністю енергоблоку в цілому. Нелінійність об'єкта керування полягає у тому, що коефіцієнт передання та постійна часу об'єкта керування залежить від величини та знаку керівного впливу. Тому на атомній електростанції (далі – АЕС) штатні регулятори концентрації борної кислоти та потужності не забезпечують якісного керування цих технологічних параметрів. Звідси виникає завдання синтезу автоматизованої системи регулювання, яка враховує цей вид нелінійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Майже за десять років проведено досить багато досліджень стосовно можливостей керування потужністю енергоблоку АЕС для реалізації

маневрового режиму експлуатації, зокрема досліджувались як властивості об'єкта керування, так і синтез різноманітних алгоритмів керування.

Так, однією з перших робіт, присвячених дослідженню властивостей ділянки концентрації борної кислоти в теплоносії першого контура реакторної установки з ВВЕР-1000, є робота Р.Б. Медведева, О.В. Сангінової [1]. У ній наведено експериментальні залежності, які стали в подальшому основою для розроблення нелінійної математичної моделі. Також було обґрунтовано можливість застосування безперервного керування концентрацією борної кислоти.

Роботи К.В. Беглова, О.О. Волошкіної, О.А. Плaxотнюка, К.В. Чернофостовой [2–3] присвячено подальшому розвитку математичної моделі ділянки концентрації борної кислоти в теплоносії першого контура, а також дослідженню автоматизованих систем керування із застосуванням типових регуляторів із пропорційно-інтегральним (далі – ПІ) законом керування.

У роботах К.В. Беглова, Н.І. Кисельової, Я.С. Погрібного, Д.В. Давидченка, О.В. Добаріної [4–6] наведено дослідження систем регулювання потужності енергоблоку під час роботи останнього в умовах маневрового режиму. Маневрування в цих дослідженнях виконується за допомогою борного регулювання. У роботі К.В. Беглова, О.В. Добаріної [6] проведено порівняння між собою різних програм керування та наведено основні показники якості перехідних процесів. Показано, що штатна АСР у загальному випадку виконує регулювання, але в деяких випадках відхилення керованої величини мають досить великі значення. У роботі К.В. Беглова, Д.В. Давидченка [5] розглянуто синтез нечіткого регулятора. Якість перехідних процесів у цьому разі задовольняє умови експлуатації АЕС, але сам алгоритм не може бути використаний в АЕС за умов сертифікації алгоритмів керування.

Пошук допустимих для АЕС алгоритмів керування привів до аналізу робіт В.А. Бейнаровича [7] і [8]. У них розглядаються адаптивні системи керування для умов змінності коефіцієнтів передавання та постійних часу об'єкта керування. Тобто цей алгоритм придатний саме для керування концентрацією борної кислоти в першому контурі АЕС.

На базі вищевказаних робіт досліджено адаптивну систему регулювання, коли змінюється коефіцієнт передавання. Результати дослідження було наведено в роботі К.А. Козоровської, Р.А. Газіреєва, К.В. Беглова [9]. Якість перехідних процесів у загальному випадку задовільна, але на початку

роботи системи адаптації відхилення керованої величини сягали недопустимих значень.

Постановка завдання. Мета роботи – синтезувати автоматизовану систему керування концентрацією борної кислоти в теплоносії першого контуру для нелінійного об'єкта, у якого постійна часу є змінним параметром. Пропонується застосувати адаптивний алгоритм керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для автоматичного управління об'єктами зі змінною постійною часу можна будувати адаптивні системи з еталонною моделлю за структурою, що складається з адаптивної частини А, звичайного регулятора 6 і каналу зворотного зв'язку 7 (рис. 1) [8].

Адаптивна частина А складається з таких частин:

- 1 – об'єкт керування (ОК) із змінною постійною часу $T_v(t)$;
- 2 – коригувальна ланка;
- 3 – еталонна модель 3 ОК з бажаною постійною часу T_m ;
- 4 – ланка узгодження виходу ОК $y(t)$ з виходом Z_m еталонної моделі,
- 5 – блок адаптації коригувальної ланки.

Контур адаптації охоплює частину основної системи управління, утворюючи додатковий негативний зворотний зв'язок через блок 5, здійснюючи синтез управління u_r , що забезпечує за $\alpha(t) = 0$ рівність процесів на виходах ОК 1 і еталонної моделі 3.

Зміна постійної часу $T_v = 1/\omega_v$ об'єкта управління еквівалентна наявності «блукального» полюса ω_v в передавальній функції об'єкта управління і завдання контура адаптації полягає у створенні рухомого нуля, що забезпечує компенсацію переміщень «блукального» полюса. Це завдання вирішується зміною коефіцієнта передавання верхньої гілки коригувальної ланки 2 під час зміни вихідного сигналу $m(t)$ блоку адаптації 5. За рис. 1 передавальну функцію ланки 2 за каналом $r(t) - u_r(t)$ можна записати у вигляді

$$W_2(s) = \frac{s+m}{s+\omega_m}.$$

Тоді отримаємо

$$Z(s) = \frac{k(s+m)}{(s+\omega_m)(s+\omega_v)C_m(s)} \cdot r(s)$$

$$Z_m(s) = \frac{k}{(s+\omega_m)C_m(s)} \cdot r(s)$$

При $m(t) = \omega_v(t)$ значення $\alpha(t) = 0$ і в системі йде необхідний сталий режим $y(t)$. Під час зміни ω_v виникає неузгодженість $\alpha(t) \neq 0$ і $m(t)$ почне змінюватися до $\alpha(t) = 0$ за іншого значення $m(t)$.

Рис. 1. Структурна схема адаптивних САУ об'єктами управління зі змінною постійною часу

Рис. 2. Схема моделювання автоматичної системи керування концентрації борної кислоти

Результати досліджень. Розглянуту адаптивну систему автоматичного керування з еталонною моделлю реалізовано в пакеті Matlab для підтримки концентрації борної кислоти в теплоносії першого контура енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. Як було зазначено, об'єкт регулювання має змінні коефіцієнти передавання $k(u)$ та постійну часу $T(u)$. Схема моделювання показана на рисунках 2 та 3.

На рисунку наведено імітаційну модель АСК, яка дозволяє порівняти штатну систему керування (нижня гілка) та запропоновану адаптивну

систему керування (верхня гілка). Блок адаптації AutoCorr розташований між штатним регулятором та об'єктом керування. Схему моделювання блоку адаптації наведено на рисунку 3.

На основі середніх значень коефіцієнтів об'єкта керування, які отримані в роботах [2] і [3], було взято такі властивості еталонної моделі: постійна часу $T = 1000$ с; коефіцієнт передавання $k = 28$.

Таким чином, передавальні функції блоку адаптації мають вигляд:

Рис. 3. Схема моделювання САУ концентрації борної кислоти з адаптивним регулятором

Рис. 4. Перехідний процес регулювання концентрації борної кислоти

$$\text{Ланка 3} - W_3(s) = \frac{28}{1000s+1} \cdot \frac{1}{1000s+1}$$

$$\text{Ланка 4} - W_4(s) = \frac{1}{1000s+1}$$

$$\text{Ланка 2} - W_2(s) = \frac{s+1}{1000s+1}$$

Як указано в [8], коли порядок моделі $C_m(s)$ є більшим ніж перший, доцільно обирати $B(s)=h$. У першому наближенні було взято $h=1$.

У процесі дослідження АСК використано налаштування регулятора, отримані в [2]. Перехідний процес регулювання в АСК без використання адаптації та з використанням адаптивного регулятора показано на рисунках 4 та 5.

На рисунку лінія, що відповідає перехідному процесу в АСК з адаптивним регулятором, майже збігається з лінією, що відповідає завданню. Тому на рисунку 5 наведено фрагмент того ж графіка, але в діапазоні часу від 20000 с до 60000 с.

Рис. 5. Фрагмент перехідного процесу регулювання концентрації борної кислоти: – завдання, - - - штатний ПІ-регулятор, - · - адаптивний регулятор

Цей відрізок був обраний тому, що саме під час зміни знаку керівного впливу, як показано в роботі [9], спостерігалось максимальне відхилення керованої величини. Під час використання нового алгоритму адаптації якість перехідного процесу повністю задовольняє вимоги, пред'явлені на АЕС.

Висновки. Із точки зору керування ділянки концентрації борної кислоти в першому контурі енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000

є нелінійним об'єктом, властивості якого залежать від величини та знаку керівного впливу. Для керування таким об'єктом запропоновано АСК з адаптивним регулятором, що значно краще підтримує керовану величину порівняно зі штатною АСК з ПІ-регулятором, а саме: перерегулювання відсутнє, процес аперіодичний, час регулювання вдвічі менший. Таким чином, адаптивний регулятор більш точно підтримує керовану величину, більш точно відповідає завданню.

Список літератури:

1. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2002. № 2 (22). С. 22.
2. Беглов К.В., Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2015. Вип. 2(36). 7 с.
3. Чернофостова К.В., Беглов К.В. Моделювання зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*, 2020. Том 31 (70). № 2. 6 с.
4. Кисельова Н.І., Погрібний Я.С., Беглов К.В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського»*. Серія : Технічні науки, 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. С. 134–140.
5. Давиденко Д.В., Беглов К.В. Исследование нечеткого регулятора мощности энергоблока АЭС. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2018. № 3-2 (66). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nechetkogo-regulyatora-moschnosti-energobloka-aes>.
6. Добаріна О.В., Беглов К.В. Дослідження системи регулювання потужності енергоблоку АЕС при зміні програми регулювання. *Вестник херсонского национального технического университета*. 2019. № 2 (69), С. 54–60.

7. Бейнарович В.А. Инвариантные самонастраивающиеся системы автоматического управления. Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2008. № 1 (17). С. 61–64.
8. Бейнарович В.А. Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью. Доклады ТУСУР. 2010. № 1 (21). Ч. 1. С. 67–69.
9. Козоровська К.А., Газгірєєв Р.А., Бєглов К.В. Дослідження АСР концентрації борної кислоти (БК) у першому контурі АЕС під час використання самоналагоджувального регулятора. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, 2019. Т. 30 (69). № 2. 5 с.

Kozorovska K.A., Behlov K.V. INVESTIGATION OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE CONCENTRATION OF BORIC ACID IN THE FIRST CIRCUIT OF A NUCLEAR POWER PLANT AS NONLINEAR OBJECT

The concentration of boric acid, as an object of regulation, has different static and dynamic properties when applying a control effect with different signs. Therefore, there is a problem of smooth regulation of the power of NPP power units. One of the control methods is to change the concentration of boric acid (BC) in the coolant of the primary circuit of the NPP. During the daily cycle, in the power system, there is a discrepancy between the production and consumption of electric energy, and the total share of installations intended to regulate the load of the power system is very small, so it is relevant to adapt existing NPP power units to new specific conditions by creating an automated control system for the power unit's capacity in maneuverable modes. Although the primary circuit equipment allows operation in power maneuvering modes, all nuclear power plants with VVER-1000 are operated in the power unit power stabilization mode at a given level. Earlier, new algorithms for controlling the power unit's capacity were proposed under a compromise-combined control program. One of the elements of this control system is the power unit power regulator, which takes into account the nonlinear properties of the control object and improves the quality of transients when changing the power of the NPP power unit in shunting mode. All nuclear power plants with VVER-1000 are operated in the power unit power stabilization mode at a given level, although the primary circuit equipment allows operation in power maneuvering modes. Earlier, new algorithms for controlling the power unit's capacity were proposed under a compromise-combined control program. One of the elements of this control system is an adaptive power regulator, which acts on the reactor by changing the concentration of the liquid absorber. Thus, we will consider the properties of the specified regulator in the article.

Key words: NPP power unit, boron regulation, nonlinear model, maneuvering, power, adaptive controller.