

УДК 621.134.8:51-74

Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух

**ВОДНО-ХІМІЧНИЙ РЕЖИМ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ДРУГОГО КОНТУРУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ТИПУ ВВЕР-1000**

This article discusses the current state of issues of the water chemistry support at operating NPP with the pressurized water reactor with determined capacity of 1000 MW (PWR-1000). We provide an overview of technological features of the power unit with PWR-1000. Methods and tools to ensure the water chemistry of the second circuit of the NPP are analyzed. Furthermore, we establish that performance of the normalized quality indicators of feed water can not completely eliminate deposits formation on heating surfaces. We reveal that existing plant control systems should be improved for the optimum water chemistry needs. New systems of automation of technological modes of the second circuit unit should be introduced. It is impossible to create these systems without construction of a mathematical model of the process. Therefore, we develop mathematical models of basic water chemistry of the second circuit blocks distinguished by the system analysis of the technological power scheme. We show simulation results of PWR-1000 second-circuit scheme by using MatLab Simulink environment techniques. We prove that the obtained mathematical model is adequate and can be used when developing strategies to control the second circuit of NPP with PWR-1000 reactor.

Вступ

Одним із найважливіших факторів, які мають значний вплив на надійність, економічність і безпечність функціонування АЕС, є водно-хімічний режим (ВХР). Під ВХР електростанцій розуміють комплекс заходів, які передбачають очищення робочого середовища від солей та механічних домішок і видалення корозійно-активних газів та подальше повернення конденсату до парогенератора (ПГ) як живильної води.

ВХР другого контуру енергоблока забезпечує мінімізацію корозійних процесів і процесів утворення відкладень у водопаровому тракті та основному обладнанні другого контуру АЕС.

Найбільш вразливим устаткуванням другого контуру є ПГ, у якому, внаслідок випарювання води, відбувається концентрування іонізованих домішок, що надходять із водою живлення. Корозійний стан теплообмінних трубок ПГ залежить від кількісного та якісного складу відкладень на них. Найбільш радикальним із наявних на сьогодні методів запобігання корозійному зношуванню трубок ПГ є проведення періодичних хімічних промивок з боку другого контуру. Однак хімічні промивки призводять до утворення значних об'ємів рідких відходів, що важко перероблюються.

Отже, на сьогодні актуальною залишається проблема створення та підтримки таких фізико-хімічних властивостей теплоносіїв, які все ж таки запобігали б корозійним пошкодженням

конструкційних матеріалів обладнання та утворенню відкладень на його поверхнях.

В Україні та за кордоном проводиться велика кількість робіт з дослідження корозійних процесів різних конструкційних матеріалів АЕС [1–4]. У результаті встановлені показники якості теплоносіїв та робочих середовищ АЕС, дотримання яких є ефективним захистом від корозії обладнання другого контуру реактора.

Проте із кожним роком встановлені норми стають більш жорсткими для поліпшення показників якості робочого середовища та, як наслідок, збільшення терміну роботи технологічного устаткування, який нині для українських АЕС становить близько 30 років. Але лише дотримання встановлених норм не зупиняє перебіг корозійних процесів та накопичення відкладень на внутрішніх поверхнях теплообмінного обладнання. Тому вдосконалення ведення оптимального ВХР, покращення діючих систем керування АЕС та впровадження нових систем автоматизації керування технологічними режимами другого контуру енергоблока є перспективними напрямками розвитку наукових досліджень.

У цій статті розглянуті особливості ведення ВХР АЕС України із реакторами типу ВВЕР-1000. У результаті аналізу основних напрямів автоматизації контролю та керування ВХР другого контуру було виявлено, що одним із найважливіших засобів підтримки ВХР другого контуру є блочна знесолююча установка (БЗУ). Проте на жодній електростанції України робота БЗУ не автоматизована. Тобто розподілення витрат між

фільтрами, виведення фільтрів на регенерацію, розпушення тощо здійснюється оператором вручну, що призводить до збільшення витрат хімреагентів, води, живлення та об'ємів рідких відходів енергоблока, а також підвищується ризик виникнення аварійних режимів. Тому створення системи автоматизованого керування процесом знесолення турбінного конденсату є надзвичайно актуальним питанням для атомної енергетики України.

Постановка задачі

Мета роботи – детально розглянути особливості ведення ВХР АЕС України із реакторами типу ВВЕР-1000 та розробити математичну модель другого контуру АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000 у середовищі MatLab Simulink, яка в подальших дослідженнях буде використана для відпрацювання стратегії керування ВХР у різних умовах роботи енергоблока.

Технологічні особливості енергоблока із реактором типу ВВЕР-1000

Технологічна схема енергоблока з реактором ВВЕР-1000 має два контури. Перший кон-

тур є радіоактивним. Він містить у собі реактор типу ВВЕР і циркуляційні петлі охолодження. Кожна петля містить головний циркуляційний насос (ГЦН), парогенератор і дві головні запірні засувки (ГЗЗ). До однієї із циркуляційних петель першого контуру приєднаний компенсатор тиску, за допомогою якого в контурі підтримується заданий тиск води, що є в реакторі одночасно й теплоносієм і сповільнювачем нейтронів [5].

Цей контур установки призначений для відведення тепла, що виділяється в реакторі, і передачі його в другий контур у парогенератор. Також до складу першого контуру входять: система підживлення й очищення контуру, система аварійного охолодження активної зони (САОЗ), організовані витоки й дренаж спецводоочищення.

Технічний контроль параметрів стану устаткування й трубопроводів, керування й захисту устаткування від пошкоджень при порушенні в роботі першого контуру, а також інших контурів і систем установки здійснюється системою контролю, керування й захисту [5].

Другий контур – нерадіоактивний. Він містить у собі парогенератори, паропроводи, парові турбіни, сепаратори-пароперегрівники, жи-

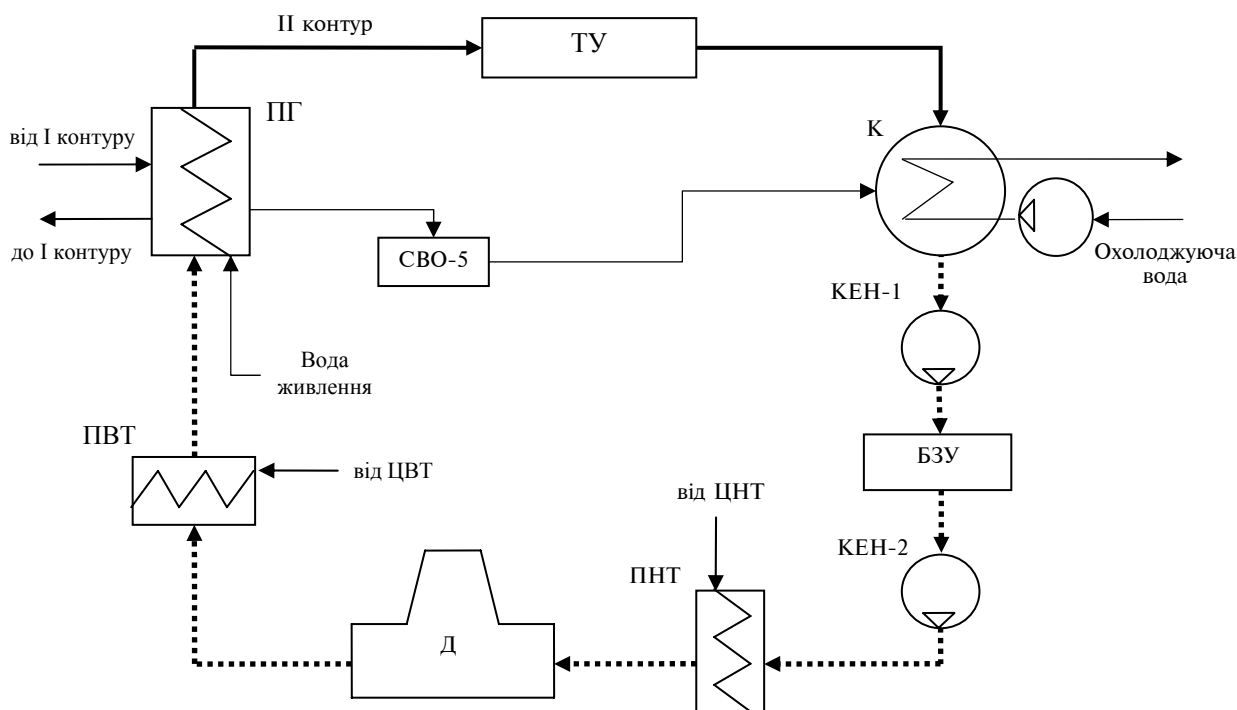


Рис. 1. Принципова технологічна схема другого контуру енергоблока із ВВЕР-1000: ПГ – парогенератор; ТУ – турбінна установка; К – конденсатор; КЕН-1, КЕН-2 – конденсатні електронасоси першого та другого ступенів; БЗУ – блокова знесолююча установка; ПНТ – підігрівач низького тиску; Д – деаератор; ПВТ – підігрівач високого тиску; СВО-5 – установка спеціального водоочищення

вильні насоси й трубопроводи, деаератори й регенеративні підігрівники. Парогенератор є спільним устаткуванням для першого та другого контурів. У ньому теплова енергія, вироблена в реакторі, від першого контуру через теплообмінні трубки передається другому контуру.

Принципову технологічну схему другого контуру реактора ВВЕР-1000 наведено на рис. 1.

Гарячий теплоносій першого контуру надходить до парогенератора (ПГ), де віддає тепло воді другого контуру. Потім головним циркуляційним насосом подається назад до реактора. Одночасно частина теплоносія з першого контуру постійно подається на установку спецводоочищення (СВО). До складу СВО-1 входять механічні фільтри, до складу СВО-2 – іонообмінні. Далі теплоносій повертається в перший контур. У парогенераторі вода нагрівається за рахунок тепла води першого контуру і випаровується. Перетворена на пару вона подається на турбіну, яка перетворює механічну енергію на електричну. Потім пара з турбіни конденсується у конденсаторі (К) і конденсатним електронасосом першого ступеня (КЕН-1) подається на блокову знесолюючу установку (БЗУ), до складу якої входять іонообмінні фільтри змішаної дії. Конденсатний насос другого ступеня (КЕН-2) подає його на підігрівач низького тиску (ПНТ). У деаераторі другого контуру (Д) вода звільняється від домішок кисню і вуглекислого газу, нагрівається в підігрівачі високого тиску (ПВТ) і живильними насосами другого контуру подається до парогенератора. Частина води із парогенератора постійно проходить очищення на СВО-5 і вода, що очищується, надходить до конденсатора. Для поповнення робочого середовища організовано підживлення очищеною водою. Разом із цим підживленням у воду другого контуру потрапляють домішки різних солей, у т.ч. і такі, які можуть утворювати накип на стінках устаткування.

У системі охолодження конденсаторів турбін на АЕС використовуються баштові градирні й водоймище-охолоджувач.

Водно-хімічний режим теплоносія другого контуру АЕС

У другому контурі АЕС відбуваються важливі фізико-хімічні процеси, що визначають надійність і безпечність її роботи.

Безпечно й економічне ведення основного технологічного процесу на АЕС забезпечується підтримкою ВХР із врахуванням конструкцій-

них матеріалів і процесів, що відбуваються у другому контурі енергоблока. Взаємодія води із конструкційними матеріалами визначається хімічними, фізико-хімічними й електрохімічними процесами.

При виборі водно-хімічного режиму (наприклад, гідразино-аміачного, морфолінового чи етаноламінового) оцінюється його вплив на обладнання другого контуру. Найбільшу увагу приділено проблемі корозії та зношування устаткування.

Для обладнання другого контуру предметом розгляду є цілісність і міцність конструкційних матеріалів. Оцінюючи працездатність обладнання контуру увагу акцентують на проблемі корозії, ерозії та зношування обладнання, перенесення активності із першого контуру та забруднення другого контуру радіоактивними домішками, присосів охолоджуючої води, сольових і корозійних відкладень на поверхнях нагріву парогенераторів, конденсаторів, теплообмінних апаратів, насосів і арматурі. Зростання різного роду відкладень на внутрішніх поверхнях обладнання негативно впливає на коефіцієнт теплопередачі, тобто економічність. Збільшення вмісту в контурній воді небажаних домішок впливає на зростання швидкості корозії, руйнування конструкційних матеріалів обладнання і, як наслідок, може призводити до аварій і дорогих позапланових ремонтів.

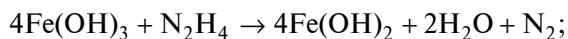
Організація ВХР в основному передбачає розроблення та реалізацію корекції водно-хімічних умов експлуатації, технічних норм до якості робочого середовища, методів і засобів підтримки заданого стану водно-хімічних умов. ВХР має забезпечувати: мінімальну кількість відкладень на теплообмінній поверхні ПГ, в проточній частині турбін і в конденсатно-живильному тракті; запобігання корозійним і корозійно-ерозійним пошкодженням конструкційних матеріалів ПГ, устаткування і трубопроводів другого контуру; мінімально досяжний обсяг скидань з концентрацією домішок, які містяться в них, що не перевищує гранично допустимі концентрації для водойм.

Для другого контуру енергоблоків АЕС передбачається підтримка ВХР із корекційною обробкою робочого середовища гідразин-гідратом, при необхідності аміаком, морфоліном, гідрооксидом літію [6].

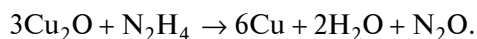
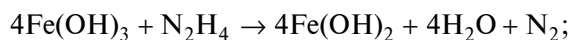
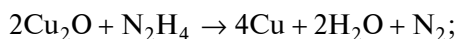
Для хімічного знекиснення теплоносія вводиться гідразин-гідрат ($N_2H_4 \cdot H_2O$). Взаємодія гідразину з киснем описується таким рівнянням:



А також гідразин відновлює з'єднання тривалентного заліза до двовалентного, а кисень витрачається на окиснення заліза:



При введенні гідразину в живильну воду він взаємодіє із оксидами металів, неминуче присутніх у пароводяному тракті. Реакції перебігають за формулами



При температурному розкладі надлишкового гідразин-гідрату в теплоносії утворюється аміак (NH_3) та водень (H_2):



Підвищений вміст аміаку (більше 1000 мкг/дм³) в конденсаті значно активізує корозійне руйнування латуні трубної системи,

особливо при наявності кисню. Надлишок аміаку видаляється із контуру на катіоніті фільтрів змішаної дії (ФЗД) БЗУ та при відкритті здувки із деаератора до атмосфери [7].

За необхідності, якщо рН продувної води ПГ менше 8,3 од., та для створення лужного середовища в зоні накопичення шламу проводиться залуження живильної води гідроксидом літію (LiOH) до нормованих величин [8].

Основу ВХР становлять норми якості робочого середовища, вимоги до якого наведено в табл. 1.

Норми якості робочого середовища встановлюють гранично допустимий рівень забруднення, що впливають на надійність та економічність роботи устаткування другого контуру, а також вимоги до систем очищення робочого середовища при різних режимах експлуатації енергоблока.

Отже, для продовження терміну служби, надійної, безаварійної й економічної роботи обладнання, а також для забезпечення експлуатації в проектних режимах, нормативом передбачено засоби та методи підтримки ВХР два контури.

Системи забезпечення ВХР мають забезпечувати якість робочого середовища другого контуру згідно із встановленими нормами.

Таблиця 1. Норми якості живильної води ПГ та продувної води "сольового" відсіку ПГ при експлуатації енергоблока на енергетичному рівні більше 35 %

Показник, одиниці вимірювання	Живильна вода ПГ після ПВТ	Продувна вода "сольового" відсіку ПГ
Нормовані показники	Діапазон допустимих значень показників	
Величина рН при 25 °С, одиниць	–	8,0–9,2 (8,0–9,4)
Питома електропровідність Н-катіонованої проби, мкСм/см, не більше	0,3	5,0
Масова концентрація натрію, мкг/дм ³ , не більше	–	300
Масова концентрація хлорид-іонів, мкг/дм ³ , не більше	–	100
Масова концентрація сульфат-іонів, мкг/дм ³ , не більше	–	200
Масова концентрація кисню, мкг/дм ³ , не більше	10	–
Діагностичні показники	Контрольні рівні показників	
Величина рН при 25 °С, одиниць	9,0±0,2 (8,8–9,3)	–
Масова концентрація заліза, мкг/дм ³ , не більше	15	–
Масова концентрація міді, мкг/дм ³ , не більше	5 (3)	–
Масова концентрація гідразину, мкг/дм ³ , не менше	40 (10)	–
Масова концентрація морфоліну, мг/дм ³	2–5	–
Масова концентрація нафтопродуктів, мкг/дм ³ , не більше	100	–

Хімічний контроль якості робочого середовища другого контуру

Система хімічного контролю призначена для отримання оперативної інформації про стан ВХР другого контуру із метою підтримання нормованих показників якості робочого середовища при експлуатації енергоблоків, виявлення джерел забруднення теплоносія із метою їх своєчасного усунення. На основі результатів хімічного контролю організується режим очищення теплоносія, вводяться коригуючі добавки, здійснюються промивання устаткування і його консервація при виведенні у резерв, перевіряється концентрація регенераційних та промивних розчинів, а також розчину гідразину, що дозується до другого контуру.

Система хімічного контролю включає систему автоматизованого хімічного контролю (АХК) та систему лабораторного хімічного контролю (ЛХК) [5].

Система АХК призначена для:

- отримання оперативної інформації про стан ВХР другого контуру в цілях підтримки нормованих показників якості робочого середовища при експлуатації енергоблоків та своєчасного виявлення і усунення джерел його забруднення;
- оперативного виявлення порушення норм ВХР другого контуру з видачею відповідних сигналів обслуговуючому персоналу;
- подання обробленої інформації персоналу енергоблоку, реєстрації і зберігання отриманої інформації;
- прогнозування та аналізу стану ВХР.

Проте виконання регламентованих показників якості живильної води не дає можливості повністю виключити утворення відкладень на поверхнях нагріву. У зв'язку з чим актуальним є покращення діючих систем керування АЕС та впровадження нових систем автоматизації керування технологічними режимами другого контуру енергоблоку, а також створення програмного забезпечення для моніторингу та прогнозування стану параметрів робочого середовища.

У свою чергу, створення програмного забезпечення неможливе без математичної моделі процесів, що відбуваються в апаратах та трубопроводах другого контуру АЕС.

Математична модель другого контуру АЕС із ВВЕР-1000

Використовуючи блочний принцип системного аналізу ХТС, для другого контуру ВВЕР-1000 були виділені такі блоки:

- ТУ – описує турбінну установку;
- конденсатор – описує конденсатор-1, конденсатор-2, конденсатор-3, конденсатор-4;
- КЕН-1 – описує КЕН-1;
- БЗУ – описує БЗУ;
- ПНТ-1 – описує ПНТ-1а і ПНТ-1б;
- ПНТ-2 – описує ПНТ-2;
- КЕН-2 – описує КЕН-2;
- ПНТ-3 – описує ПНТ-3;
- ПНТ-4 – описує ПНТ-4;
- ПНТ-5 – описує ПНТ-5;
- ЗМ-1 – описує змішувач за ПНТ-5;
- деаератор – описує деаератор-1 і деаератор-2;
- ТПН – описує ТПН;
- ПВТ-6 – описує ПВТ-6а і ПВТ-6б;
- ПВТ-7 – описує ПВТ-7а і ПВТ-7б;
- ЗМ-2 – описує змішувач за ПВТ-7;
- парогенератор – ПГ-1, ПГ-2, ПГ-3, ПГ-4;
- СВО-5 – описує механічний, катіонітний та аніонітний фільтри.

Сукупність перерахованих блоків і системи рівнянь структури технологічних зв'язків становлять математичну модель другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000.

При складанні математичної моделі були прийняті такі допущення:

- математичні моделі блоків розроблені для роботи енергоблоку в режимі нормальної експлуатації, що характеризується незначними коливаннями параметрів;
- при складанні системи рівнянь технологічних зв'язків не враховувалося транспортне запізнювання;
- основним джерелом домішок є конденсатор;
- під дією ТПН робоче тіло не нагрівається.

Розглянемо короткий опис математичних моделей кожного блока.

Модель турбінної установки розроблена на основі матеріального й теплового балансів; розрахунки за моделлю виконуються із використанням програми MARGO, розробленої в Одеському Національному політехнічному університеті під керівництвом В.С. Кірова.

Математична модель конденсатора складена із використанням експериментально-статистичного підходу і являє собою систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Цю модель розроблено на кафедрі КХТП в НТУУ "КПІ" магістрантом І.А. Німченко.

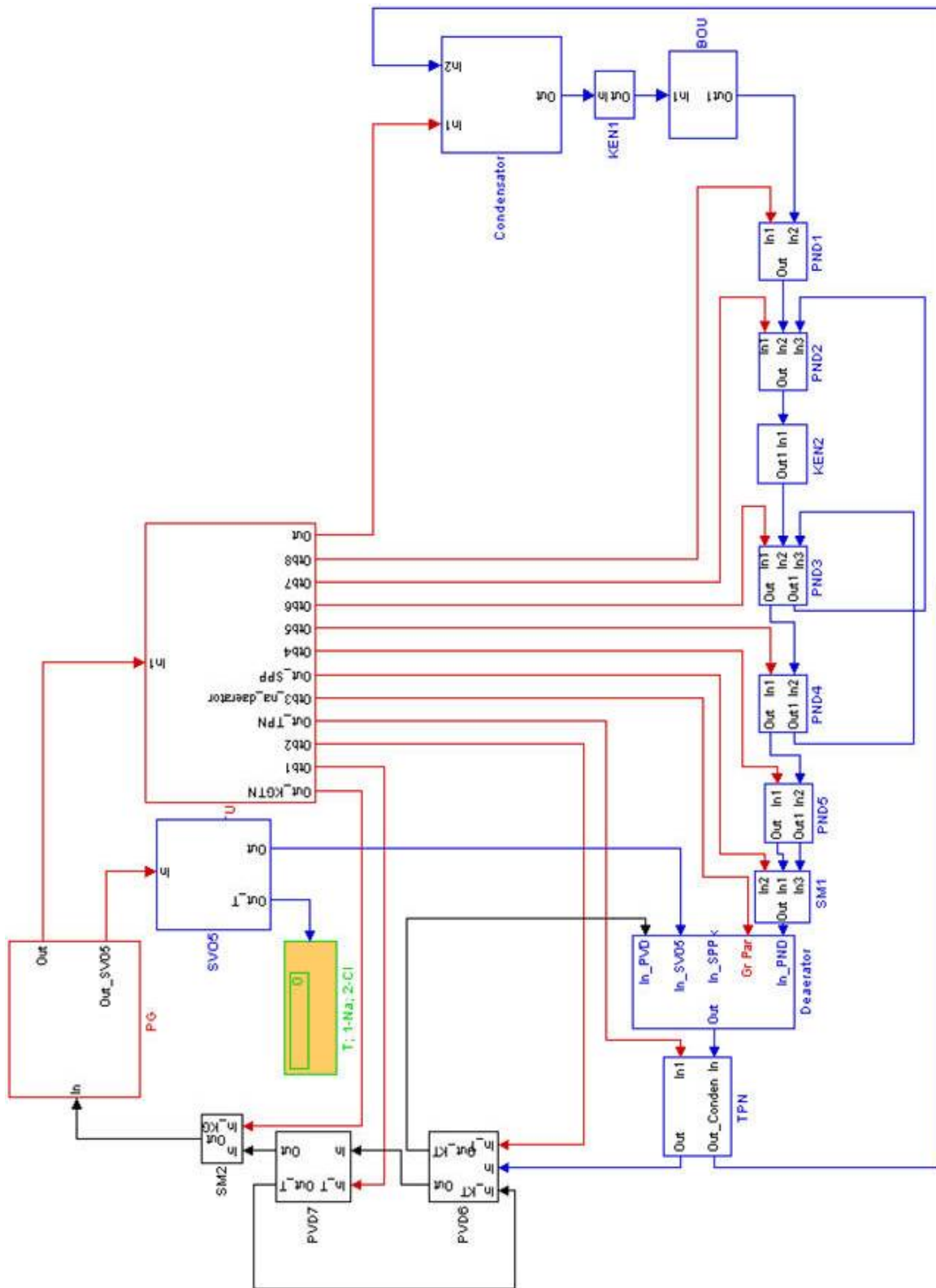


Рис. 2. Математична модель другого контуру енергоблока у блоках Simulink

Таблиця 2. Порівняльна таблиця показників якості робочого середовища

Робоче середовище	Хімічні показники	Одиниці вимірювання	Норма	Фактичне значення
Конденсат до БЗУ	Питома електропровідність	мкСм/см	не більше 0,3	0,196
	Концентрація іонів Na^+	мкг/дм ³	не більше 2	0,340
	Концентрація O_2	мкг/дм ³	не більше 30	20,805
Вода живлення	Значення рН	відн. од.	$9,0 \pm 0,2$	8,983
	Питома електропровідність	мкСм/см	не більше 0,3	0,206
	Концентрація іонів Fe^{3+}	мкг/дм ³	не більше 15	7,967
	Концентрація іонів Cu^{2+}	мкг/дм ³	не більше 3	2,267
	Концентрація O_2	мкг/дм ³	не більше 10	3,652

Математичні моделі КЕН-1, КЕН-2, усіх блоків ПНД і ПВД, а також змішувачів і ТПН розроблені на базі матеріальних і теплових балансів. Їх простота пояснюється тим, що з точки зору хімічних перетворень у цих блоках нічого не відбувається.

Моделі БЗУ та СВО-5 складені на основі аналітичного підходу і являють собою систему диференціальних рівнянь другого порядку у частинних похідних. Розподіл концентрації описується як у часі, так і по висоті фільтру.

Математична модель ПГ є системою диференціальних рівнянь першого порядку із запізненням.

Отримані моделі були реалізовані у програмному пакеті MatLab Simulink, оскільки бібліотека програми містить велику кількість алгоритмів рішення та математичних функцій.

Отриману розрахункову схему другого контуру ВВЕР-1000 у блоках Simulink наведено на рис. 2.

Кожен із матеріальних потоків на схемі описаний такими параметрами: масові витрати, т/год; температура, °С; тиск, МПа; концентрація Na^+ , мкг/кг; концентрація Cl^- , мкг/кг; концентрація SiO_2 , мкг/кг; концентрація SO_4^{2-} , мкг/кг; концентрація Fe^{3+} , мкг/кг; концентрація Cu^{2+} , мкг/кг; концентрація O_2 , мкг/кг; питома електропровідність χ , мкСм/см.

Для оцінки адекватності розробленої моделі наведено таблицю порівняння нормативних і розрахованих даних (табл. 2).

Ця математична модель може бути використана при відпрацюванні стратегій керування другим контуром АЕС із реактором ВВЕР-1000.

Висновки

У результаті детального огляду ведення ВХР другого контуру АЕС виявлено, що виконання регламентованих показників щодо якості живильної води не може повністю виключити утворення відкладень природних домішок води і зменшити відкладення продуктів корозії на поверхнях нагріву. Тому для оптимального ведення водно-хімічного режиму необхідне покращення діючих систем керування АЕС та впровадження нових систем автоматизації керування технологічними режимами другого контуру енергоблока, а також створення програмного забезпечення для моніторингу та прогнозування стану параметрів робочого середовища.

Проте створення програмного забезпечення неможливе без математичної моделі процесів, що відбуваються в апаратах і трубопроводах енергоблока АЕС, тому було створено математичну модель другого контуру АЕС із ВВЕР-1000.

Результати моделювання підтверджуються експериментальними даними реально діючих АЕС, що свідчить про адекватність розробленої математичної моделі. Оскільки модель адекватно описує досліджуваний процес, то її можна використати на практиці у подальших дослідженнях, наприклад, при відпрацюванні стратегій керування ВХР другого контуру АЕС із ВВЕР-1000.

1. Герасимов В.В., Горбатов В.П., Морозов А.В. Некоторые аспекты управления сроком службы металла теплоэнергетического оборудования АЭС // Теплоэнергетика. – 2000. – № 8. – С. 14–23.
2. Стяжкин П.С., Крицкий В.Г. и др. Хемометрический анализ связи надежности элементов оборудования АЭС со значениями нормируемых показателей качества ВХР // Междунар. науч.-техн. сов. “Водно-химический режим АЭС”, Смоленская АЭС, 13–17 октября 2003 г.: Тез. докл. // ВНИИАЭС. – 2003. – С. 98–105.
3. Тяпков В.Ф., Юрманов В.А., Брыков С.И. и др. Анализ ведения водно-химического режима первых контуров АЭС России с реакторами ВВЭР-1000 // Там же. – С. 55–61.
4. Юрманов В.А., Белоус В.Н. Анализ влияния сульфатов на коррозионное растрескивание аустенитных сталей на АЭС с РБМК // Там же. – С. 7–15.
5. Водно-химический режим второго контура атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР. Технические требования к качеству рабочей среды. Коррекционная обработка гидразин-гидратом, морфолином, гидроокисью лития. ГНД 95.1.06.02.002-04.
6. Акользин П.А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 304 с.
7. Герасимов В.В., Касперович А.И., Мартынова О.И. Водный режим атомных электростанций. – М.: Атомиздат, 1976. – 110 с.
8. Шкроб М.С., Прохоров Ф.Г. Водоподготовка и водный режим паротурбинных электростанций. – М.: Гос. энергет. изд-во, 1951. – 416 с.
9. Богоявленский В.Л. Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
10. Коррозионная стойкость реакторных материалов. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. – 120 с.
11. Герасимов В.В. Коррозия реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1980. – 160 с.
12. Герасимов В.В. Коррозия сталей в нейтральных водных средах. – М.: Металлургия, 1981. – 192 с.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
10 квітня 2013 року