

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МЕРДУХ СВІТЛАНА ЛЕОНІДІВНА



УДК 621.039.001.57

**КЕРУВАННЯ БЛОЧНО-ЗНЕСОЛЮЮЧОЮ УСТАНОВКОЮ
У ДРУГОМУ КОНТУРІ АЕС ІЗ ВВЕР-1000**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Медведєв Ромуальд Броніславович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ладанюк Анатолій Петрович,
Заслужений діяч науки і техніки України,
Національний університет харчових технологій,
завідувач кафедри автоматизації процесів управління

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Шевчук Дмитро Олегович,
Національний авіаційний університет,
заступник директора Навчально-наукового центру
Новітніх технологій

Захист відбудеться «05» квітня 2017 року о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.002.04 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 438.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «03» березня 2017 р.

В. о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради
Д.26.002.04



В.М. Томашевський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Обладнання атомних електростанцій (АЕС) працює за високих теплових навантажень, тому велика увага в цій галузі приділяється якості води – її схильності до утворення відкладань і корозійної активності. Одним із найважливіших факторів, що мають значний вплив на надійність, економічність та безпечність функціонування АЕС, є водно-хімічний режим другого контуру енергоблоку.

Водно-хімічний режим (ВХР) передбачає очищення робочого середовища від солей та механічних домішок і видалення корозійно-активних газів та подальше повернення конденсату до парогенератора (ПГ). Тобто ВХР призначений для забезпечення мінімізації корозійних процесів й процесів утворення відкладень у водопаровому тракті та основному обладнанні другого контуру АЕС.

Проте, як показала практика, дотримання встановлених норм якості теплоносіїв не зупиняє перебіг корозійних процесів та накопичення відкладень на внутрішніх поверхнях теплообмінного обладнання. Тому вдосконалення ведення ВХР другого контуру енергоблоку є перспективним напрямком розвитку наукових досліджень.

Відомо, що найбільш вразливим устаткуванням другого контуру є ПГ, у якому, внаслідок випарювання води, відбувається концентрування іоногенних домішок, що надходять із водою живлення. Для їх видалення призначена блочно-знесолююча установка (БЗУ), що є одним із найважливіших засобів підтримки ВХР другого контуру.

На сьогодні на жодній електростанції України робота БЗУ не автоматизована. Тобто розподілення витрат між фільтрами, виведення їх на регенерацію, розпушення та ін. здійснюється оператором вручну, що призводить до нераціонального використання хімреагентів, води живлення та збільшення об'ємів рідких відходів енергоблоку, а також підвищується ризик виникнення аварійних режимів. Тому створення системи автоматизованого керування процесом знесолення турбінного конденсату є надзвичайно актуальним питанням для атомної енергетики України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно з науково-дослідними роботами “Розробка ПТК для моніторингу та управління ВХР другого контуру АЕС із застосуванням сучасних технічних засобів автоматизації” (г/д № 7 від 01.02.2010, закінчився у 2012 р.), “Удосконалення системи моніторингу та управління ВХР другого контуру АЕС із застосуванням сучасних програмних засобів моделювання та автоматизації” (г/д № 34-12 від 01.02.2012, закінчився у 2014 р.) та “Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності при управлінні водно-хімічним режимом другого контуру АЕС із ВВЕР-1000” (г/д № 21-14 від 25.02.2014, закінчився у 2016 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу знесолення турбінного конденсату шляхом створення системи керування

БЗУ другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 на базі розподіленої системи керування Expertion PKS, реалізації нечіткого регулювання для розподілення навантажень між фільтрами та розробки стратегій керування процесом знесолення турбінного конденсату.

Реалізація поставленої мети здійснюється шляхом розв'язання наступних науково-практичних задач:

— дослідження особливостей процесу знесолення турбінного конденсату у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000;

— аналіз даних експлуатації БЗУ АЕС і дослідження керуючих впливів на процес знесолення турбінного конденсату;

— наукове обґрунтування, дослідження, розробка та реалізація регресійної моделі БЗУ із використанням даних експлуатації АЕС;

— розроблення нечіткого алгоритму керування паралельно працюючими фільтрами БЗУ, враховуючи оптимальні навантаження на них;

— розроблення стратегій керування процесом знесолення турбінного конденсату другого контуру АЕС із ВВЕР-1000 на базі розподіленої системи керування Expertion PKS.

— розроблення системи керування процесом знесолення турбінного конденсату, яка міститиме класичні алгоритми керування із інтелектуальними складовими, що дозволить на сучасному рівні здійснювати оперативне керування БЗУ, підтримуючи роботу установки в безпечних межах.

Об'єктом дослідження є процес знесолення турбінного конденсату другого контуру енергоблоку АЕС із реактором типу ВВЕР-1000.

Предметом дослідження є математичні моделі та системи керування блочно-знесолюючою установкою другого контуру енергоблоку АЕС із реактором типу ВВЕР-1000.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених в дисертаційній роботі задач використано: методи системного аналізу – для створення загальної структури системи керування та формулювання задач управління; методи структурно-параметричної ідентифікації та елементи теорії математичної статистики – для побудови регресійних залежностей, що описують об'єкт керування; методи теорії нечітких множин – для розробки моделі нечіткої системи керування іонітними фільтрами БЗУ; методи класичної та сучасної теорії управління – для розробки алгоритму і побудови комплексних стратегій управління БЗУ та реалізації інтелектуальної системи керування процесом знесолення турбінного конденсату; комп'ютерне моделювання – для дослідження та верифікації роботи системи у різних режимах управління об'єктом керування.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. *Вперше* отримано регресійну модель БЗУ, яка надає можливість розрахувати значення водневого показника та питомої електропровідності турбінного конденсату, котрі впливають на управлінські рішення при керуванні об'єктом у будь-який проміжок часу та визначають момент зміни режиму роботи фільтрів. Існуючі моделі призначені лише для відображення динаміки концентрацій іонів солей за висотою фільтруючого матеріалу.

2. *Вперше* запропоновано застосування нечітких підходів для створення системи керування БЗУ АЕС із ВВЕР-1000, а саме, сформульовано набір нечітких продукційних правил і розроблена модель режимів функціонування фільтрів у термінах нечіткої логіки, що дозволяє встановити необхідну кількість паралельно працюючих ланцюгів фільтрів, які входять до складу БЗУ.

3. *Вперше* розроблено стратегії керування БЗУ другого контуру енергоблоку АЕС з використанням програмного забезпечення Control Builder розподіленої системи керування Exregion PKS, які автоматизують процес відправки ланцюгів фільтрів на регенерацію та включення їх у роботу після відновлення, шляхом керування пристроями з дискретним інтерфейсом.

4. *Вперше* розроблено систему керування процесом знесолення турбінного конденсату, яка поєднує класичні алгоритми керування з інтелектуальними складовими, дозволяє зменшити частку ручних операцій, підвищити надійність роботи енергоблоку за рахунок зменшення помилок персоналу, підвищити економічність і якість роботи за рахунок автоматично контрольованих технологічних режимів, а також знизити кількість стоків енергоблоку.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в дисертації висновки та рекомендації дозволяють вирішити ряд важливих практичних завдань щодо вдосконалення роботи водоочисного обладнання АЕС, зокрема блочної знесолюючої установки.

Розроблені регресійні моделі іонітних фільтрів, що на відміну від існуючих, надають можливість розраховувати й відображати стан параметрів фільтру у ході процесу, важливих з точки зору керування, з визначеними фізичними параметрами потоку та складом води, що надходить на вхід фільтру, у різні моменти часу. Результати розрахунків дозволяють визначити момент часу, коли необхідно виконати зміну режиму (розпушення, виведення на регенерацію, тощо) задля уникнення аварійних режимів роботи обладнання.

Внаслідок застосування нечітких регуляторів зміни режимів роботи фільтрів системи знесолення турбінного конденсату другого контуру АЕС синтезовані алгоритми керування, що зменшують час прийняття управлінських рішень та, як наслідок, є більш ефективними порівняно із рішеннями, що приймаються кваліфікованим обслуговуючим персоналом.

Використання розроблених стратегій керування відкриття-закриття регулюючих клапанів, за допомогою яких здійснюється керування витратами через фільтри БЗУ, у поєднанні із нечіткими алгоритмами, дозволяє автоматизувати процес керування паралельно працюючими фільтрами БЗУ.

Розроблена система інтелектуального прийняття рішень щодо керування фільтрами змішаної дії БЗУ успішно пройшла випробування за Програмою і методикою випробувань і була передана для дослідної експлуатації на ВП «Хмельницька АЭС».

Також результати досліджень впроваджені у навчальному процесі кафедри кібернетики ХТП хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Особистий внесок здобувача. Отримані результати та положення, наведені у дисертаційній роботі, є власним здобутком автора. У публікаціях, написаних у

співавторстві, здобувачеві належать такі результати: у працях [1, 13, 15] –аналіз особливостей водно-хімічного режиму другого контуру енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000 та алгоритм функціонування системи керування водопідготовчими установками; у працях [2, 10] – нечіткі алгоритми для пошуку оптимальних стратегій керування ВХР другого контуру АЕС; у працях [3, 5, 9, 14] – математична модель системи знесолення турбінного конденсату АЕС із реактором ВВЕР-1000; у працях [7, 16] – стратегія керування температурним режимом блочної знесолюючої установки другого контуру АЕС; у праці [8] – алгоритм діагностування стану БЗУ другого контуру атомних електростанцій; у праці [11] –алгоритм керування БЗУ другого контуру АЕС; у праці [12] – алгоритм розподілення навантажень між паралельними фільтрами АЕС; у праці [17] – нечітка модель керування витратами іонітних фільтрів системи знесолення другого контуру енергоблоку АЕС; у праці [18] – система керування БЗУ у другому контурі АЕС; у праці [19] – комплексні стратегії керування фільтрами БЗУ.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній науково-практичній конференції «Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток» (Київ – 2010), Міжнародній науковій конференції «Математичні методи в техніці та технологіях – ММТТ-24» (Київ – 2011), Міжнародній науковій конференції «Математичні методи в техніці та технологіях – ММТТ-25» (Волгоград – 2012), Науково-практичній конференції «Наукові підсумки 2012 р.» (Харків – 2012), VI Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Хімія та сучасні технології" (Київ – 2013), Міжнародній науковій конференції «Математичні методи в техніці та технологіях – ММТТ-26» (Нижній Новгород – 2013), Першій Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (Київ – 2014), 21-й Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2014» (Київ – 2014).

Публікації. Основні положення дисертації, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виноситься на захист, опубліковано у 19 наукових працях: 8 статей у провідних науково-технічних фахових виданнях України, 6 із яких у журналах, що реферуються наукометричними базами даних (Scopus, Index Copernicus, Ulrich’s Periodicals Directory та ін.), 11 тез доповідей в збірниках науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 127 найменувань та 9 додатків. Загальний обсяг роботи становить 194 сторінки, з них обсяг основної частини 105 сторінок, у тому числі 68 рисунків та 10 таблиць.

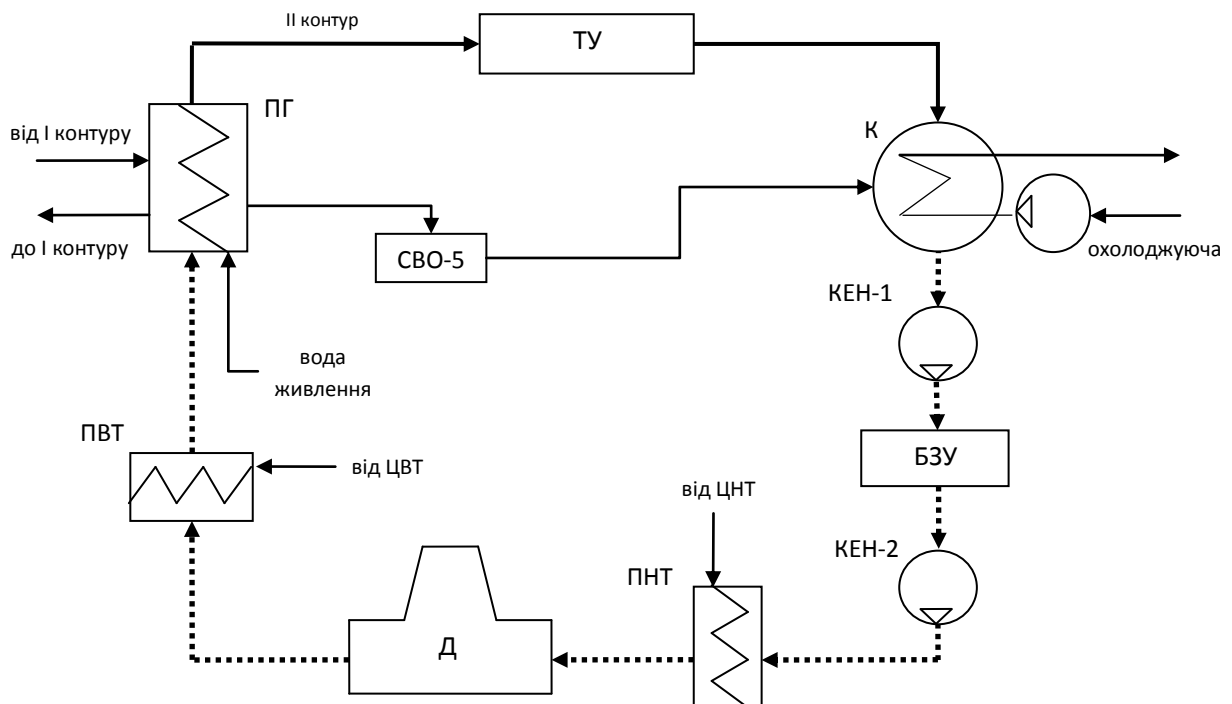
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, показаний її зв’язок з науковими планами і програмами, сформульовані мета, задачі, об’єкт та предмет дослідження, визначені наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, наведені відомості про апробацію результатів дисертації, а також про публікації за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми керування процесом знесолення турбінного конденсату другого контуру енергоблоку АЕС, наведені результати інформаційного пошуку за темою дослідження, проаналізовано існуючі підходи до керування БЗУ, сформульовано наукову проблему та задачі дослідження.

У літературному огляді проведено аналіз процесу знесолення турбінного конденсату АЕС з водо-водяними енергетичними реакторами одиничною потужністю 1000 МВт (ВВЕР-1000) як об'єкта керування.

Досліджено технологічні особливості енергоблоку (рис. 1) та БЗУ, як засобу підтримки ВХР. БЗУ розташована у другому контурі енергоблоку в лінії конденсатного тракту між охолоджувачем пари ущільнень та підігрівачем низького тиску (ПНТ-1). До складу установки входять електромагнітний фільтр (ЕМФ), призначений для видалення продуктів корозії у другому контурі та п'ять блоків фільтрів, кожен з яких складається із фільтру змішаної дії (ФЗД), що представляє собою іонообмінний фільтр, та ФУ (фільтра уловлювача), що призначений для видалення іонів, що виносяться із ФЗД.



ТУ – турбінна установка; К – конденсатор; КЕН-1, КЕН-2 – конденсатні електронасоси першого та другого ступенів; Д – деаератор; ПВТ – підігрівач високого тиску; СВО-5 – установка спеціальної водоочистки

Рисунок 1 – Принципова технологічна схема другого контуру ВВЕР-1000

Виявлено, що експлуатація ЕМФ автоматизована на досить високому рівні та, на даний момент, не потребує подальшого дослідження. Проте, робота ФЗД на жодній електростанції України не автоматизована. В окремих випадках практикується ведення ВХР без очищення конденсату, що є неприйнятними за відсутності конденсаторів нового покоління. Отже, забезпечення високої якості водних теплоносіїв АЕС залишається актуальним питанням на сьогоднішній день.

У зв'язку з цим були проведені дослідження в напрямку автоматизації процесу ведення ВХР другого контуру, зокрема ФЗД БЗУ, з метою створення системи керування процесом знесолення турбінного конденсату, що дозволить мінімізувати вміст солей у робочому середовищі другого контуру, зменшити кількість відкладень на теплообмінних поверхнях обладнання та запобігти корозійним пошкодженням конструкційних матеріалів.

Другий розділ присвячено побудові регресійних моделей процесу знесолення турбінного конденсату реакторної установки АЕС на основі даних пасивного експерименту.

Досліджено можливість використання детермінованих математичних моделей іонного обміну для роз'язання задач керування. Доведена необхідність розроблення нових математичних залежностей внаслідок неможливості використання існуючих на даний час алгоритмів з метою керування обраним об'єктом дослідження.

Розроблені математичні залежності з використанням експериментально-статистичного методу на основі даних експлуатації енергоблоку АЕС, що надає можливість найбільш ефективно провести ідентифікацію досліджуваного об'єкта.

У результаті аналізу роботи БЗУ було виділено наступні вихідні параметри, які впливають на управлінські рішення при керуванні об'єктом, що можуть бути прогнозованими в часі та не є випадковими величинами такі, як значення питомої електропровідності та водневого показника.

Змінні стану, що були використані для побудови математичних залежностей питомої електропровідності та водневого показника, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Таблиця ідентифікаторів факторів математичних залежностей

Для питомої електропровідності						
Xh	C _{Na}	C _{N₂H₄}	C _{Fe}	T	C _{Cl}	C _{SO₄}
у	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
Примітка. Xh – питома електропровідність конденсату після БЗУ; Na – концентрація іонів натрію в конденсаті за КЕН-1; C _{N₂H₄} – концентрація гідрозину в живильній воді ПГ; C _{Fe} – концентрація іонів феруму в конденсаті за КЕН-1; T – температура проби конденсату за КЕН-1; C _{Cl} – концентрація іонів хлору в продувній воді сольового відсіку ПГ; C _{SO₄} – концентрація іонів сульфату у продувній воді сольового відсіку ПГ.						
Для водневого показника						
pH	C _{N₂H₄}	T	C _{Fe}			
у	X ₁	X ₂	X ₃			
Примітка. pH – значення водневого показника конденсату після БЗУ; C _{N₂H₄} – концентрація гідрозину в живильній воді ПГ; T – температура проби конденсату за КЕН-1; C _{Fe} – концентрація іонів феруму в конденсаті за КЕН-1.						

Задля виявлення наявності та дослідження тісноти зв'язку між обраними відповідними факторами процесу та вихідними змінними, було проведено кореляційний аналіз даних та подальше ранжування вхідних факторів.

Застосування кореляційного аналізу дозволило проранжувати всі змінні та ефекти їх можливої взаємодії за спаданням ступеня їх впливу на вихідну змінну. До таблиці 2 занесені лише ті фактори та їх взаємодії, що мають помірну тісноту зв'язку за шкалою Чеддока.

Ранжування факторів за ступенем впливу на вихідну змінну

Для питомої електропровідності							
Фактор	x_1	$x_1 \times x_4$	$x_1 \times x_6$	$x_1 \times x_3$	x_4	$x_2 \times x_5$...
Коефіцієнт кореляції	0,74	0,74	0,72	0,64	0,61	0,59	<0,59
Для водневого показника							
Фактор	x_2	$x_2 \times x_3$	x_3	$x_1 \times x_3$...		
Коефіцієнт кореляції	0,71	0,65	0,64	0,61	<0,61		

У відповідності до обраних виходів системи, на підставі проведеного ранжування вхідних змінних, було проведено регресійний аналіз та отримані відповідні математичні залежності з почерговим включенням факторів за зменшенням ступеня їх впливу на вихідну змінну задля встановлення функціональних залежностей між експериментальними даними експлуатації БЗУ.

Отримані результати досліджень щодо питомої електропровідності зведено до таблиці 3.

Розраховані критерії придатності наближень

Модель	Коефіцієнт детермінації (R^2)	Коефіцієнт кореляції / кореляційне відношення (R)
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1$	0,51	0,74
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_4$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,62	0,82
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,54	0,76
$y = a_0 + a_1 \cdot x_4 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 \cdot x_4$	0,51	0,74
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3$	0,55	0,77
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_4$	0,64	0,83
$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_4 + a_6 \cdot x_2 \cdot x_5$	0,64	0,84

Було прийнято рішення зупинитись на передостанній отриманій залежності, так як наступне додавання регресорів суттєво ускладнювало структуру моделі, але незначно впливало на покращення основних показників її якості. Дану модель було перевірено на наявність незначущих регресорів із подальшим виключенням їх зі складу моделі.

У результаті коефіцієнт детермінації склав 0,7245, тобто запропонована модель пояснює 72 % варіації залежної змінної. Кореляційне відношення, у свою чергу, набуло значення 0,82, що визначає тісний зв'язок між величинами.

За отриманими результатами було зроблено висновок, що розроблена математична залежність адекватно експлуатаційні дані та може бути використана у складі системи керування БЗУ.

У результаті отримана наступна регресійна залежність, що описує експериментальні дані питомої електропровідності від обраних параметрів стану (табл. 1):

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_4$$

або зі значеннями коефіцієнтів

$$y = 2,02 - 2,26 \cdot x_1 + 0,05 \cdot x_4 - 0,06 \cdot x_1 \cdot x_4$$

За наведеним вище алгоритмом досліджувався зв'язок водневого показника від параметрів наведених в таблиці 1.

Результати регресійного аналізу представлено у таблиці 4.

Таблиця 4

Розраховані критерії придатності наближень

Модель	Коефіцієнт детермінації (R^2)	Коефіцієнт кореляції / кореляційне відношення (R)
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2$	0,57	0,71
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_3$	0,60	0,73
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot x_3$	0,62	0,75
$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3$	0,72	0,82

Наступне включення регресорів до складу моделі виявилось недоцільним. Тому було прийнято рішення зупинитись на останній отриманій залежності. Дану модель також було перевірено на наявність незначущих регресорів. У результаті за оптимальну було прийнято модель із включенням усіх регресорів.

Коефіцієнт детермінації у даному випадку склав 0,7231, отож запропонована модель пояснює 72 % варіації залежної змінної. Кореляційне відношення становить 0,82, що визначає тісний зв'язок між величинами.

Таким чином, отримана регресійна залежність, що описує зміну водневого показника, має наступний вигляд:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3$$

або зі значеннями коефіцієнтів

$$y = 13,7740 - 0,108 \cdot x_2 + 0,0123 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,4537 \cdot x_3 + 0,0001 \cdot x_1 \cdot x_3$$

Отже, за отриманими результатами можна зробити висновок, що розроблені регресійні моделі адекватно описують дані експлуатації АЕС та можуть бути використані у складі системи керування БЗУ.

Третій розділ присвячено розробленню алгоритму керування БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР-1000.

Завдання системи автоматичного керування БЗУ полягає у визначенні моменту перемикання фільтрів в один із дискретних станів: робота, резерв, розпушення.

Враховуючи особливості завдання були застосовані методи інтелектуального керування як інструменту, що дозволяє якісно використовувати знання про об'єкт у формі логіко-лінгвістичних виразів та задіяти весь накопичений досвід експлуатації об'єкта керування при розробці алгоритму прийняття рішення. Саме такий підхід дає можливість реалізувати керування об'єктом на сучасному рівні та задовольнити теперішнім вимогам щодо систем автоматизації.

Серед систем інтелектуального керування найбільш придатними для рішення поставленого завдання є системи, що засновані на використанні нечіткої логіки, внаслідок наявності багатого досвіду експлуатації БЗУ, яка дає можливість використовувати базу управлінських рішень, що накопичувались протягом тривалого часу.

У якості вхідних змінних було прийнято значення витрат через фільтри. Вихідна змінна, у свою чергу, приймає одне із можливих дискретних станів: включити ще один фільтр у роботу, вивести один фільтр у резерв, провести розпушення, нічого не виконувати.

Далі була проведена фазифікація обраних вхідних сигналів БЗУ. На основі аналізу відповідних даних та експертних оцінок визначено чотири терми для даної змінної. Отримані в результаті функції приналежності наведені на рис. 2.

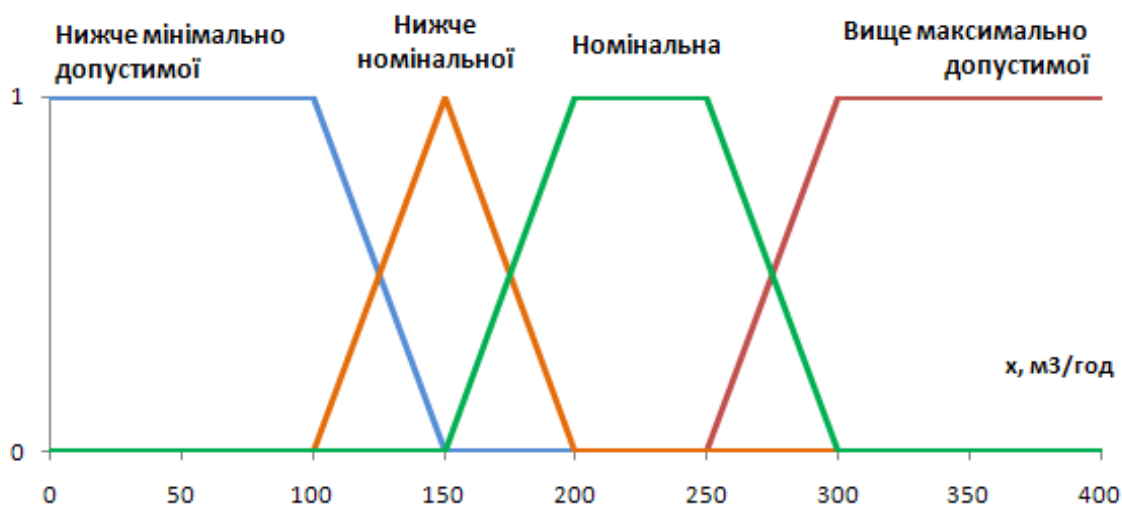


Рисунок 2 – Модель режимів роботи фільтра в термінах нечіткої логіки

На наступному етапі сформульовано набір нечітких правил для трьох паралельно працюючих фільтрів БЗУ із використанням моделі типу Мамдані (табл. 5). Рішення щодо переключення фільтра приймається виходячи із комбінації режимів усіх працюючих на даний момент фільтрів блоку.

Тобто, наприклад, **ЯКЩО** (Витрата через фільтр- 1 «Вище максимально допустимої») **ТА** (Витрата через фільтр- 2 «Нижче номінальної») **ТА** (Витрата через фільтр- 3 «Номінальна») **ТО** (Необхідно провести розпушення).

Функції приналежності, що описують вихідну змінну наведені на рис. 3.

Процедура дефазифікації зводилась до вибору правила з максимальним ступенем приналежності методом «найбільше серед максимумів» (LOM – Largest of Maximum).

Фрагмент бази продукційних правил

№ правила	Витрати, м ³ /год.			Рішення
	Фільтр 1	Фільтр 2	Фільтр 3	
1	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Номінальний	Розпушити
2	Вище максимально допустимої	Номінальний	Нижче номінального	Розпушити
3	Нижче номінального	Номінальний	Вище максимально допустимої	Розпушити
...
7	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Номінальний	Відключити
...
16	Вище максимально допустимої	Номінальний	Вище максимально допустимої	Включити
17	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	Вище Номінального	Включити
...
44	Нижче мінімально допустимої	Нижче мінімально допустимої	Нижче мінімально допустимої	Відключити
45	Нижче номінального	Нижче номінального	Нижче номінального	Відключити
46	Номінальний	Номінальний	Номінальний	Нічого не виконувати

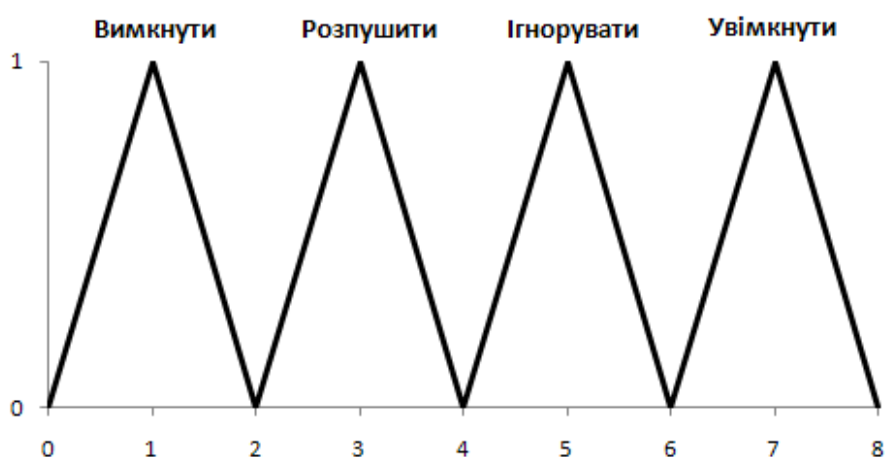


Рисунок 3 – Вихідна змінна в термінах нечіткої логіки

Результати моделювання роботи нечіткої системи керування наведені на рис. 4. У верхній частині рисунка показаний графік зміни витрат через фільтри, на нижній наведені рішення прийняті нечітким регулятором та рішення прийняті за контрольною вибіркою в залежності від режимів роботи фільтрів у кожен момент часу.

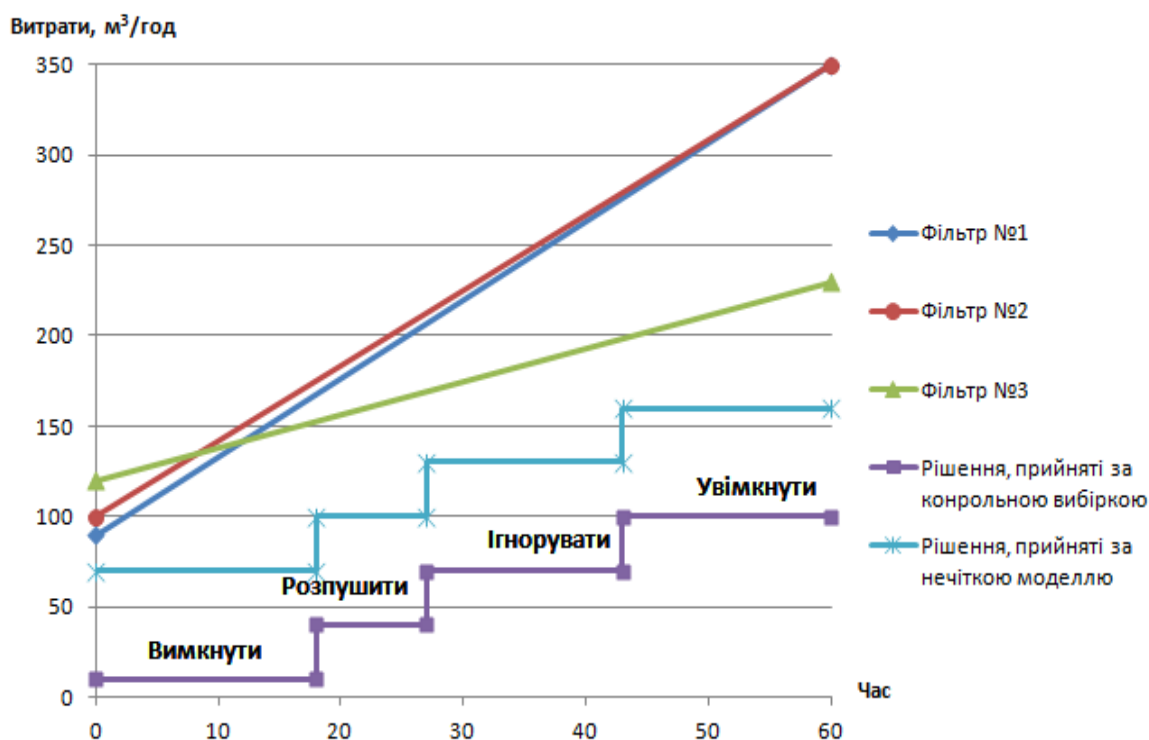


Рисунок 4 – Результати апробації моделі нечіткої системи керування

Адекватність моделі нечіткої системи керування було встановлено на основі порівняння нечітких рішень із еталонною вибіркою, що співпали на 100 %.

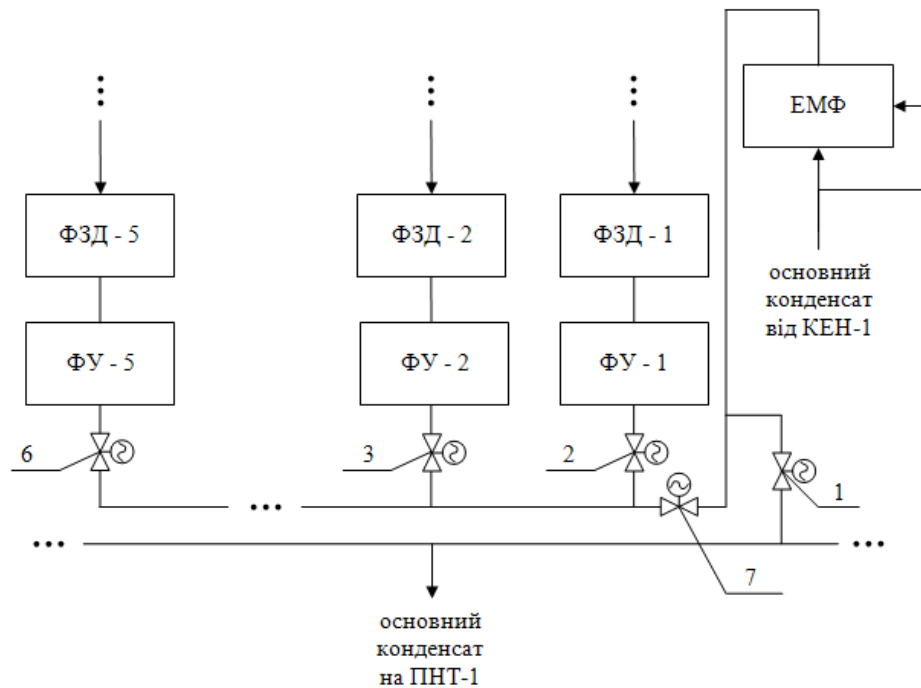
У четвертому розділі розглянуто особливості створення інтелектуальної системи прийняття рішень щодо визначення стану ФЗД БЗУ, що поєднує розроблені нечіткі алгоритми, регресійні залежності та стратегії керування БЗУ в одне інтегроване середовище.

Стратегії керування процесом знесолення турбінного конденсату АЕС реалізовано із застосуванням програмного та апаратного забезпечення розподіленої системи керування Experion PKS фірми Honeywell, у середовищі Control Builder.

Виходячи з особливостей процесу очищення турбінного конденсату другого контуру й специфіки відповідного обладнання були виділені наступні параметри, які суттєво впливають на роботу фільтрів та якість очищення води: перепад тиску, що вказує на спресованість фільтруючого матеріалу (у штатному режимі роботи він складає 0,25 МПа); температура (допустиме значення температури фільтрованої води становить менше 45 °С); водневий показник рН (діапазон допустимих значень показника – 8,0-9,2 одиниць); питома електропровідність, що вказує на ступінь концентрації солей у відфільтрованій воді (допустиме значення – до 0,5 мксм/см).

Розроблена система керування дозволяє відслідковувати відхилення нормованих показників роботи другого контуру від заданих значень і вчасно

реагувати на їхні зміни шляхом закриття або відкриття відповідної запірної арматури БЗУ (рис. 5).



1 – байпас ФЗД; 2÷6 – арматура подачі конденсату на ФЗД; 7 – секційна арматура

Рисунок 5 – Фрагмент принципової технологічної схеми БЗУ

Структура розробленої стратегії керування процесом знесолення турбінного конденсату, яка побудована з урахуванням вище згаданих параметрів, наведена на рис. 6.

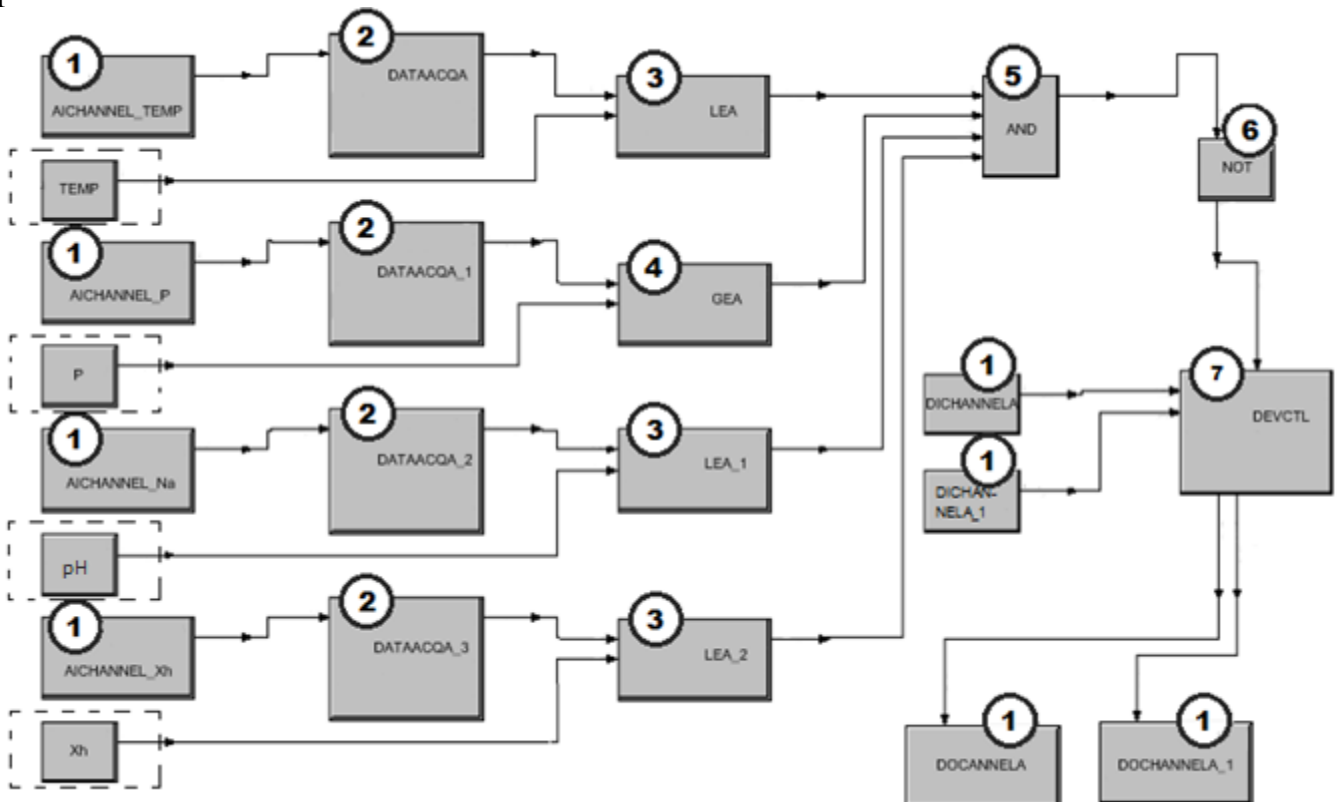


Рисунок 6 – Структура система керування БЗУ другого контуру енергоблоку

Запропонована стратегія включає наступні функціональні блоки: зчитування (AICHANNEL, DICHANNEL) та запису (DOCHANNEL) даних (1); збору й обробки даних (DATAACQ) (2); логічних операцій (AND, GE, LE і NOT) (3-6) і керування пристроєм (DEVCTL) (7). Модулі керування секційною арматурами та арматурами подачі конденсату до ФЗД мають аналогічні структуру й принцип роботи.

Дана система надає можливість запобігти руйнуванню іонітів, продовжити термін служби іонообмінних смол, зменшити час роботи БЗУ на зношених іонітах та уникнути винесення іонів солей у робоче середовище другого контуру.

Верифікація розробленої системи керування проводилась шляхом порівняння отриманих відгуків розробленого модуля з даними експлуатації АЕС. Результати тестування системи (табл. 6) відповідають установленим нормам та свідчать про те, що вона адекватно реагує на зміну вхідних параметрів та може бути використана для керування процесом знесолення турбінного конденсату.

Таблиця 6

Результати тестування розробленої системи керування

№	P, МПа	T, °C	pH, одиниць	χ_n , мкС/см	Відгук стратегії керування
1	0,2	40	8,3	0,4	показники в нормі
2	0,23	39	7,9	0,45	блокування
3	0,26	47	8,2	0,6	блокування
4	0,19	46	8,5	0,48	блокування
5	0,21	42	9,0	0,44	показники в нормі
6	0,2	44	9,1	0,47	показники в нормі
7	0,22	41	9,3	0,52	блокування
8	0,27	48	9,5	0,54	блокування

Примітка. Сірим кольором виділені значення параметрів, що виходять за межі допустимих показників роботи установки.

Розроблена система передбачає можливість інтеграції з інформаційно-обчислювальними мережами (ІОМ) АЕС. Інтеграція може здійснюватися через шлюз ІОМ або за допомогою сервера OPC. Схема зв'язку системи керування з ІОМ представлена на рис. 7.

Створена інтелектуальна система керування, структура якої представлена на рисунку 6, дозволяє отримати параметри стану БЗУ, що вимірюються відповідними приладами, такі як: концентрація іонів натрію в конденсаті за КЕН-1; концентрація гідразину в живильній воді ПГ; концентрація іонів феруму (C_{Fe}) в конденсаті за КЕН-1; температура проби конденсату за КЕН-1; концентрація іонів хлору (C_{Cl}) в продувній воді сольового відсіку ПГ; концентрація іонів сульфату (C_{SO4}) у продувній воді сольового відсіку ПГ. На основі цих даних система керування розраховує показники роботи БЗУ, що не вимірюються за допомогою системи автоматичного хімічного контролю на виробництві, такі як водневий показник та питома електропровідність після БЗУ. Ці показники є важливими в процесі прийняття рішення щодо керування станом ФЗД.

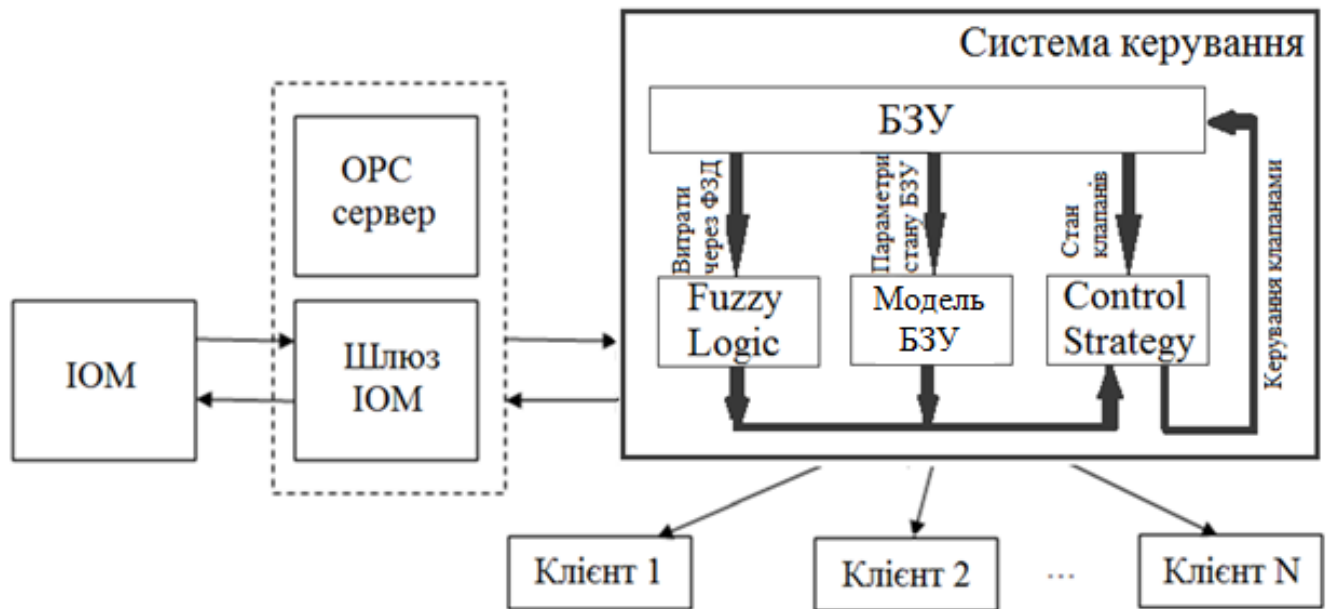


Рисунок 7 – Схема зв'язку системи з ІОМ енергоблоку

Також система керування за нечітким алгоритмом на основі витрат через кожен ФЗД визначає стан відповідних фільтрів, тобто виведення відпрацювавших фільтрів на регенерацію та введення до роботи нових відгенерованих фільтрів.

За керування запорною арматурою, на основі отриманих даних щодо станів фільтрів та розрахованих параметрів роботи БЗУ, відповідає сукупність модулів керування, що дозволяють у конкретний момент часу вивести відповідні фільтри на регенерацію та ввести до роботи необхідну кількість паралельно працюючих фільтрів, що забезпечують належну якість робочого середовища конденсатно-живильного тракту другого контуру АЕС.

Клієнтами системи керування виступають робочі станції операторів.

Отже, завдяки впровадженню розробленої інтелектуальної системи керування БЗУ зменшується частка ручних операцій, підвищується надійність роботи енергоблоку за рахунок зменшення помилок персоналу, підвищується економічність і якість роботи за рахунок автоматично контрольованих технологічних режимів, знижується кількість стоків енергоблоку.

Сумарна економія по енергоблоку складе 22 млн. грн. за рахунок заощадження хімреагентів на регенерацію, води живлення, води на власні потреби БЗУ, вартості іонообмінних матеріалів та ін.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача створення системи керування БЗУ другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000, що забезпечує підвищення ефективності процесу знесолення турбінного конденсату.

Основні наукові висновки і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Дослідження особливостей процесу знесолення турбінного конденсату у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000 виявило, що БЗУ впливає на безпеку функціонування атомних станцій, тому що є основним обладнанням, яке відповідає за якість робочого середовища другого контуру, що, у свою чергу, впливає на цілісність технологічного обладнання. Тому дослідження було спрямовано на підвищення надійності функціонування енергоблоку.

2. Аналіз напрямків автоматизації контролю та керування ВХР другого контуру показав, що відсутність систем автоматизованого керування процесом знесолення турбінного конденсату на АЕС призводить до нераціонального використання хімреагентів, збільшення води живлення та об'ємів рідких відходів енергоблоку, а також до підвищення ризику виникнення аварійних режимів роботи обладнання. З урахуванням цього встановлено необхідність розробки системи автоматизованого керування БЗУ з метою підвищення ефективності процесу видалення іоногенних домішок із робочого середовища другого контуру енергоблоку.

3. Розроблені регресійні моделі БЗУ надають можливість розрахувати значення водневого показника та питомої електропровідності турбінного конденсату, що впливають на управлінські рішення при керуванні об'єктом, у будь-який проміжок часу та визначити момент зміни режиму роботи фільтрів, на відміну від існуючих моделей, що призначені лише для відображення динаміки концентрацій іонів солей за висотою фільтруючого матеріалу, що є недостатнім для вирішення поставлених задач дослідження. Значення коефіцієнту детермінації складає 0,7245 і 0,7231 та коефіцієнту кореляційного відношення 0,82 та 0,82 для кожної моделі відповідно, що відповідає адекватності розроблених математичних залежностей.

4. Розроблена система нечіткого керування станом іонітних фільтрів БЗУ дозволяє встановити необхідну кількість паралельно працюючих ланцюгів фільтрів, які входять до складу БЗУ. Адекватність системи встановлено на основі порівняння нечітких рішень із еталонною вибіркою, що співпали на 100 %.

5. Комплексні стратегії керування БЗУ другого контуру енергоблоку АЕС реалізовані з використанням програмного забезпечення Control Builder розподіленої системи керування Exregion PKS дозволяють автоматизувати процес відправки ланцюгів фільтрів на регенерацію та включення їх до роботи після відновлення, шляхом управління пристроями з дискретним інтерфейсом. Адекватність розроблених стратегій керування встановлена шляхом порівняння отриманих відгуків розроблених модулів керування з даними експлуатації АЕС.

6. Створена інтелектуальна система керування дозволяє: розрахувати показники роботи БЗУ, що не вимірюються за допомогою системи автоматичного хімічного контролю на виробництві; за нечітким алгоритмом на основі витрат через кожен ФЗД вивести виснажені фільтри на регенерацію та ввести до роботи відновлені фільтри; на основі отриманих даних щодо станів фільтрів та розрахованих параметрів роботи БЗУ, з використанням сукупності модулів керування, керувати запорною арматурою для підключення необхідної кількості паралельно працюючих фільтрів. Впровадження розробленої системи керування БЗУ дозволить зменшити частку ручних операцій, підвищити надійність роботи

енергоблоку за рахунок зменшення помилок персоналу, підвищити економічність і якість роботи за рахунок автоматично контрольованих технологічних режимів, знизити кількість стоків енергоблоку.

7. Дослідження ефективності впровадження розробленої системи керування БЗУ шляхом аналізу проведених на виробництві випробувань показали, що зношування фільтруючого матеріалу може бути зменшена на 10 %, витрати на заміну сорбентів при цьому скоротяться на 50 %. Кількість стоків енергоблоку може бути знижена на 20 %, що дозволить зменшити об'єм води живлення. Визначено, що впровадження розробленої інтелектуальної системи керування дозволить уникнути пошкоджень обладнання другого контуру, в результаті чого сумарна економія витрат на енергоблок складе 22 млн. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Программно-технический комплекс для управления водно-химическим режимом второго контура АЭС [Текст] / Р.Б. Медведев, О.В. Сангинова, А.А. Евтушенко, С.Л. Мердух // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. - №2/10 (44). – С. 33 – 36 (*Особистий внесок: розглянуто особливості водно-хімічного режиму другого контуру енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000 та розроблено алгоритм функціонування системи керування водопідготовчими установками*) – Індексується та реферується наукометричними базами Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus.

2. Застосування методів теорії ігор для пошуку оптимальних стратегій керування водно-хімічним режимом другого контуру АЕС з реакторами типу ВВЕР [Текст] / Р.Б. Медведев, С.В. Брановицька, О.В. Сангинова, С.Л. Мердух // Енергетика та електрифікація. – № 9 (325). 2010. – С. 8 – 12. (*Особистий внесок: застосовано нечіткі підходи для пошуку оптимальних стратегій керування водно-хімічним режимом другого контуру АЕС із ВВЕР-1000 у невизначених умовах*).

3. Медведев, Р.Б. Комп'ютерне моделювання системи знесолення турбінного конденсату АЕС із реактором ВВЕР-1000 [Текст] / Р.Б. Медведев, О.В. Сангинова, С.Л. Мердух // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Компьютерное моделирование в химии, технологиях и системах развития. – 2012. - № 2/14 (56). – С. 34 – 37 (*Особистий внесок: розроблено математичну модель системи знесолення турбінного конденсату АЕС із реактором ВВЕР-1000*) – Індексується та реферується наукометричними базами Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus.

4. Мердух, С.Л. Пакет прикладних програм для розрахунку безперервних та дискретних моделей динамічних процесів у контурах керування [Текст] / С.Л. Мердух, Р.Б. Медведев // Науковий журнал «Проблеми програмування». – 2012. - №4. – С. 105-115 (*Особистий внесок: розроблено програмний модуль для отримання лінеаризованих моделей стану об'єкту керування*).

5. Медведев, Р.Б. Особливості водно-хімічного режиму та математичного моделювання другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 / Р.Б. Медведев, С.Л. Мердух // Науково-технічний журнал «Наукові вісті». – 2013. - №3. – С. 132-139 (*Особистий внесок: розроблено математичну модель блочно-знесолюючої установки другого контуру АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000*) – Видання

входить до баз даних EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, Ulrich's Periodicals Directory, BASE.

6. Медведєв, Р.Б. Прикладна теорія керування із використанням обладнання компанії Honeywell / Р.Б. Медведєв, О.В. Сангінова, С.Л. Мердух, П.Д. Головащенко // Збірник наукових статей Четвертої міжнар. наук.-практ. конф. «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2014». – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. - С. 271-277 (*Особистий внесок: розглянуто архітектуру розподіленої системи керування із використанням обладнання компанії Honeywell*).

7. Бондаренко, С.Г. Контур управління температурним режимом об'єкта на базі мікропроцесорної техніки / С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова, С.Л. Мердух, П.Д. Головащенко // Збірник наукових статей Четвертої міжнар. наук.-практ. конф. «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2014». – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. - С. 264-270 (*Особистий внесок: розроблено стратегію керування температурним режимом блочної знесолюючої установки другого контуру АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000*).

8. Сангінова, О.В. Розроблення алгоритмів діагностування стану водно-хімічного режиму другого контуру атомних електростанцій / О.В. Сангінова, Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2015. - №1/3 (21). – Том 1. – С. 37-41 (*Особистий внесок: розроблено алгоритм діагностування стану БЗУ другого контуру атомних електростанцій*) – Індексуються та реферується наукометричними базами Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus.

9. Мердух, С.Л. Комп'ютерне моделювання електропровідності у другому контурі АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 [Текст] / С.Л. Мердух, О.В. Сангінова // Тези доп. міжнар. наук.–практ. конф. «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток». – Київ: НТУУ «КПІ», 2010 – С. 69 – 70 (*Особистий внесок: розроблено математичну модель електропровідності у другому контурі АЕС з реактором типу ВВЕР-1000*).

10. Сангінова, О.В. Комп'ютерна підтримка водно-хімічного режиму второго контура атомной электростанции [Текст] / О.В. Сангінова, С.Л. Мердух // Сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23». – Саратов. - Т. 4. Секция 4, Саратов, 2010. – С. 81 – 82 (*Особистий внесок: розроблено програмний модуль для визначення оптимальної стратегії керування БЗУ другого контуру атомних електростанцій*).

11. Медведєв, Р.Б. Оптимальное управление водно-химическим режимом второго контура АЭС в условиях неопределенности [Текст] / Р.Б. Медведєв, О.В. Сангінова, С.Л. Мердух // Сб. трудов XXIV Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24». – Киев: Национ. техн. ун-т Украины «КПИ», 2011. – С. 63 – 65. – (Секция 6 «Автоматизация технологических процессов и производств») (*Особистий внесок: формалізовано алгоритм керування БЗУ другого контуру АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000*).

12. Мердух, С.Л. Оптимальне розподілення навантажень між паралельними фільтрами АЕС [Текст] / С.Л. Мердух // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»: матеріали науково-практичної конференції «Наукові підсумки 2012 р.». – 2012. – № 6/4(8). – С. 15 – 16. (Том 4 «Системи та процеси управління.

Інформаційні технології. Транспортні технології») (*Особистий внесок: розроблено алгоритм розподілення навантажень між паралельними фільтрами АЕС*) – *Індексується та реферується наукометричними базами Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus.*

13. Медведєв, Р.Б. Анализ процесса обессоливания турбинного конденсата как объекта управления [Текст] / Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Сб. трудов VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Химия и современные технологии". – 2013. – Том 3. – С. 21 – 22 (*Особистий внесок: проведено аналіз процесу знесолення турбінного конденсату з точки зору керування*).

14. Мердух, С.Л. Ідентифікація математичної моделі блочної знесолюючої установки АЕС / С.Л. Мердух // Сб. праць VI Міжнародної науково-технічної конференції трудов VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Химия и современные технологии". – 2013. – Том 3. – С. 62 – 63 (*Особистий внесок: проведено структурну та параметричну ідентифікацію математичної моделі блочної знесолюючої установки другого контуру АЕС*).

15. Медведєв, Р.Б. Постановка задачи управления блочной обессоливающей установкой атомной электростанции с ВВЭР-1000 [Текст] / Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26». – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 60 (*Особистий внесок: сформульовано задачу керування БЗУ другого контуру АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000*).

16. Медведєв, Р.Б. Система керування температурним режимом блочної знесолюючої установки АЕС [Текст] / Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Компьютерное моделирование в химии, технологиях и системах развития. – 2013. - № 2/4 (64). – С. 42 – 45 (*Особистий внесок: розроблено систему керування температурним режимом блочної знесолюючої установки другого контуру АЕС*) – *Індексується та реферується наукометричними базами Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus.*

17. Медведєв, Р.Б. Нечітке керування витратами іонітних фільтрів системи знесолення другого контуру енергоблоку АЕС [Текст] / Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Матеріали Першої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2014). – Київ, НТУУ «КПІ», 2014. – С. 74-75 (*Особистий внесок: розроблено нечітку модель керування витратами іонітних фільтрів системи знесолення другого контуру енергоблоку АЕС*).

18. Медведєв, Р.Б. Керування блочно-знесолюючою установкою у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000 [Текст] / Р.Б. Медведєв, С.Л. Мердух // Матеріали 21-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2014». – 2014. – С. 286 – 287 (*Особистий внесок: розроблено систему керування блочно-знесолюючою установкою у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000*).

19. Бондаренко, С.Г. Комп'ютерно-мікропроцесорна навчальна система розробки стратегій керування [Текст] / С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова, С.Л. Мердух, П.В. Козлов // Матеріали 21-ї Міжнародної конференції з автоматичного

управління «Автоматика-2014». – 2014. – С. 318 – 319 (*Особистий внесок: розглянуто систему розробки комплексних стратегій керування на базі мікропроцесорної техніки*).

АНОТАЦІЯ

Мердух С.Л. Керування блочно-знесолюючою установкою у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності процесу знесолення турбінного конденсату шляхом створення системи керування БЗУ другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 на базі розподіленої системи керування, реалізації нечіткого регулювання для розподілення навантажень між фільтрами та розробки стратегій керування процесом знесолення турбінного конденсату.

Досліджено особливості процесу знесолення турбінного конденсату у другому контурі АЕС із ВВЕР-1000. Проведено аналіз даних експлуатації БЗУ АЕС та досліджено вплив керувань на процес знесолення турбінного конденсату. Реалізовано регресійні залежності, що описують роботу БЗУ із використанням даних експлуатації АЕС. Розроблено нечіткий алгоритм керування паралельно працюючими фільтрами БЗУ та стратегії керування процесом знесолення турбінного конденсату другого контуру АЕС на базі розподіленої системи керування. Створено систему керування процесом знесолення турбінного конденсату.

Ключові слова: атомна електростанція, водо-водяний енергетичний реактор, водно-хімічний режим, система керування, блочна знесолююча установка.

АННОТАЦИЯ

Мердух С.Л. Управление блочно-обессоливающей установкой во втором контуре АЭС с ВВЭР-1000. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена актуальной научно-практической задаче создания системы управления БОУ второго контура АЭС с реактором типа ВВЭР-1000, что обеспечивает повышение эффективности процесса обессоливания турбинного конденсата.

Проведено исследование особенностей процесса обессоливания турбинного конденсата во втором контуре АЭС с ВВЭР-1000, в результате которого выявлено, что БОУ относится к системам важных с точки зрения влияния на безопасность функционирования атомных станций, так как является основным оборудованием, которое отвечает за качество рабочей среды второго контура, которое, в свою

очередь, влияет на целостность технологического оборудования, особенно парогенераторов, которые граничат с радиационным контуром.

Рассмотрены модели ионного обмена и обоснованно необходимость разработки новых адекватных математических зависимостей вследствие невозможности использования существующих на данное время алгоритмов с целью управления выбранным объектом исследования.

Проанализированы эксплуатационные данные БОУ АЭС и проведено исследование влияния управляющих действий на процесс обессоливания турбинного конденсата.

В результате идентификации БОУ было выделено два основных выходных параметра важных с точки зрения управления, таких как удельная электропроводность и водородный показатель и созданы соответствующие регрессионные зависимости, которые позволяют рассчитывать и отображать состояние параметров фильтров в разные моменты времени. Коэффициент детерминации составил 0,7245 и 0,7231 и коэффициент корреляционного отношения 0,82 единицы для каждой модели соответственно, что свидетельствует об адекватности полученных математических зависимостей.

Разработан алгоритм управления включением в работу необходимого количества фильтров смешанного действия БОУ с использованием нечеткой логики, которая обеспечивает заданные расходы воды на блок фильтров с их номинальной нагрузкой.

Разработана система нечеткого управления состоянием ионитных фильтров БОУ, что позволяет установить необходимое количество параллельно работающих цепочек фильтров, которые входят в состав БОУ, при определенных показателях качества конденсата турбинной установки. Адекватность системы было установлено на основании сравнения нечетких решений с эталонной выборкой, которые совпали на 100 %.

Разработаны комплексные стратегии управления процессом обессоливания турбинного конденсата второго контура АЭС с ВВЭР-1000 на базе распределенной системы и проведено их интеграцию с реализованными нечеткими алгоритмами управления и разработанной математической моделью БОУ средствами программного пакета Matlab с использованием технологии OPC, что позволило наладить эффективную систему интеллектуального принятия решений относительно определения состояния ФСД БОУ АЭС с ректором типа ВВЭР-1000.

Исследована эффективность внедрения разработанной системы управления БЗУ путем анализа проведенных на производстве испытаний. В результате чего было установлено, что изнашивание фильтрующего материала уменьшится на 10 %, затраты на замену сорбентов, соответственно, сокращаются на 50 %. Количество стоков энергоблока может быть уменьшена на 20 %, что позволит также уменьшить объем питательной воды. Установлено, что созданная система поддержки принятия решений позволит избежать повреждений оборудования второго контура, в результате чего суммарная экономия по энергоблоку составит 22 млн. грн., а также продолжит срок эксплуатации ПГ, замена которого будет составлять 5,5 млн. долл.

Ключевые слова: атомная электростанция, водо-водяной энергетический реактор, водно-химический режим, система управления, блочная обессоливающая установка.

ABSTRACT

Svitlana Merdukh. Control of condensate purification plant of the second circuit of the NPP with PWR-1000. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by specialty 05.13.07 – control processes automation National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2017.

Thesis is dedicated to increasing the efficiency of the turbine condensate demineralization process by creating a second circuit condensate purification plant control system for nuclear power plant with pressurised water reactor based on the distributed control system, the implementation of fuzzy control for the load distribution between the filters and the development of process control strategies demineralization of turbine condensate.

The features of the process of desalination of turbine condensate. Spend the operating data analysis of nuclear power plant condensate purification plant. The effect of the controls on the process of demineralization of turbine condensate. Implemented regression depending condensate purification plant. A fuzzy control algorithm operating in parallel condensate purification plant filters. Created strategy control process demineralization turbine condensate of the second nuclear power circuit based on a distributed control system. Created demineralization process control system of turbine condensate.

Keywords: nuclear power plant, pressurised water reactor, water chemistry, control system, condensate purification plant.