

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

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Медведєв Ромуальд Броніславович
кандидат технічних наук, професор

Київ – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ЗНЕСОЛЕННЯ ТУРБІННОГО КОНДЕНСАТУ АЕС ІЗ ВВЕР-1000 ЯК ОБ’ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	14
1.1 Особливості водно-хімічного режиму другого контуру АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000.....	14
1.1.1 Технологічні особливості енергоблоку з реактором типу ВВЕР-1000..	14
1.1.2 БЗУ, як засіб підтримки водно-хімічного режиму другого контуру реакторної установки ВВЕР-1000.....	18
1.2 Технологія обробки води та сутність процесу іонного обміну.....	21
1.2.1 Основи технології обробки води методом іонного обміну.....	22
1.2.2 Застосування іонного обміну у промисловості.....	25
1.3 Система очистки турбінного конденсату на АЕС із реактором типу ВВЕР-1000.....	28
1.3.1 Процес іонного обміну в іонітних установках.....	28
1.3.2 Технологія очищення турбінного конденсату АЕС із ВВЕР-1000.....	33
1.3.3 Опис основного обладнання БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР-1000...	35
1.3.4 Органи управління системи знесолення турбінного конденсату.....	41
1.3.5 Експлуатація БЗУ енергоблоку із реактором типу ВВЕР-1000.....	44
1.4 Постановка задачі дослідження.....	47
1.4.1 Обґрунтування методу рішення задачі.....	48
РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ЗНЕСОЛЕННЯ ТУРБІННОГО КОНДЕНСАТУ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ АЕС.....	52
2.1 Ідентифікація БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР- 1000.....	55

2.2 Кореляційний аналіз даних експлуатації БЗУ	57
2.2.1 Дослідження відносно змінної питомої електропровідності.....	59
2.2.2 Дослідження відносно змінної водневого показника.....	63
2.3 Побудова математичних залежностей із використанням регресійного аналізу.....	64
2.3.1 Побудова регресійних залежностей питомої електропровідності.....	64
2.3.2 Побудова регресійних залежностей водневого показника.....	67
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ БЗУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ТИПУ ВВЕР-1000.....	70
3.1 Розроблення нечіткої системи керування розподілом навантажень між фільтрами БЗУ другого контуру АЕС із ВВЕР-1000.....	70
3.1.1 Фазифікація вхідних сигналів БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР-1000...	71
3.1.2 Формування бази правил нечіткої моделі.....	74
3.1.3 Алгоритм функціонування механізму дефазифікації.....	76
3.1.4 Реалізація нечіткого алгоритму керування у середовищі MatLab.....	77
3.1.4.1 Розроблення нечіткої системи керування засобами системи Fuzzy Logic Toolbox.....	77
3.1.4.2 Моделювання нечіткої системи керування у середовищі Simulink...	81
РОЗДІЛ 4 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТАНОМ ФЗД БЗУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ТИПУ ВВЕР-1000.....	84
4.1 Розроблення та реалізація комплексних стратегій керування процесом знесолення турбінного конденсату АЕС із ВВЕР-1000.....	85
4.1.1 Побудова та верифікація модуля керування температурним режимом роботи БЗУ другого контуру АЕС.....	87
4.1.2 Розроблення системи блокувань БЗУ другого контуру АЕС.....	92
4.2 Об'єднання стратегії керування із математичною моделлю БЗУ другого контуру ВВЕР-1000.....	97
4.3 Верифікація комплексної стратегії керування процесом знесолення турбінного конденсату АЕС із ВВЕР-1000.....	100

4.4 Інтегрування системи керування БЗУ із АСУ ТП енергоблоку АЕС.....	105
4.5 Економічний ефект запропонованої системи керування БЗУ.....	108
ВИСНОВКИ.....	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	114
ДОДАТКИ.....	129
Додаток А. Основні позначення та характеристики паровідборів.....	129
Додаток Б. Конструкція та основні технічні характеристики основного обладнання БЗУ.....	131
Додаток В. Результати пасивного експерименту.....	134
Додаток Г. Порівняння розрахованих та експериментальних даних роботи БЗУ.....	142
Додаток Д. Обсяг та характеристика контрольованих параметрів системи знесолення турбінного конденсату.....	150
Додаток Е. Кореляційний аналіз факторів та побудова математичних залежностей у STATISTICA.....	153
Додаток Ж. Набір продукційних правил роботи фільтрів	177
Додаток З. Акт про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи.....	181
Додаток К. Акт проведення випробувань результатів дисертаційної роботи у виробничий процес ВП «Хмельницька АЕС».....	182

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

COM –	Component Object Model (об'єктна модель компонентів)
IOM –	інформаційно-обчислювальна мережа
OLE –	Object Linking and Embedding (технологія зв'язування та впровадження об'єктів у інші об'єкти)
OPC –	OLE Process Control (технологія зв'язування та впровадження об'єктів у інші об'єкти для управління процесом)
PKS –	Process Knowledge Builder (система знань про процес)
АЕС –	атомна електростанція
АСУ ТП –	автоматизована система управління технологічним процесом
АХК –	автоматизований хімічний контроль
БЗУ –	блочна знесолювальна установка (блочно-знесолювальна установка)
ВВЕР-1000 –	водо-водяний енергетичний реактор із номінальною електричною потужністю 1000 МВт
ВПУ –	водопідготовча установка
ВХР –	водно-хімічний режим
ЕМФ –	електромагнітний фільтр
К –	конденсатор
КЕН –	конденсатний електронасос
МЩУ –	місцевий щит управління
ПВТ –	підігрівачі високого тиску
ПГ –	парогенератор
ПК –	персональний комп'ютер
ПНТ –	підігрівачі низького тиску
ПТК –	програмно-технічний комплекс
ПЛК –	програмований логічний контролер
СВО –	спецводоочистка

ФЗД –	фільтр змішаної дії
ФР –	фільтр-регенератор
ХВО –	хімводоочистка

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із найважливіших факторів, що мають значний вплив на надійність, економічність та безпечність функціонування АЕС, є водно-хімічний режим (ВХР). Під ВХР електростанцій розуміють комплекс заходів, які передбачають очистку робочого середовища від солей та механічних домішок і видалення корозійно-активних газів та подальше повернення конденсату до парогенератору (ПГ) у якості живильної води [1].

ВХР другого контуру енергоблоку забезпечує мінімізацію корозійних процесів й процесів утворення відкладень у водопаровому тракті та основному обладнанні другого контуру АЕС [2].

Найбільш вразливим устаткуванням другого контуру є ПГ, у якому, внаслідок випарювання води, відбувається концентрування іоногенних домішок, що надходять із водою живлення. Корозійний стан теплообмінних трубок ПГ залежить від кількісного та якісного складу відкладень на них. Найбільш радикальним із існуючих на даний час методів запобігання корозійного зношування трубок ПГ являється проведення періодичних хімічних промивок зі сторони другого контуру [3]. Однак хімічні промивки призводять до утворення значних об'ємів рідких відходів, що важко піддаються переробленню.

Отже, на даний час актуальною залишається проблема створення та підтримки таких фізико-хімічних властивостей теплоносіїв, які б все ж таки запобігали корозійним пошкодженням конструкційних матеріалів обладнання та утворенню відкладень на його поверхнях.

В Україні та за кордоном проводиться велика кількість робіт по дослідженню корозійних процесів різних конструкційних матеріалів АЕС [4-10]. У результаті встановлені показники якості теплоносіїв та робочих середовищ АЕС, дотримання яких є ефективним захистом від корозії обладнання другого контуру реактора [11].

Проте із кожним роком встановлені норми стають більш жорсткими, задля поліпшення показників якості робочого середовища та, як наслідок, збільшення терміну роботи технологічного устаткування [12-13], що на даний час для Українських АЕС складає 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 енергоблоку є перспективними напрямками розвитку наукових досліджень.

У даній роботі розглянуті особливості ведення ВХР АЕС України із реакторами типу ВВЕР-1000. В результаті аналізу основних напрямків автоматизації контролю та керування ВХР [14] другого контуру було виявлено, що одним із найважливіших засобів підтримки ВХР другого контуру є блочна знесолювальна установка (БЗУ). Проте на жодній електростанції України робота БЗУ не автоматизована. Тобто розподілення витрат між фільтрами, виведення фільтрів на регенерацію, розпушення та ін. здійснюється оператором вручну [15-17], що призводить до збільшення витрат хімреагентів, води живлення та 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 Experion 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 Experion 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 моделі та системи керування блочно-знесолювальною 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 полягає у наступному:

— 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;

— 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;

— вперше розроблено стратегії керування БЗУ другого контуру енергоблоку АЕС з використанням програмного забезпечення Control Builder розподіленої системи керування Experion PKS, які автоматизують процес

відправки ланцюгів фільтрів на регенерацію та включення їх у роботу після відновлення, шляхом керування пристроями з дискретним інтерфейсом;

— 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 задач щодо вдосконалення роботи водоочисного обладнання АЕС, зокрема блочної знесолювальної установки.

Розроблені регресійні моделі іонітних фільтрів, на відміну від існуючих, надають можливість розраховувати й відображати стан параметрів фільтру у ході процесу, важливих з точки зору керування, знаючи фізичні параметри потоку та склад 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 є більш оперативними та, як наслідок, 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 та регресійними моделями процесу знесолення, 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 та була передана для дослідної експлуатації на площадці ВП «Хмельницька АЕС».

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. Автор самостійно сформулював мету, задачі дослідження, наукові положення і результати, виконав теоретичну і практичну частини роботи, приймав безпосередню участь у проведенні автономних та промислових випробувань. В роботах написаних у співавторстві, особисто автором розроблені математична модель іонітних фільтрів змішаної дії, стратегії керування, структура та алгоритми роботи системи управління, нечіткі моделі процесу керування системою знесолення турбінного конденсату.

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 виносяться 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.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ЗНЕСОЛЕННЯ ТУРБІННОГО КОНДЕНСАТУ АЕС ІЗ ВВЕР-1000 ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

1.1 Особливості водно-хімічного режиму другого контуру атомних електростанцій з реакторами типу ВВЕР-1000

1.1.1 Технологічні особливості енергоблоку з реактором типу ВВЕР-1000

Безпека та екологічність роботи реактора забезпечуються жорстким виконанням регламенту – спеціальних правил експлуатації й великою кількістю контрольного устаткування, що призначено для ефективного керування реактором.

Атомні електростанції з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР) продемонстрували за майже п'ятдесятилітню історію експлуатації свою безпеку, надійність і конкурентоспроможність на енергетичному ринку, забезпечили стійкість ядерної енергетики й можливість її подальшого розвитку [18].


Енергоблоки з реакторами ВВЕР-1000 мають прийнятний з погляду сучасних понять рівень безпеки [19-23]. У конструкцію реакторних установок, конфігурацію й склад устаткування систем безпеки, паливний цикл, технології й системи обігу з радіоактивними відходами, експлуатаційні регламенти вносяться вдосконалення, які дозволяють атомним станціям задовольняти вимогам по безпеці та показникам економічності, що постійно підвищуються. Закладені в проекти АЕС із ВВЕР-1000 рішення, тривалий досвід їх безаварійної роботи, удосконалення конструкцій, дослідження з ядерного палива й теплофізиці процесів дозволили ухвалити рішення щодо можливості експлуатації даного типу енергоблоків на підвищеному до 104% рівні потужності.

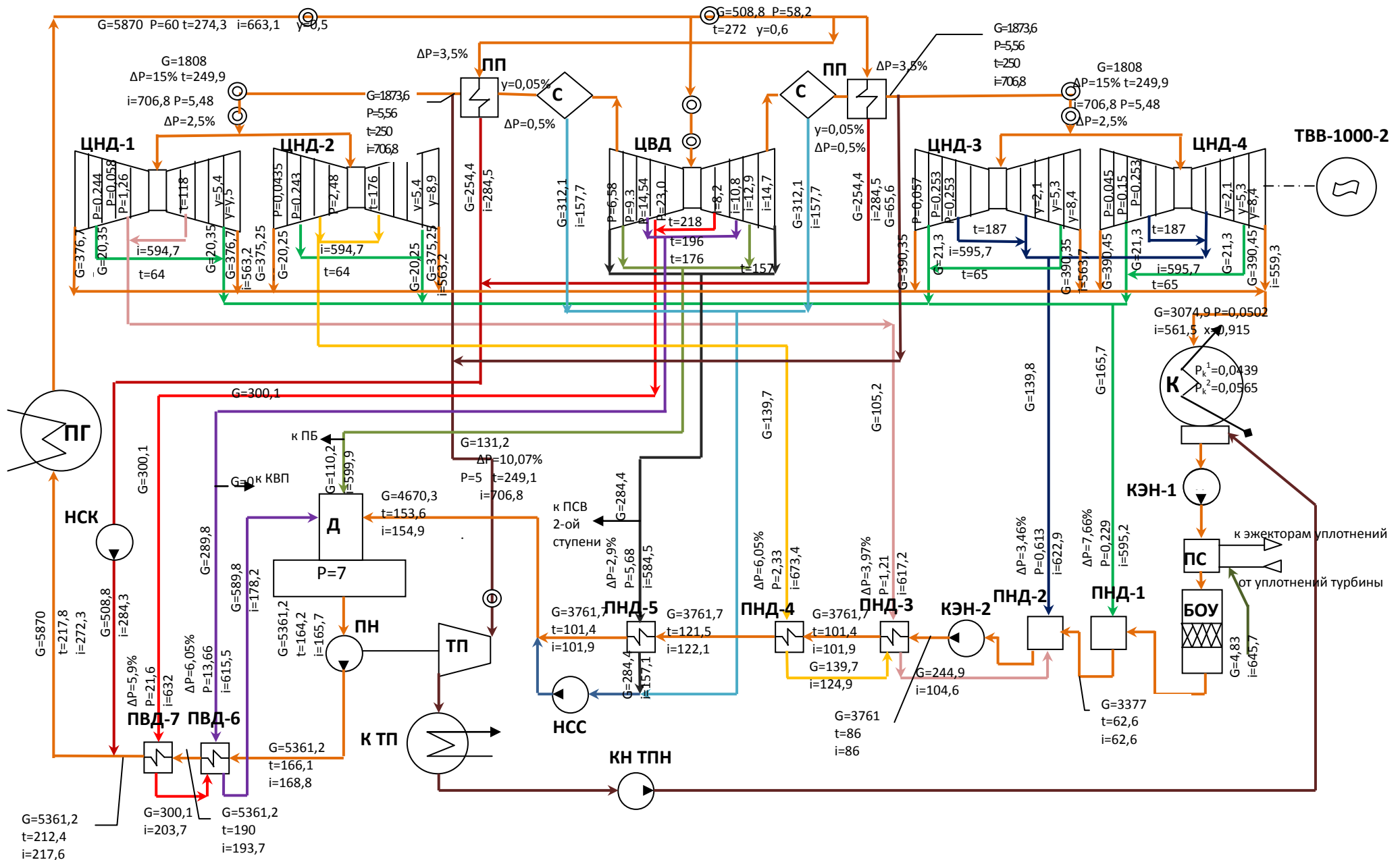
Технологічна схема енергоблоку з реактором ВВЕР-1000 має два контури [25]. Перший контур є радіоактивним. Він містить у собі реактор типу ВВЕР і циркуляційні петлі охолодження. Кожна петля містить головний циркуляційний насос (ГЦН), парогенератор і дві головні запірні засувки (ГЗЗ). До однієї із циркуляційних 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.

Даний контур установки призначений для відводу 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.

Другий контур – нерадіоактивний. Він містить у собі парогенератори, паропроводи, парові турбіни, сепаратори-пароперегрівники, живильні насоси й трубопроводи, деаератори й регенеративні підігрівники. Парогенератор є загальним устаткуванням для першого та другого контурів. У ньому теплова енергія, вироблена в реакторі, від першого контуру через теплообмінні трубки передається другому контуру.

Принципова технологічна схема другого контуру реактора ВВЕР-1000 представлена на рисунку 1.1. Основні позначення та характеристики паровідборів наведено у Додатку А (табл. А.1). Основний потік пари й конденсату позначений на рисунку 1.1 як .



ПГ – парогенератор; Турбіна: СПП – сепаратор-пароперегрівник; ЦВД – циліндри високого тиску; ЦНТ – циліндри низького тиску. ТВВ- 1000-2 – генератор струму. Конденратно-живильний тракт: К – конденсатор; ПС-340 – спеціальний вакуумний охолоджувач; БЗУ – блочна знесолююча установка; ПНТ-1÷2 – підігрівники низького тиску змішуючого типу; ПНТ-3÷5 – підігрівники низького тиску поверхневого типу; Д – деаератор; ПВД-6÷7 – підігрівники високого тиску; КВП - колектор власних потреб. Насоси: КЕН-1 – конденсатний насос I ступеня; КЕН-2 – конденсатний насос II ступеня; НСС – насос відкачки; НСК – конденсатний гідротурбінний насос. Система живильної води: ЖН – живильний насос; ТП -приводна турбіна; К ТП – конденсатор приводної турбіни

Рисунок 1.1 – Принципова технологічна схема другого контуру енергоблоку із реактором типу ВВЕР-1000

Гарячий теплоносієй першого контуру поступає в парогенератор (ПГ), де віддає тепло воді другого контуру. Потім головним циркуляційним насосом подається назад в реактор. Одночасно частина теплоносія з першого контуру постійно подається на установку спецводоочистки (СВО). До складу СВО-1 входять механічні фільтри, до складу СВО-2 – іонообмінні. Далі теплоносієй 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 блочну 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 очищається, поступає в конденсатор. Для поповнення робочого середовища організовано підживлення очищеною водою до $0,005 \text{ мкг/дм}^3$. Разом із цим підживленням у воду другого контуру поступають домішки різних солей, у тому числі і такі, які можуть утворювати накип на стінках устаткування.

У системі охолодження конденсаторів турбін на АЕС використовуються баштові градирні й водоймище-охолоджувач [25].

Обладнання АЕС працює за високих теплових навантажень, тому велика увага в цій галузі приділяється якості води – її схильності до утворення відкладань і корозійної активності. Тому забезпечення високої якості водних теплоносіїв АЕС є найважливішим завданням. Використання води належної якості спрощує також вирішення задач одержання чистої пари, мінімізації швидкостей корозії конструкційних матеріалів котлів, турбін та устаткування конденсатно-живильного тракту [26-29]. Якість

обробки води на АЕС тісно пов'язане з надійністю й економічністю їх роботи.

1.1.2 БЗУ, як засіб підтримки водно-хімічного режиму другого контуру реакторної установки ВВЕР-1000

Необхідною умовою безпечної експлуатації енергоблоків АЕС є організація водно-хімічного режиму (ВХР) другого контуру з метою забезпечення мінімальної кількості відкладень на теплообмінній поверхні ПГ, в проточній частині турбін та в конденсатно-живильному тракті; запобігання корозійним і корозійно-ерозійним пошкодженням конструкційних матеріалів ПГ, устаткування і трубопроводів другого контуру; мінімально досяжний об'єм викидів з концентрацією домішок, які містяться в них, що не перевищує гранично допустимі концентрації для водоймищ [30-32].

Для АЕС із ВВЕР-1000 узагальнюючим показником ефективності ведення ВХР другого контуру слугують щільність парогенераторів та кількість заглушених теплообмінних трубок [33]. Основною причиною ушкодження теплообмінних трубок є процес корозійного розтріскування під напругою у результаті впливу розтягувальних напруг і концентрованих розчинів корозійно-активних домішок, що утворюються внаслідок глибокого розпарювання котлової води у відкладеннях на теплообмінних поверхнях. Активаторами корозії є хлор-іони та органічні кислоти. У якості каталізаторів корозії виступають мідь, її з'єднання й кисень [34].

Вода дренажів і надходжень, як правило, недеаерована, насичена корозійно-активними газами й має солевміст значно вище основного потоку конденсату, зважаючи на велику розгалуженість другого контуру АЕС та наявність великої кількості різних за витратами й солевмістом дренажів і надходжень у конденсатор.

Найбільш чистим із усіх надходжень є додаткова вода хімводоочистки (ХВО), нормована за витратою та якістю, що несе в собі значну частку органічних сполук, які проникають у тракт парогенератора, піддаються окисненню й термічному розкладанню з утворенням органічних кислот, котрі викликають серйозні корозійні ушкодження металу енергетичного устаткування [35].

З метою попередження корозії металу та відкладень на теплообмінній поверхні енергетичного обладнання другого контуру передбачається ряд заходів, таких як: хімводоочистка; системи конденсації і деаерації; система очистки турбінного конденсату; система продувки та система очистки продувної води парогенераторів; система дозування реагентів для корекційної обробки [36].

Для зменшення корозійних процесів у тракт вводяться різні коригувальні добавки.

У світовій практиці в другому контурі застосовуються наступні коригувальні ВХР: гідразино-аміачний (низькокутові та висококутові), літієвий, морфоліновий і етаноламіновий. Назва режиму взаємозв'язана із назвою реагенту, що дозується.

Вибір добавки, що вводиться для збільшення рН, залежить від матеріалів енергетичного устаткування. Величина рН визначається наявністю сплавів, що містять мідь у конденсатно-живильному тракті. Для оптимальної корекції рН значна частина закордонних та українських АЕС із ВВЕР (PWR) перейшли на використання органічних амінів (морфолін або моноетаноламін). Вказані органічні аміни мають меншу летючість у порівнянні з аміаком, більша їхня частина у двофазних системах «пар-вода» перебуває у воді. Відповідно органічні аміни дозволяють одержати більш високі рН та, значить, забезпечити високий захист трубопроводів, підігрівників й іншого устаткування, що стикається з вологою парою, де можлива корозія [37-38].

Незважаючи на значні переваги останніх двох режимів у зниженні корозійних процесів у парогенеруючому устаткуванні, електростанції зазнають великих труднощів у випадку необхідності очищення всього потоку конденсату.

У період роботи енергоблоку, у конденсатний тракт другого контуру, відбувається потрапляння розчинних і нерозчинних домішок, колоїдно-дисперсних і механічних речовин та домішок із присосами охолоджувальної води із циркуляційної системи охолодження конденсатора турбіни, а також із продуктами корозії устаткування. Підсмоктування охолоджувальної води в конденсаторах обумовлений тим, що тиск охолоджувальної циркуляційної води суттєво більше тиску в конденсаторі, вода проникає в конденсатор через нещільності у вальцювальних з'єднаннях трубок із трубними дошками й через корозійні ушкодження самих трубок.

Величина гранично допустимого присосу охолоджувальної води в конденсаторах турбіни повинна визначатись із урахуванням реальної якості охолоджувальної води [33].

Велика кількість цих домішок осаджується на поверхнях теплообмінного обладнання, особливо на горизонтальних ділянках тракту, внаслідок чого, відбувається зниження потужності й економічності роботи енергоблоку, через погіршення теплообмінних процесів в устаткуванні. Під відкладеннями відбувається процес прискорення корозії конструкційних матеріалів.

Засоби й методи підтримки ВХР другого контуру передбачають різні заходи, як для зменшення присосів у конденсаторах, так і для вилучення їх із циклу.

З урахуванням вище сказаного, для продовження терміну служби, надійної, безаварійної й економічної роботи устаткування, а також для забезпечення експлуатації в проектних режимах, перед обладнанням регенеративного підігріву води, здійснюється 100 % очищення конденсату на

спеціально призначений для цього установці – блочній знесолювальній установці (БЗУ).

На сьогодні деякі АЕС України застосовують практику ведення морфолінового режиму без включення конденсатоочистки [39].

Проте, відмова від використання конденсатоочистки при веденні морфолінового режиму реально можлива при заміні існуючих конденсаторів турбін на конденсатори нового покоління й зниженні надходження в тракт корозійно-активних газів, органічних кислот, розчинних солей.

Разом з тим на деяких АЕС застосовується, так званий, «економний» режим експлуатації конденсатоочистки, із включенням у роботу БЗУ тільки при зафіксованому збільшенні питомої електропровідності конденсату [40].

Однак, організація ВХР із дозуванням морфоліну з практикою відключення БЗУ на блоках з нещільними конденсаторами захищає від корозії конденсатно-живильний тракт на шкоду більш відповідальному устаткуванню – парогенератору.

Багаторічний досвід експлуатації закордонних АЕС із ВВЕР показав, що 100 %-а конденсатоочистка є необхідною для всіх видів охолоджувальної води.

Отже, основу ВХР становлять норми якості робочого середовища. Тому, для продовження терміну служби, надійної, безаварійної та економічної роботи устаткування, а також для забезпечення експлуатації в проектних режимах, нормативом передбачені засоби й методи підтримки ВХР другого контуру. Одним із найважливіших засобів підтримки ВХР другого контуру є БЗУ.

1.2 Технологія обробки води та сутність процесу іонного обміну

При обробці води на електростанціях застосовується ряд технологічних водопідготовчих установок (ВПУ), на яких використовуються різні фізико-

хімічні процеси, такі як: осадження, коагуляція, фільтрація, пом'якшення, іонний обмін, та їх комбінації [41].

Іонне знесолення на даний момент є найпоширенішим та надійним методом видалення із води домішок, що перебувають в істинно розчиненому стані [42]. Цьому сприяють такі переваги методу: висока продуктивність, забезпечення глибокого очищення води практично від будь-яких іоногенних сполук, просте апаратурне оформлення процесу, невелика металоємність, висока надійність очищення при змінних навантаженнях, незначні витрати води на власні потреби та ін.

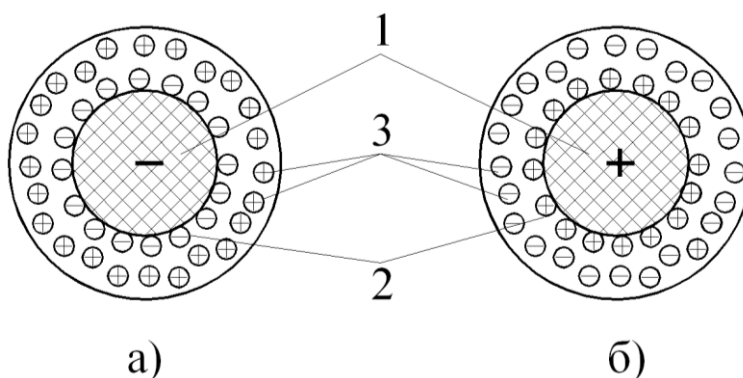
1.2.1 Основи технології обробки води методом іонного обміну

Обробка води методом іонного обміну базується на здатності деяких практично нерозчинних в воді речовин, які називають іонообмінними матеріалами або іонітами, змінювати в бажаному напрямку іонний склад води. Для цього вода пропускається через фільтри, завантажені іонітами. При просочуванні між зернами іоніту, оброблювана вода обмінює частину розчинених у ній електролітів на рівне число іонів іоніту, в результаті чого змінюється іонний склад як води, що фільтрується, так і самого іоніту [43].

Якщо в результаті обробки води відбувається обмін катіонів, то такий процес називається катіонуванням, якщо при цьому відбувається обмін аніонів, то такий процес називається аніонуванням. Тривалість роботи циклу іонітних фільтрів визначається обмінною ємністю аніоніту, тобто здатністю його до іонного обміну. Після використання обмінної ємності іоніту до заданої межі (виснаження іоніту) необхідно відновлення його обмінної ємності (регенерація) шляхом видалення затриманих ним з оброблюваної води іонів і введення замість них іонів, які знову будуть затримувати іони з води. Таким чином, відновлення виснаженого іоніту є процесом іонного обміну, який проводиться в зворотному порядку.

В якості іонітів використовуються сульфовугілля і синтетичні смоли [44-46]. Відмінною особливістю цих смол є розміри і структура їх молекул, що складаються з тисяч міцно зв'язаних атомів. Іоніти являють собою сферичні зерна від жовтуватого до коричневого кольору, розміром 0,3-2,0 мм.

Здатність іонітів до іонного обміну пояснюється їх специфічною структурою, яка складається з твердої нерозчинної у воді молекулярної сітки – матриці, до окремих місць якої на поверхні і всередині її маси приєднані активні функціональні групи атомів іоніту (рис. 1.2).



а – катіоніт; б – аніоніт; 1 – матриця (твердий багатоатомний каркас іоніту); 2 – потенціалоутворюючі іони (пов'язані з каркасом не рухливі іони активних груп); 3 – іони дифузійного шару (обмежено рухливі іони активних груп, здатні до обміну)

Рисунок 1.2 – Схема структури молекули іоніту

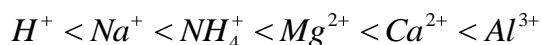
Ці групи мають в своєму складі рухливі позитивно або негативно заряджені іони [47]. Іоніти, які мають групи з позитивним зарядом називаються катіонітами, а групи з негативним зарядом – аніонітами. У воді іоніт дисоціює за такою схемою:

де – катіоніт, в якому рухливим обмінним катіоном є , а нерухомим аніоном – високомолекулярна частина ; – аніоніт, в якому рухливим обмінним аніоном є , а нерухомим аніоном – високомолекулярна частина ; – умовний знак, який вказує на здатність

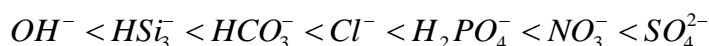
твердого електроліту до дисоціації у воді без видимого розчинення самого електроліту.

За своєю активністю, здатності вступати в обмін з іонітом, іони, що містяться у воді, розташовані в порядку убування:

– для катіонів сильнокислотному електроліті:

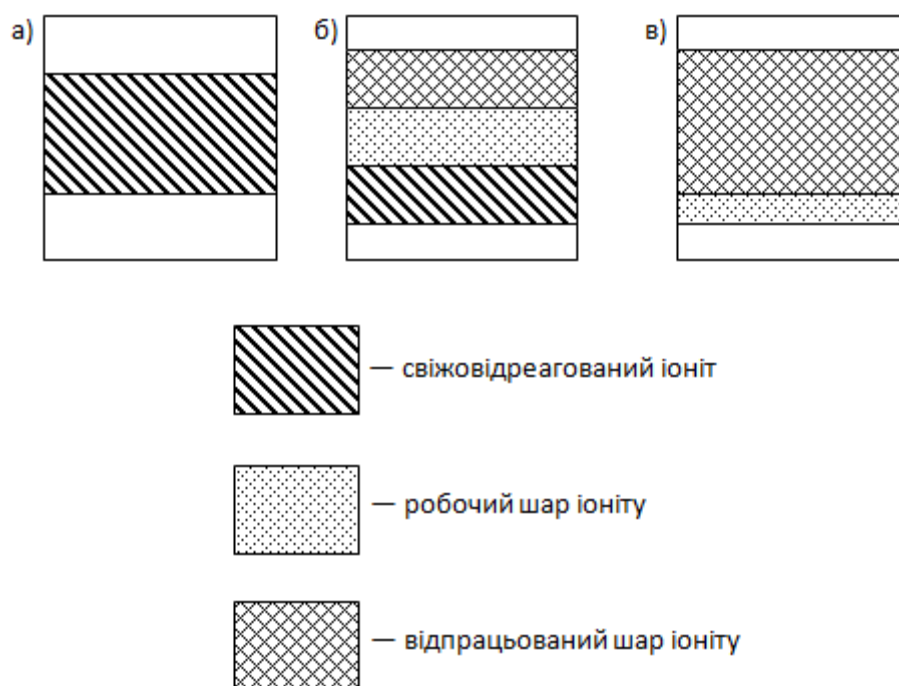


– для аніонів сильноосновному електроліті:



Це так звані ряди селективності (тобто вибірковості). Кожний наступний іон здатен витіснити попередній, наприклад іон NH_4^{+} буде витіснити іон Na^{+} ; іон Cl^{-} – іон HSi_3^{-} . При наявності надлишку попередніх іонів можлива оборотна реакція.

При роботі фільтрів вода, що проходить крізь шар іоніту, контактує по висоті з новими об'ємами іоніту [48]. Природно, що найбільша сорбція (поглинання) іонів буде спочатку спостерігатися в верхніх шарах іоніту. Але з часом іоніт в цій частині шару буде виснажуватися і процес сорбції переміститься нижче по шару, тобто концентрація іонів, що видаляються, буде падати по висоті шару. Шар іоніту можна розділити на три ділянки (рис. 1.3): відпрацьована, працююча і така, що ще не працювала.



а – початок роботи; б – через деякий період; в – кінець роботи

Рисунок 1.3 – Умовне зображення процесу сорбції (поглинання) іонів під час роботи фільтра

На границі між першою і другою ділянками розташована зона вихідної концентрації іонів, а на границі між другою і третьою – зона їх нульової концентрації. В певний момент часу зона нульової концентрації досягає нижньої границі шару і відбувається проскакування іонів. Це зазвичай служить сигналом для відключення фільтра на регенерацію [49].

Практичне використання іонування засноване на загальних принципах і реалізується в різних технологічних схемах обробки води [50].

В існуючих схемах БЗУ іоногенні домішки видаляються на фільтрах змішаного дії (ФЗД) з високими швидкостями фільтрування та тривалими робочими циклами.

1.2.2 Застосування іонного обміну у промисловості

Для забезпечення надійності, маневреності, гнучкості керування та автоматизації хімічного контролю технологічного процесу хімічного

знесолення води всі фільтри з'єднують у певній послідовності, що створює умови для незалежного виконання операцій: підготовки води, розпушення, регенерації, відмивання іоніту й ремонту кожного з них окремо та/або групами фільтрів [51].

У даний час на ВПУ застосовують дві схеми з'єднання фільтрів: паралельно-теційну («гребінка») та блочну («ланцюг») [33].

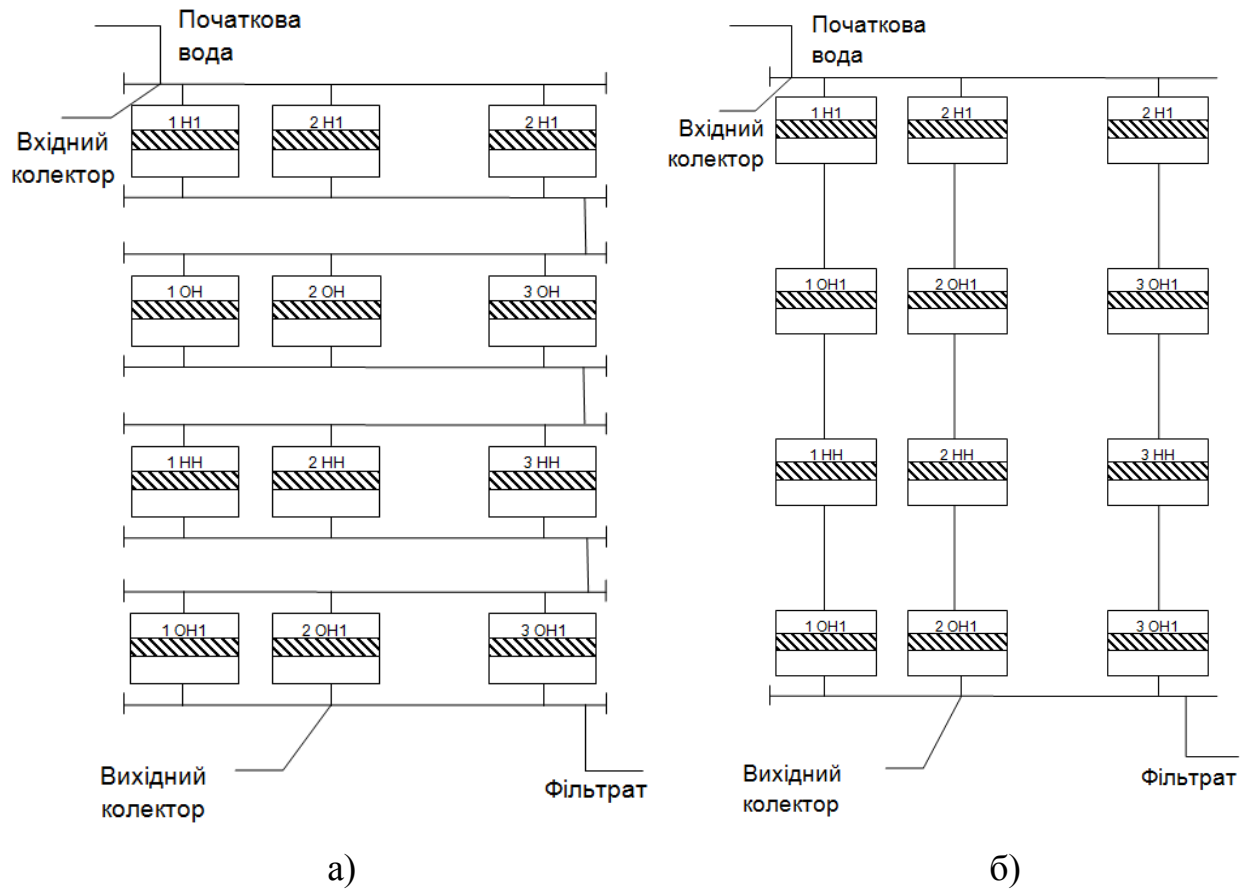
При паралельному з'єднанні фільтри однієї функціональної приналежності об'єднані розподілюючим та збірним колекторами (рис. 1.4-а), тобто вихідну воду подають до кожного однойменного фільтру із загального колектору, а фільтрат збирають після цих фільтрів в окремий колектор, що дозволяє виділяти окремий фільтр у заданий час на одну із операцій без порушення процесу підготовки води. При цьому кожен фільтр із функціонального ряду може мати індивідуальні характеристики (робочу обмінну ємність, висоту завантаження, час виходу на регенерацію).

Недоліком такої схеми є значна кількість збірних колекторів та трубопроводів.

У блочному з'єднанні між розподілюючим та збірним колекторами фільтри із різною функціональністю з'єднуються у блоки (рис. 1.4-б), які забезпечують весь робочий процес хімічного знесолення, що дозволяє без порушень безперебійного процесу підготовки води виводити на одну із операцій одразу весь блок фільтрів. У цьому випадку до складу кожного блоку включають по одному фільтру відповідного ступеня, з'єднаних послідовно. Робоча обмінна ємність та висота завантаження іонообмінних матеріалів у фільтрах всіх ступенів мають розраховуватись на однакову тривалість робочого циклу.

До недоліків блочної схеми відноситься збільшення кількості апаратів та іонітів, менший коефіцієнт використання іонітів. Разом із тим застосування блочної схеми дозволяє знизити капітальні витрати при спорудженні установки з очищення додаткової води і покращити експлуатаційні показники. Основною перевагою, що й визначило її повсюдне

впровадження, є зручність автоматизації та хімічного контролю. У відповідності з цим блочна схема вводиться у всі проекти сучасних ВПУ.



а – паралельна; б – блочна

Рисунок 1.4 – Схеми підключення фільтрів

Схема очистки води на іонітних фільтрах обирається в залежності від якості води після передочистки і вимог до якості обробленої води.

Наприклад на хімводоочистці працює п'ять «ланцюгів». Отримана після них вода називається глибоко знесоленою. Але показники її якості не відповідають нормам води, необхідної для поповнення втрат в контурах АЕС. Для досягнення необхідних норм і застосовують ФЗД. В них здійснюється процес сумісного Н- і ОН-іонування води шляхом її фільтрування через шар перемішаних зерен сильнокислотного катіоніту і сильноосновного аніоніту [52]. Таке змішане завантаження ФЗД допускає фільтрування води з підвищеними швидкостями (до 50-150 м/год.) при висоті шару 1,0-1,2 м.

Використання змішаного іоніту вимагає здійснення відносно складної технології їх регенерації, пов'язаної з необхідністю розділення змішаного завантаження перед пропуском регенераційних розчинів кислоти і лугу через катіоніт й аніоніт.

1.3 Система очистки турбінного конденсату другого контуру АЕС із ректором типу ВВЕР-1000

1.3.1 Процес іонного обміну в іонітних установках

Основним обладнанням іонітних установок є фільтри, баки, мірники, насоси і ежектори для приготування та подачі регенераційних розчинів, а також баки для відпрацьованої води, баки-нейтралізатори і ін. [53].

На АЕС України використовують іонітні фільтри з наступними ознаками: за обмінюваними іонами – катіонітні, аніонітні, фільтри змішаної дії; за фракційним складом – насипні та наливні; за способом проведення регенерації – паралельнотечійні; протитечійні; ступінчасто-протитечійні; за технологічним застосуванням – фільтри різних ступенів: перша, друга, третя [54].

При паралельнотечійному способі регенерації оброблювану воду і регенераційний розчин пропускають через фільтр в одному і тому ж напрямку, при протитечійному – у протилежних. Ступінчасто-протитечійний спосіб застосовують в схемах, що передбачають обробку води на фільтрах різних ступенів. Оброблювану воду пропускають послідовно через фільтри І і ІІ ступенів, регенераційний розчин – в зворотному напрямку; регенерацію іонітів ФЗД проводять після розділення іонообмінного завантаження на катіоніт і аніоніт.

Всі іонітні фільтри повинні бути захищені від корозії в кислому або іншому корозійно-агресивному середовищі шляхом нанесення захисних покриттів і виготовлення елементів і деталей з нержавіючої сталі і пластмаси

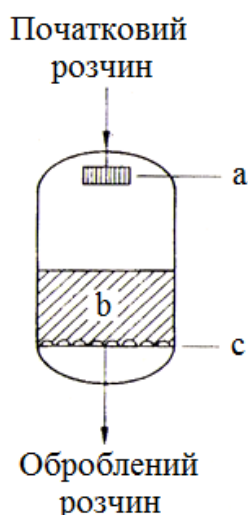
[55]. Простір над іонітним завантаженням в фільтрах називають повітряною подушкою. Її висота в катіонітних фільтрах повинна складати 50-70% шару іоніту, в аніонітних – не менше 100%, щоб уникнути виносу при розпушуванні мілкого і легкого (в набряклому стані) іоніту. Для відводу повітря вгорі фільтру є повітряник-труба.

Нижні днища іонітних фільтрів або заповнюють бетоном з розташуванням на ньому горизонтального дренажу, або (після нанесення захисних покриттів – гумування) в днище встановлюють не горизонтальний, а так званий «копіюючий» дренаж.

При експлуатації фільтрів спостерігається виніс фільтруючого матеріалу через дренажні системи і попадання його в наступні фільтри. З метою його уловлювання після фільтрів встановлюють так звані іонітні уловлювачі [56]. Конструктивно уловлювач представляє собою порожнистий полий циліндр, всередині якого встановлюють співвісний перфорований циліндр з намотаною на нього в 2-3 шари сіткою з різним розміром вічок.

Іонітні фільтри I та II ступенів, аніонітні і катіонітні, мають таку ж конструкцію і складаються з корпусу, верхнього і нижнього дренажно-розподільного пристрою, трубопроводів обв'язки, пристрою для відбору проб на хімічний аналіз (рис. 1.5).

Корпус фільтру представляє собою зварний циліндр з листової сталі, з привареними до нього верхнім і нижнім еліптичними днищами. Корпус фільтра оснащений двома люками, які призначені для завантаження і вивантаження фільтруючого матеріалу, внутрішніх оглядів і ремонтів. Верхній дренажно-розподільний пристрій (ВДРП) служить для подачі в фільтр і рівномірного розподілення за площею поперечного перерізу фільтра оброблюваної води і регенераційного розчину, а також для збору і відводу з фільтра розпушуючої води. ВДРП виконаний у вигляді павука: вертикальна труба-колектор, знизу заглушена, і радіально розташовані труби-промені з отворами вверху.



а – верхній розподілюючий пристрій, b – іоніт, c – нижня дренажна система

Рисунок 1.5 – Промисловий іонообмінний фільтр

Нижній дренажно-розподільний пристрій (НДРП) служить для збору і відводу обробленої води, регенераційного розчину і відмивної води, а також для подачі в фільтр і рівномірного розподілення за площею перерізу розпушуючої води. НДРП складається з вертикального колектору, до якого кріпиться горизонтальний колектор з трубками відводу, отвори в яких зверху прикриті жолобками зі щілинами або ковпачками для попередження виносу іоніту з обробленою водою. З тією ж метою в іонітні фільтри завантажуються підстилковий шар антрациту висотою 150 мм. Кожний фільтр має внутрішній хімічний захист від корозії.

Правильна і надійна експлуатація іонітних фільтрів досягається шляхом виконання ряду заходів, з яких найбільш важливими є: точне дотримання технологічних режимів; завантаження в фільтри достатньо крупного матеріалу; видалення дрібноти і бруду з поверхневих шарів іоніту; відсутність завису в воді, яка подається на фільтри; забезпечення рівномірного за площею фільтру підводу води і розчинів як знизу, так і зверху.

Експлуатація іонітних фільтрів зводиться до послідовного виконання наступних процесів: виснаження іоніту (робочий процес), розпушування,

регенерація та відмивання [57]. Головна задача при цьому – максимальне використання робочої обмінної ємності фільтрів при заданій якості хімічно обробленої води. Розглянемо ці операції трохи детальніше.

Оброблювана вода проходить через шар іоніту й виснажує його. Як тільки загальна кількість поглинених із води іонів досягає величини робочої ємності іоніту, так званої точки проскоку, та величина проскоку досягає конкретного значення, робочий процес зупиняється.

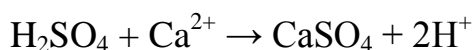
Після робочого процесу для підготовки до регенерації іоніт розпушується протягом 15 хв. зворотним потоком відмивної води, зібраної при попередній регенерації фільтрів. Інтенсивність розпушування повинна привести іоніт в завислий стан. Вона коливається в межах 2,8-3,0 л/(с·м²). Крім того, при цьому видаляються частки, затримані на поверхні шару, та дрібні фрагменти іоніту. По закінченню операції розпушування проводять регенерацію іоніту задля відновлення іонообмінної здатності відпрацьованого (виснаженого) електроліту.

Регенерація іонообмінних матеріалів у фільтрах після виснаження проводиться двома методами: прямотоком, коли регенераційний розчин у фільтр подається в тому ж напрямку, що й вихідна вода; протитечею, коли регенераційний розчин подається в напрямку, зворотному напрямку подачі вихідної води [33].

Регенерацію виконують шляхом пропуску регенераційного розчину із заданою концентрацією повільно, протягом 15...60 хв., через шар відпрацьованого та розпушеного іоніту. Для цього застосовують наступні розчини:

— при Na-катіонуванні – розчин хлористого натрію NaCl з концентрацією 5-8%;

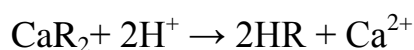
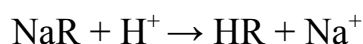
— при H-катіонуванні – розчин азотної кислоти 5% концентрації або розчин сірчаної кислоти H₂SO₄. В процесі регенерації сірчаною кислотою утворюється осад CaSO₄ – гіпс:



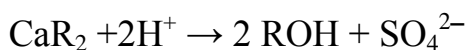
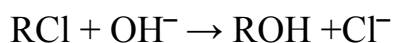
Загіпсування іоніту негативно впливає на роботу фільтру та якість оброблюваної води. Тому для попередження загіпсування регенерацію сірчаною кислотою проводять в два етапи: спочатку застосовують більш розбавлену сірчану кислоту (0,8-1,5%), а потім більш концентровану (3-4%) при швидкості подачі не менше 8 м/год.

— при ОН-аніонуванні – розчин їдкого натру NaOH з концентрацією 4%.

При регенерації відбувається заміна іонів, накопичених на зернах іоніту, на іони, що знаходяться в регенераційному розчині. Наприклад при регенерації кислотою відбувається обмін іонів Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} та інших на іон H^+ :



При регенерації лугом відбувається обмін іонів SO_4^{2-} , Cl^- , HSiO_3^- , HCO_3^- та ін. на іон OH^- :



Зазвичай кількість регенераційного розчину перевищує розрахункову в 3-3,5 рази. Це робиться з метою уникнення протиіонного ефекту, сутність якого полягає в тому, що обмінні реакції на іонітах є оборотними. В зв'язку з цим при регенерації можливий оборотний процес, наприклад: іони H^+ будуть з катіоніту витіснятися іонами Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , тобто процес регенерації втратить свій ефект. Щоб зсунути іонообмінний процес при регенерації в потрібний бік регенераційний розчин подають у надлишку. Для зниження витрат регенераційних розчинів застосовують ступінчасту регенерацію, тобто розчин послідовно проходить спочатку фільтр другого ступеня, а потім фільтр першого ступеня.

Після закінчення регенерації проводять відмивку іонітів. Операція промивки має за мету усунути ущільнення і тим самим забезпечити більш вільний доступ регенераційного розчину до зерен іоніту. Крім того, при

цьому відбувається видалення з фільтру дрібних частинок, що накопичуються в шарі іоніту, які утворюються внаслідок поступового руйнування іоніту в процесі експлуатації фільтру.

Об'єм регенераційного розчину, що залишився у фільтрі витісняється прозорою коагульованою водою. Перші її порції як найбільш «брудні» скидаються до дренажу, а решта – в баки-нейтралізатори. Ця вода після доведення її параметрів до потрібних повторно використовується для розпушення іонітів. Стадія витіснення, або повільного відмивання закінчується стадією швидкого відмивання, яке проходить при більш високій швидкості потоку й видаляє останні сліди регенераційного розчину. В процесі відмивання з іонів видаляються як продукти регенерації, так і регенеруючі агенти.

При зниженні концентрації регенераційного розчину у фільтраті до нормованого значення починається наступний цикл іонного обміну.

Зазвичай відмивання катіонітів проводиться до величини кислотності відмивної води на виході з фільтра $\leq 0,1$ мг-екв/дм³, а аніонітів відповідно – до величини хлоридів $\leq 0,05 \dots 0,1$ мг-екв/дм³.

Розглянемо нижче особливості застосування іонітних установок для очищення турбінного конденсату другого контуру АЕС із ВВЕР-1000.

1.3.2 Технологія очищення турбінного конденсату АЕС із ВВЕР-1000

Основними складовими живильної води є турбінний конденсат і конденсат гріючого пару регенеративних підігрівачів ПНТ та ПВТ. У процесі експлуатації можливе деяке забруднення конденсатів. Забруднення у вигляді розчинених солей і зависів різного ступеня дисперсності можуть надходити в результаті присосів охолоджуючої води через нещільності в конденсаторах турбін. Основну масу нерозчинних забруднень конденсату складають продукти корозії конструкційних матеріалів пароводяного тракту, в першу чергу оксиди заліза, міді і цинку. До основних розчинних забруднень

відносяться солі кальцію, магнію і натрію, силікатну і карбонову кислоти. Для видалення забруднень із турбінного конденсату застосовується конденсатоочистка. Схема її повинна забезпечувати 100% очистку конденсату. Очистка турбінного конденсату зводиться до двох стадій: очистка від грубодисперсних домішок та повне знесолення.

Від грубодисперсних домішок конденсат звільняється при фільтруванні на механічних фільтрах [58-59]. На АЕС України для цього застосовують електромагнітні фільтри (ЕМФ). Принцип роботи таких фільтрів заснований на магнітному способі очистки конденсату: в ньому оксиди заліза знаходяться головним чином у вигляді феромагнітних частинок Fe_3O_4 , Fe_2O_3 . Ці частинки, проходячи у фільтрі через магнітне поле, стають постійними магнітами, з'єднуються між собою, утворюючи укрупнені частинки, які затримуються кульковим металевим завантаженням.

Знесолення або очистка конденсату від розчинених забруднень здійснюється на другій стадії – в ФЗД. При цьому досягається практично повне їх видалення. Завантаження в ФЗД – сильнокислотний катіоніт КУ-2-8 ГОСТ 20298-74 та сильноосновний аніоніт АВ-17-8 ГОСТ 20301-74. Допускається застосування інших іонообмінних смол згідно СТП 0.08.049-2003. Регенерація смоли здійснюється у виносних фільтрах-регенераторах (ФР).

Система знесолення турбінного конденсату складається із трьох вузлів: блочної знесолювальної установки; регенераційної установки та вузла збору регенераційних та відмивних вод [60].

БЗУ призначена для видалення із конденсату турбіни продуктів корозії конструкційних матеріалів пароводяного тракту другого контуру внаслідок корозійних процесів в устаткуванні та видалення домішок у вигляді істинно-розчинних та колоїдно-дисперсних речовин, що надходять в основному із присосами охолоджувальної води циркуляційної системи через нещільності теплообмінного обладнання у конденсаторі турбіни.

БЗУ технологічно розташована в лінії конденсатного тракту між охолоджувачем пари ущільнень та ПНТ-1 (рис. 1.6).

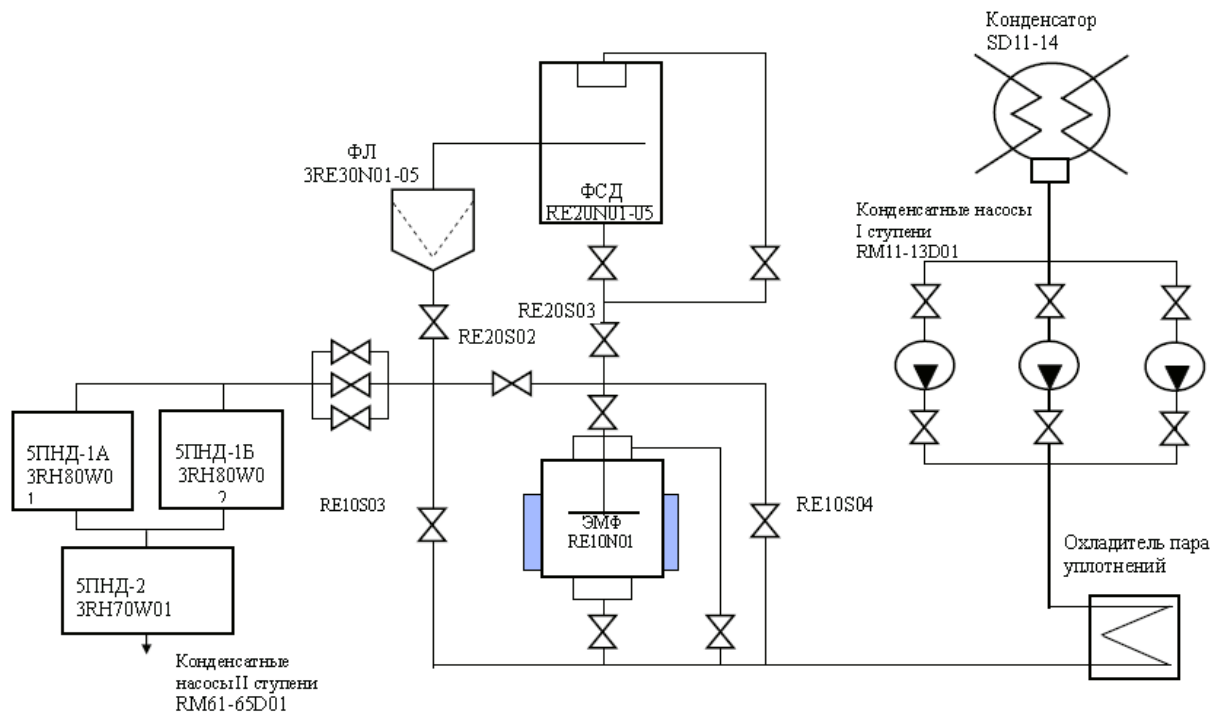


Рисунок 1.6 – Схема розташування БЗУ в складі другого контуру

За впливом на безпеку БЗУ відноситься до систем важливих для безпеки (СВБ) та за призначенням до систем нормальної експлуатації (СНЕ), згідно із класифікацією Загальних положень забезпечення безпеки атомних станцій (ЗПЗБ АС) [61].

1.3.3 Опис основного обладнання БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР-1000

Система знесолення турбінного конденсату призначена для знезалізнення та високошвидкісного глибокого знесолення турбінного конденсату.

Для забезпечення цих функцій до складу БЗУ входить наступне устаткування: один двопотоковий ЕМФ; п'ять двопотокових ФЗД із виносною регенерацією на регенераційній установці (РУ); п'ять фільтрів-уловлювачів (ФУ) зернистих матеріалів; трубопроводи обв'язки устаткування

із арматурами; МЩУ БЗУ, ЩАЖ (щит автоматики й живлення) ЕМФ із контрольно-вимірюючими засобами (КВЗ), пристроями керування, автоматикою, сигналізацією та блокуваннями.

Принципова технологічна схема БЗУ зображена на рисунку 1.7.

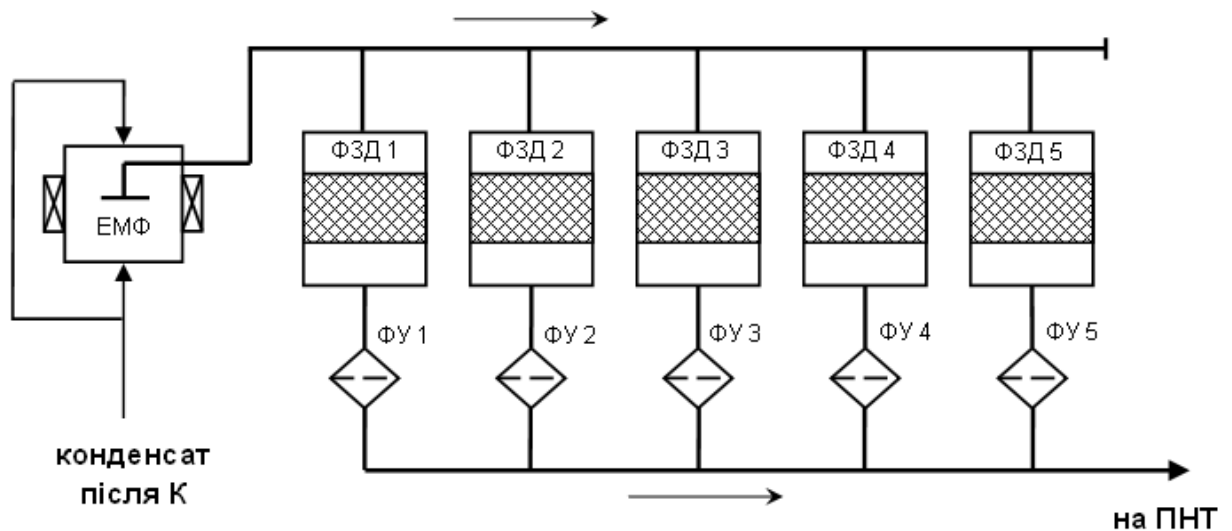


Рисунок 1.7 – Принципова технологічна схема БЗУ другого контуру енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000

Електромагнітний фільтр типу ЕМФ-3600 АЕМФ-1,6-1,6-2п продуктивністю 3600 м³/год. призначений для видалення з конденсату продуктів корозії, в основному окислів заліза з феромагнітними властивостями, які, проходячи через електромагнітне поле, наведенне котушкою, намагнічуються й затримуються кульковим завантаженням у місцях максимальної інтенсивності магнітного поля, якими є точки контакту кульок один з одним.

На ЕМФ затримуються магнітні окисли Fe_3O_4 , $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$. Значно слабше захоплюються немагнітні окисли $\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$. Поряд з окислами заліза ЕМФ уловлює окисли міді, цинку, хрому, нікелю. Немагнітні оксиди заліза, інших металів і неметалічні забруднення в більшій мірі адсорбуються магнітними оксидами заліза, що відклались.

При накладенні електромагнітного поля феромагнітні забруднення води переміщуються до магнітних полюсів кульок, де й відкладають. Окисли

заліза розташовуються між кульками у вигляді концентричних сфер (рис. 1.8).

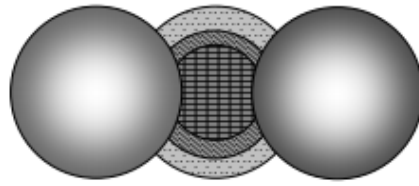


Рисунок 1.8 – Розташування окислів заліза між кульками в ЕМФ

Після заповнення міжкулькового простору феромагнітними частками проводиться їхнє видалення шляхом промивання кулькового завантаження при знеструмлених і розмагнічених електромагнітних котушках.

ЕМФ складається із корпусу фільтра, розподільних пристроїв усередині корпусу та двох електромагнітних котушок поза корпусом. Конструкція та основні технічні характеристики ЕМФ наведено у Додатку Б (рис. Б.1).

Корпус фільтра виготовлений з аустенітної (немагнітної) сталі 12Х18Н10Т із трьома патрубками $\varnothing 500$ мм для підведення та відводу конденсату і промивної води. У верхній частині є лаз $\varnothing 450$ мм для внутрішнього огляду і завантаження кульок. Два штуцери $\varnothing 80$ мм у нижньому днищі призначені для вивантаження кульок із фільтру.

Всередині ЕМФ розташовані нижні щілинні ґрати для підтримки кулькового завантаження та верхні щілинні ґрати для запобігання виносу кульок із фільтру при промиванні. Ґрати виконують роль НРП й ВРП, до яких зверху й знизу підводить конденсат на очищення.

ЕМФ завантажений кульками $\varnothing 4\text{--}8$ мм із чорної сталі марки ШХ-15. Вага завантаження – 21 тонна.

На середині висоти кулькового завантаження розташовано СРП, у якому верхній та нижній потоки конденсату сходяться й відводяться із ЕМФ.

СРП складається із чотирьох радіальних патрубків $\varnothing 370$ мм із щілинами 4 мм. Патрубки вварені у центральну трубу $\varnothing 500$ мм, яка відводить очищений конденсат із ЕМФ.

Грати ЕМФ так само як і СРП мають ширину щілин 4 мм і для запобігання проскакування кульок закриті сіткою із нержавіючої сталі з комірками 3,5x1 мм.

Зовні на ЕМФ одягнені дві електромагнітні котушки, які розташовуються одна над іншою по висоті фільтра, охоплюють усе кулькове завантаження й заживлені паралельно.

Всередині металевого кожуха під ЕМФ установлений вентилятор примусової подачі охолоджувального повітря в електромагнітні котушки.

Основна арматури має електричний привід та управляється автоматичним пристроєм, змонтованим у ША ЕМФ, і дистанційно з панелі цієї шафи.

Фільтр забезпечений двома повітряниками; дренажем $\varnothing 50$ мм, пробовідбірними точками із НРП, СРП, ВРП; витратомірами по верхньому підведенню основного конденсату та загальному потоку; перепадоміром; манометрами на вході й виході; системами електроживлення.

Фільтр іонітовий змішаного дії з виносною регенерацією типу АФИСДНр-2,6-1,6-2п номінальною продуктивністю 900 м³/год. призначений для швидкісного і глибокого знесолення турбінного конденсату та затримки зважених речовин (сполук заліза й міді), що проскочили через ЕМФ. Конструкція та основні технічні характеристики ФЗД наведено у Додатку Б (рис. Б.2).

Фільтр завантажений катіонітом та аніонітом у співвідношенні 2 : 1 = 9,5 м³ : 4,7 м³. ФЗД зі змішаним шаром катіоніту та аніоніту являє собою ніби систему численних, послідовно розташованих катіонітових і аніонітових фільтрів, що дає можливість одержання очищеного конденсату із дуже низькою питомою електропровідністю.

Катіоніт очищає конденсат від домішок катіонів, з них основні: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , NH^{4+} . Аніоніт очищає конденсат від домішок аніонів, з них основні: Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-} , HCO_3^{2-} , а також, частково, від з'єднань Fe, Cu та ін., що проскочили через ЕМФ механічних часток.

У процесі очищення конденсату відбувається виснаження обмінної ємності ФМ у ФЗД. У цьому випадку проводиться заміна ФМ на резервну, а виснажений ФМ направляється в регенераційну установку, завантажується у ФРК і ФРА для регенерації.

Корпус фільтра складається із циліндричної звареної обичайки із двома еліптичними штампованими днищами. Усередині корпусу фільтра розташовані: ВРП, НРП й фільтруючий елемент.

Корпус фільтра виготовлено зі сталі 12Х18Н10Т. Внутрішні розподільні пристрої виготовлено зі сталі 08Х18Н10Т. Для проведення робіт з ремонту внутрішніх пристроїв на корпусі фільтра передбачений лаз $\varnothing 500$ мм.

ВРП являє собою два співвісно розташованих перфорованих циліндра із заглушеними денцями типу «стакан в стакані». Внутрішній стакан ВРП має отвір $\varnothing 15$ мм, зовнішній – $\varnothing 20$ мм. ВРП слугує для рівномірного розподілу потоку основного конденсату по перетину фільтра.

Вварена в корпус фільтра сигнальна трубка з фільтруючим елементом служить для сигналізації моменту встановлення необхідного рівня води у фільтрі перед перемішуванням іонітів стисненим повітрям.

НРП «копіюючого» типу являє собою трубчасту систему, забезпечену жолобковими фільтруючими елементами (променями). Він складається з вертикального патрубку, привареного до нижнього днища фільтра, і чотирьох радіально розташованих колекторів, які копіюють профіль нижнього днища. В отвори колекторів під кутом 15° до горизонтальної площини вставляються розподільні труби (промені) з отворами на нижній утворючій, які покриваються двома паралельними жолобками із шириною щілини 0,25 мм. Ця система слугує для відводу очищеного конденсату, відмивної води та підведення стисненого повітря.

У верхній циліндричній частині корпусу фільтра розташований штуцер для гідрозавантаження, а в нижній частині – для гідровивантаження фільтруючого матеріалу через гусак. ФЗД обладнаний: пробовідбірними

точками із НРП після дренажної арматури та після відсічної арматури між ФЗД і ФУ; дифманометром, що вимірює різницю тисків ВРП/НРП; манометрами, що вимірюють тиск у ВРП й НРУ; повітряниками з корпусу фільтра й з верхньої точки трубопроводу підведення основного конденсату до ВРП; дренажем із НРП, витратоміром. Дренування ФЗД можна вести в БДВ, ФР, БВВ та в БВЦВ.

ФЗД обладнаний пробовідбірними точками, манометрами та повітряниками. Основна арматура фільтра має електричний привід і управляється ключами із МЩУ БЗУ, допоміжна – з ручним керуванням.

Фільтр-уловлювач типу АФУ–0,6–1,6 продуктивністю 900 м³/год., Ø600 мм призначений для вловлювання після ФЗД робочих фракцій іонітів з метою запобігання можливого їхнього виносу в конденсатно-живильний тракт при пошкодженні НРП ФЗД. Конструкція та основні технічні характеристики ФУ наведено у Додатку Б (рис. Б.3).

Фільтр-уловлювач зернистих матеріалів складається із трьох основних елементів: циліндричного корпусу, зйомного патрона, що фільтрує та зйомної кришки.

Корпус уловлювача являє собою трубу з вуглецевої сталі 20К Ø600 мм із звареними під кутом 90° вхідним та вихідним штуцерами Ø350 мм. На торці корпусу розміщена плоска зйомна кришка, через яку здійснюється вилучення фільтруючого патрона.

Фільтруючий патрон являє собою перфоровану трубу з нержавіючої сталі Ø350 мм із конусоподібним захищеним торцем з боку входу конденсату. До іншого кінця приварений фланець, який за допомогою шпильок кріпиться до внутрішнього фланця корпусу. З'єднувач ущільнюється гумовою манжетою, яка покриває торець фільтруючої сітки.

Зовнішня поверхня циліндричної частини патрона обвита нержавіючим дротом Ø3 мм із кроком 10 мм. Поверх набивки вдягається три шари сітки з нержавіючої сталі: опорна сітка з розміром комірок 2х5 мм та дві фільтруючі сітки з розміром комірок 0,25-0,4 мм, що затримують не тільки робочу

фракцію іонітів, але й дріб'язок. Сітки кріпляться до патрона хомутами з нержавіючої сталі та з торців ущільнені гумовими манжетами.

Корпус фільтра-уловлювача має штуцери для дренажу уловлювача та виводу повітря і оснащений манометрами, що вимірюють тиск на вході та виході ФУ і перепадоміром, що вимірює перепад тиску між входом і виходом ФУ. Для промивання уловлювача передбачене підведення промивної води зі скиданням по лінії гідроперевантаження іонітів у фільтр-регенератор.

1.3.4 Органи управління системи знесолення турбінного конденсату

На рисунку 1.9 представлена схема автоматизованого хімічного контролю (АХК) другого контуру енергоблоку АЕС [62].

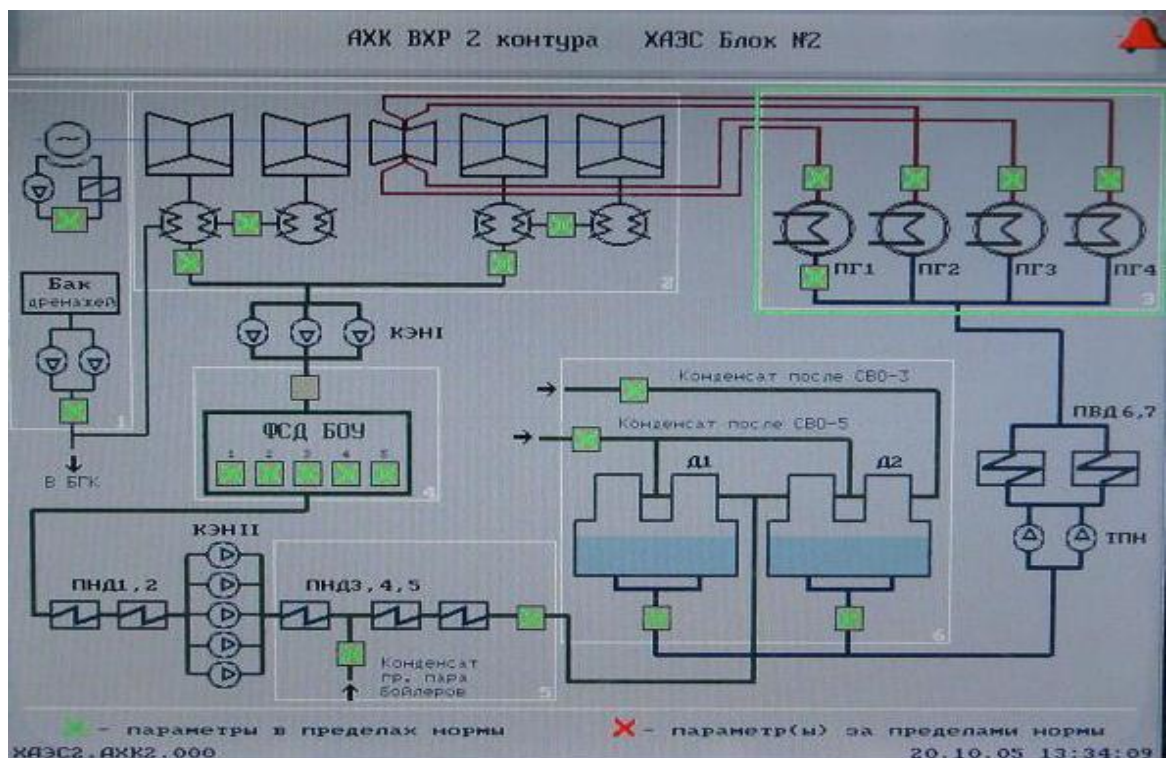


Рисунок 1.9 – Схема АХК другого контуру

Далі представлено відеокадри окремо АХК ФХД БЗУ та ПГ другого контуру (рис. 1.10-1.11).

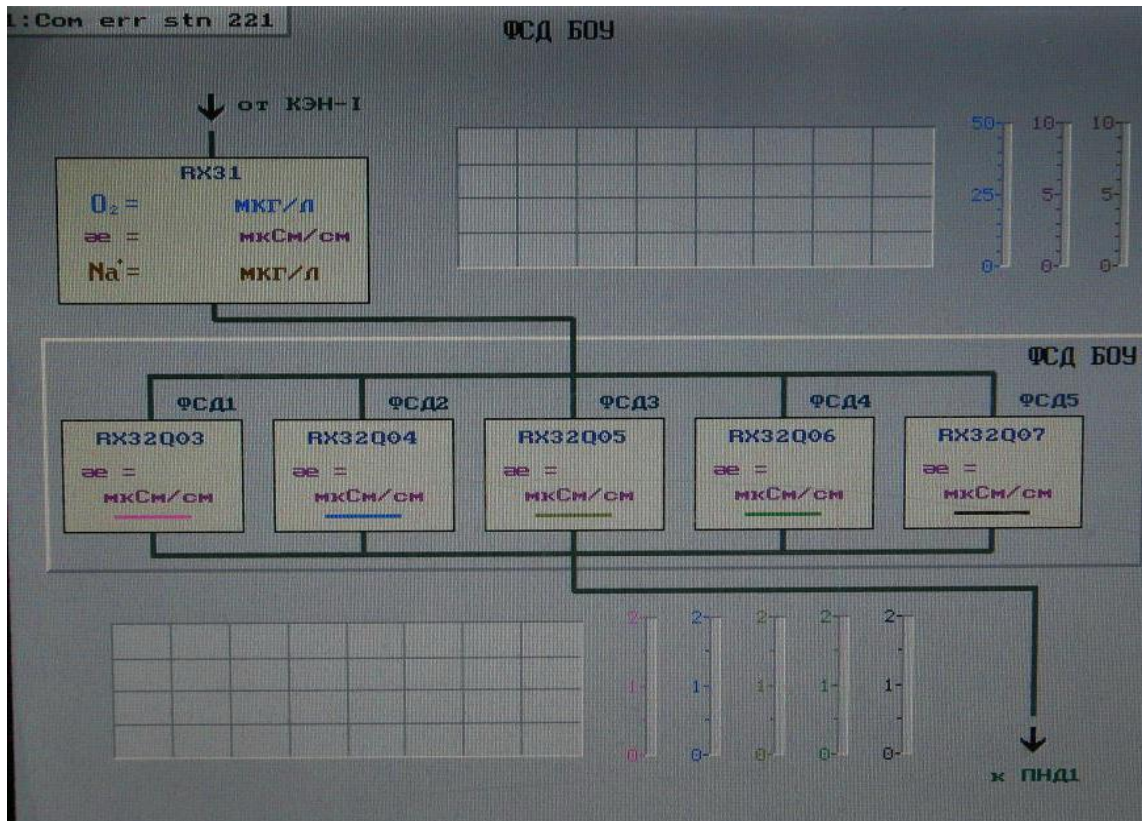


Рисунок 1.10 – Схема АХК КЕН 1 ступені та ФЗД БЗУ

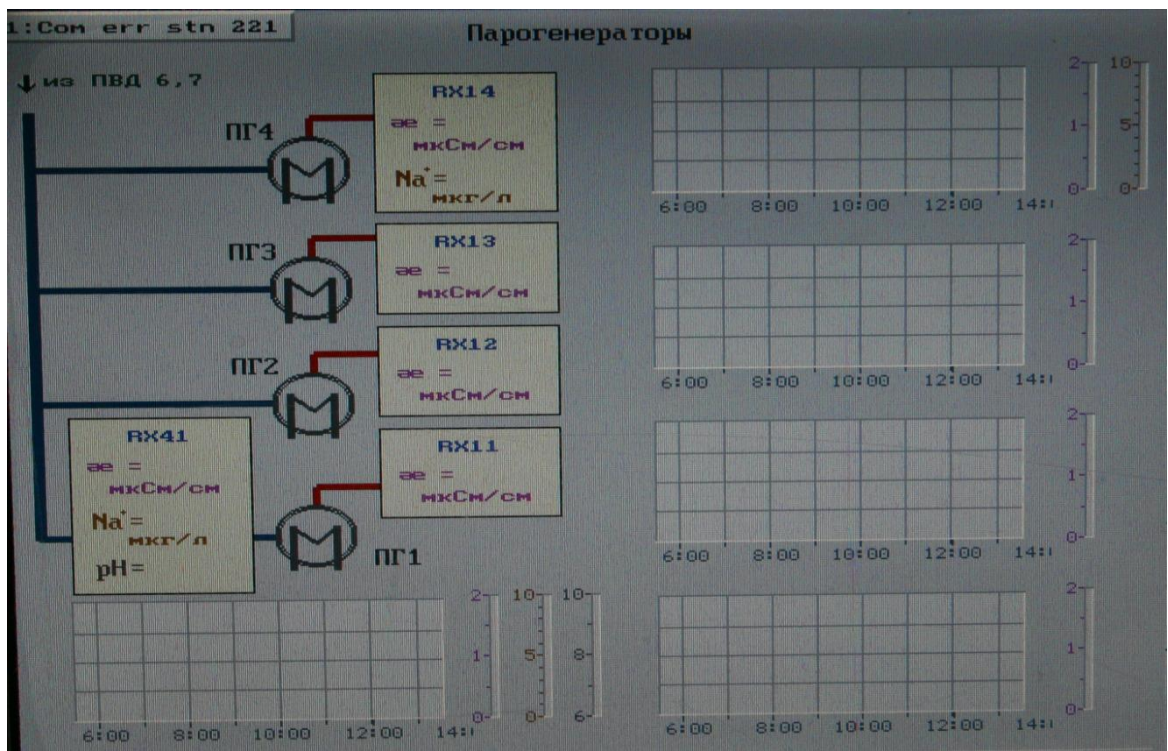


Рисунок 1.11 – Схема АХК живильної води ПГ

У таблиці 1.1 наведені параметри АХК другого контуру енергоблоку.

Таблиця 1.1 – АХК другого контуру ХАЕС

Найменування показника, що контролюється, од. виміру	Місце відбору проб
1	2
рН, од.	живильна та продувна вода ПГ
χ_n , мкСм/см	живильна та продувна вода ПГ, конденсатори, КЕН 1 ст., ФЗД, пара ПГ, конденсат бойлерів, СВО, СВО-5, БНТ
Na, мкг/дм ³	КЕН 1 ступені, живильна вода ПГ
O ₂ , мкг/дм ³	КЕН 1 ступені, живильна вода ПГ

Отже, як видно із наведених даних та графічного представлення точок АХК другого контуру, можна зробити висновок, що вимірювання надзвичайно важливих параметрів робочого середовища, таких як концентрація іонів натрію, значення водневого показника та концентрація кисню, відбуваються лише до БЗУ, а потім вже тільки перед ПГ. Такий спосіб контролю недостатній та у деяких випадках може бути небезпечним та призвести до невіправних наслідків [63].

Технічні засоби обчислювальної техніки системи АХК ВХР описані у Додатку В.

Система знесолення турбінного конденсату має три щити керування: МЩУ БЗУ, АІЖ ЕМФ-3600-УХЛ4, МЩУ РУ.

Обсяг та характеристика контрольованих параметрів системи наведені у Додатку Д.

Керування роботою ЕМФ здійснюється зі щита автоматики і живлення (АІЖ ЕМФ). Щит має дві панелі з одностороннім керуванням:

- ША (шафа автоматики), що має мнемосхему із сигнальними лампами, кнопки керування й дисплей із клавіатурою;
- ШТА (шафа тиристорного агрегату), що має сигнальні лампи, кнопку аварійного відключення випрямляча, амперметр і вольтметр.

Проектом передбачена автоматизація процесу включення, відключення й розмагнічування ЕМФ. Живлення електромагнітних котушок ЕМФ здійснюється зі ШТА ЕМФ. Керування електрифікованими арматурами здійснюється з панелі ША ЕМФ.

Пристрій автоматики й живлення призначений для:

- автоматичного керування електроживленням котушок у режимі фільтрації конденсату зі стабілізацією струму намагнічування; автоматичного керування процесом розмагнічування котушок у режимі "Розмагнічування";
- автоматичного керування запірними арматурами в технологічному тракті основного конденсату при введенні ЕМФ (у фазу фільтрації) і виведенні ЕМФ із роботи (у фазу розмагнічування або при спрацьовуванні блокувань по спаданню напруги й по перевищенню температури котушок);
- дистанційного керування робочими арматурами в обв'язці ЕМФ;
- дистанційного керування промивними арматурами в обв'язці ЕМФ;
- дистанційного керування байпасом ЕМФ;
- дистанційного керування подачею струму намагнічування на електромагнітні котушки ЕМФ.

Для чіткого виконання технологічних переключень циклів роботи і промивки ЕМФ передбачена система блокувань.

Отже, можна зробити висновок, що робота ЕМФ автоматизована на досить високому рівні та, на даний момент, не потребує подальшого дослідження.

1.3.5 Експлуатація БЗУ другого контуру АЕС із ВВЕР-1000

При експлуатації БЗУ кожний фільтр може перебувати в одному із трьох станів: робота (фільтрація), резерв, розпушення [64].

Оптимальна експлуатація устаткування БЗУ вимагає постійного знаходження технологічних параметрів у діапазонах, заданих номінальним режимом роботи обладнання.

У стані роботи необхідно підтримувати гідравлічний режим установки, щоб уникнути перевищення швидкості потоків води через фільтри і перепадів тиску на них понад встановлених значень.

Розподілення навантаження за паралельно працюючими фільтрами відбувається відповідно до їх гідравлічного опору.

Необхідно відзначити, що гідравлічний опір фільтра, що може бути зменшений за рахунок розпушення, не може бути виміряний безпосереднім способом, тому звичайно оцінюється оператором за значеннями всіх витрат працюючих фільтрів.

Задана витрата підтримується за рахунок зміни кількості працюючих фільтрів.

Недопустимими є витрати води через фільтр нижче 100 і вище 900 м³/год., небажаною є витрата в діапазоні 100-700 м³/год. При даній витраті не досягається заданого ступеня фільтрації води. Номінальною витратою, повністю задовольняючою технологічним вимогам є витрата в діапазоні 700-900 м³/год.

При роботі конденсатоочистки необхідно підтримувати температуру конденсату менше ніж 50°C. В іншому випадку можливе руйнування іонообмінних смол, а також порушення процесів іонного обміну слабкої силікатної кислоти на фільтрах змішаної дії.

При експлуатації фільтрів БЗУ окрім фізичних величин (швидкості, тиску і температури конденсату), необхідно контролювати і підтримувати його якісні фізико-хімічні характеристики по стадіях обробки: електропровідність, жорсткість, вміст силікатної кислоти, натрію.

Конденсат залежно від його якості повністю або частково надходить на ФЗД. Кількість працюючих ФЗД залежить від якості основного конденсату за

КЕН-I ст., якості конденсату за ФЗД та від якості продувної води парогенераторів і визначається на підставі комплексної оцінки стану ВХР.

ФЗД дозволяє очищати конденсат до дуже низької питомої електропровідності. У процесі очищення відбувається поглинання катіонітом катіонів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , та ін.), аніонітом аніонів (Cl^- , SO_4^{2-} , Si_3^{2-} , HCO_3^- та ін.) і поступове виснаження ємності поглинання катіоніту й аніоніту, після чого проводиться їхня регенерація.

Відключення ФЗД на регенерацію проводиться:

- при досягненні в постійній продувці ПГ (під час росту загальної електропровідності у фільтраті ФЗД) концентрації Cl^- 75 мкг/дм³ або концентрації Na^+ 200 мкг/дм³;

- при досягненні на виході ФЗД питомої електропровідності Н-катіонованої проби $\geq 0,3$ мкСм/см, концентрації $\text{Na}^+ \geq 2$ мкг/дм³.

При дотриманні якості живильної й продувної води допускається повне або часткове відключення ЕМФ та ФЗД БЗУ.

Проте, на час так званого «економного» режиму, період включення й виводу на режим експлуатації резервних ФЗД достатній для занесення в парогенератор неконтрольованих кількостей солей жорсткості, сульфатів, хлоридів, органічних речовин з непередбаченими наслідками.

Невиправдана практика відключення конденсатоочистки при нещільних конденсаторах приводить до частого виходу з ладу й заміні парогенераторів. Це підтверджує той факт, що кількість аварійних або демонтованих парогенераторів на АЕС корелює із солевмістом охолоджувальної води і режимах експлуатації БЗУ на цих станціях.

Отже, в результаті аналізу основних напрямків автоматизації контролю та керування ВХР другого контуру було виявлено, що одним із найважливіших засобів підтримки ВХР другого контуру є БЗУ. Проте на жодній електростанції України робота БЗУ не автоматизована. Тобто розподілення витрат між фільтрами, виведення фільтрів на регенерацію, розпушення та ін. здійснюється оператором вручну, що призводить до

збільшення витрат хімреагентів, води живлення та об'ємів рідких відходів енергоблоку, а також підвищується ризик виникнення аварійних режимів.

1.4 Постановка задачі дослідження

Рішення щодо переключення фільтра з одного стану в інший на даний час приймається оператором, тобто керування розподілом навантаження на блок фільтрів ведеться в ручному режимі, що знижує оперативність і точність прийняття рішень та призводить до збільшення витрат хімреагентів, води живлення та об'ємів рідких відходів енергоблоку, а також підвищується ризик виникнення аварійних режимів. Отже, завданням автоматичного керування є визначення моменту перемикання фільтра в один із можливих станів (робота, резерв (регенерація), розпушення) таким чином, щоб дотримувався необхідний режим на кожному фільтрі блоку, а також повинна вирішуватись задача розподілення навантаження між фільтрами так, щоб стабілізувалась загальна витрата води на ПНТ.

Поставлене завдання є нетривіальним через складність об'єкта регулювання. При рішенні такого завдання застосування класичного підходу є досить важким через великі складності, що виникають при ідентифікації об'єкта, описі його математичної моделі й відсутності чітких правил перемикання фільтрів. Оператор, у ситуації такої невизначеності, виходячи із поточного стану об'єкта й досвіду експлуатації, по суті, інтуїтивно приймає рішення щодо керування їхньою роботою. Тому доцільно застосувати до рішення поставленої задачі методи інтелектуального керування як інструмента, що дозволяє якісно використовувати знання про об'єкт у формі логіко-лінгвістичних пояснень і задіяти весь накопичений досвід експлуатації об'єкта при розробці алгоритму прийняття рішень.

Отже, метою даної роботи є підвищення ефективності процесу знесолення турбінного конденсату й зменшення трудомісткості та суттєве підвищення якості рішень, що приймаються оператором, шляхом створення

системи керування БЗУ другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 на базі розподіленої системи керування Experion 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 Experion 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.

1.4.1 Обґрунтування методу рішення задачі

Інтелектуальним керуванням називається область досліджень та розробок, що формується та розвивається на стику сучасної теорії керування й штучного інтелекту. Штучний інтелект – розділ інформатики, що вивчає методи, способи й прийоми моделювання й відтворення за допомогою ЕОМ розумної діяльності людини.

Розробки, що включаються до складу систем керування, називають інтелектуальними компонентами систем керування, серед яких розрізняють кілька основних компонентів, таких як: нейронні мережі; системи, засновані на знаннях; системи засновані на правилах.

Нейронні мережі застосовуються для розв'язку цілого класу задач, де використовуються не рівняння динаміки й навіть не стільки правила, як у традиційних експертних системах, скільки досвід [90].

Штучні нейронні мережі (ШНМ) можуть змінювати свою поведінку залежно від умов зовнішнього середовища, тобто адаптуватися. Після пред'явлення вхідних сигналів (можливо, з відповідними виходами) нейронні мережі самоналаштовуються, щоб забезпечити необхідну реакцію.

Реакція мережі після навчання може бути певною мірою нечутлива до невеликих змін вхідних сигналів. Ця особливість виділяти образ крізь шум і викривлення дозволяє подолати вимоги суворості точності, пропонувані звичайним комп'ютерам. Важливо відзначити, що нейронна мережа робить узагальнення автоматично завдяки своїй структурі, а не за допомогою «людського інтелекту», представленого у формі спеціально написаних комп'ютерних програм.

Нейронні мережі мають здатність витягати суть із вхідних сигналів, тобто оперувати з даними, які не виникали в процесі навчання.

Перераховані властивості дозволяють ефективно використовувати ШНМ при розв'язку наступних задач: апроксимації функцій / моделювання; ідентифікації / прогнозування; керування; класифікації образів; кластеризації / категоризації; оптимізації.

Знання можуть бути представлені в деякій логічній мові і їх обробка за допомогою логічних засобів дозволяє одержувати деякі переваги на множині припустимих керувань із метою вибору одного з них.

У загальному випадку, системи засновані на знаннях оперують із більш широкою інформацією — логічними, об'єктно-орієнтованими й іншими моделями, заснованими на знаннях експертів. Разом з тим системи, засновані

на знаннях можуть використовувати й традиційні алгоритми, що базуються на рівняннях динаміки. Тому, як і у випадку використання нейронних мереж, клас розв'язуваних завдань принципово розширюється, у порівнянні із традиційною проблематикою теорій керування.

Базова інформація звичайно ділиться на дані, знання й уміння. У рамках логічного погляду на інформацію, відмінність даних і знань може вбачатися в рівні складності їх представлення.

У рамках лінгвістичного підходу до представлення знань (використовуваного, наприклад, у нечітких логіках) дані й знання представляються за допомогою не тільки чисел, але й слів і речень природної мови.

До систем, заснованих на «знаннях» (СЗЗ), належать наступні: системи, засновані на правилах (Rule-Based Reasoning); системи, засновані на автоматичному доведенні теорем (Automatic Theorem-Proving Techniques); системи, засновані на автоматичному гіпотезуванні, тобто на породженні гіпотез; системи, засновані на міркуваннях за аналогією; об'єктно-орієнтовані інтелектуальні системи (Object-Oriented Intelligent Systems).

Загальні цілі інтелектуального керування:

— повніше використовувати доступні знання про об'єкт і середовище, щоб забезпечити надійне керування з визначеним критерієм (наприклад, знаючи бажану траєкторію, функціонал якості керування, цільову множину),

— управляти у творчій (інтелектуальній) манері (подібно людині), прогнозуючи зміни в об'єкті й середовищі, зберігаючи, наприклад, шляхом реконфігурації працездатність навіть при більших змінах, погоджуючи й, можливо, переглядаючи цілі й критерії якості керування;

— поліпшувати із часом здатність управляти об'єктом шляхом акумулювання експериментальних знань, тобто шляхом навчання на досвіді.

Нейронні мережі й системи, засновані на знаннях хороші для моделювання дій кваліфікованого оператора, добре знайомого з усіма особливостями ОУ, що успішно справляється з керуванням ним «вручну».

Прикладами систем заснованих на правилах є наступні системи, засновані на використанні: нечітких правил (сформованих у зручних для людини якісних термінах, а саме в термінах нечітких понять: багато, мало); продукційних правил (типу «якщо виконуються умови ..., то роби...»); логічного програмування.

Нечіткі правила звичайно мають семантику «умова-дія» і тому являються окремим випадком продукційних правил (продукцій), які можуть і не використовувати нечіткі поняття. На основі нечітких правил можуть реалізовуватись нечіткі логічні висновки. Використання нечіткої логіки й нечітких понять дозволяє у ряді завдань спростити процес представлення знань.

Системи, засновані на продукційних правилах, використовуються в режимі інтерпретаторів: відповідно до деякої стратегії правила проглядаються одне за іншим і, якщо розглянуте на черговому кроці правило застосовне (тобто його умови виконуються), то відразу виконується дія, що й пропонується цим правилом.

З існуючих на даний момент систем інтелектуального керування найбільш підходящими для рішення поставленого завдання є системи засновані на використанні нечіткої логіки внаслідок наступних причин:

- даний метод є найбільш придатним для моделювання дій досвідченого оператора.

- наявність докладного лінгвістичного опису об'єкта керування в термінах «якщо – то», що у максимальній мірі відповідає формату нечітких правил.

- наявність багатого досвіду експлуатації об'єкта керування і, як наслідок, можливість використовувати як вихідну базу знань управлінських рішень для реальних ситуацій, що склалися протягом тривалого часу.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ЗНЕСОЛЕННЯ ТУРБІННОГО КОНДЕНСАТУ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ АЕС

У промислових системах знесолення турбінного конденсату відсутні дані щодо стану іонообмінних фільтрів у різні моменти часу перебігу технологічного процесу. Переключення фільтрів на регенерацію проводиться за даними аналізів проб, що періодично відбираються, на виході фільтру. Такий спосіб контролю за ходом процесу є недостатнім та може призвести до істотних проскоків іонів солей, що є вкрай небезпечним для робочого середовища та обладнання другого контуру реакторної установки в цілому. Задля уникнення таких наслідків необхідно використати математичну модель процесу [65].

При розробленні системи контролю та керування технологічним процесом знесолення турбінного конденсату, що є особливо важливим з точки зору екологічної безпеки, надзвичайно актуально використовувати адекватні математичні моделі.

В Україні та за кордоном на основі багаторічних фундаментальних досліджень розроблено безліч математичних моделей іонообмінних процесів знесолення води з використанням різних іонітів та середовищ фільтрування [66-69]. Адекватність цих моделей реальному процесу для різних стадій роботи доведена для цілого ряду промислових фільтрів [70-75].

Як відомо, динаміка іонного обміну може бути описана системою диференціальних рівнянь, що складається із рівнянь матеріального балансу, зовнішньодифузійної кінетики і статички (ізотерми) обміну [76]:

Математична модель процесу іонного обміну на свіжоприготованому іоніті включає наступні рівняння [77-78]:

— процес переносу речовини у рідкій фазі (воді)

— — —

(2.1)

— процес переносу речовини у твердій фазі (іоніті)

$$\text{---} \quad \text{---} \text{---} \quad (2.2)$$

— рівновагу в системі (ізотерма Нікольського)

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (2.3)$$

Система рівнянь (2.1-2.3) доповнена наступними початковими й граничними умовами по рідкій та твердій фазам відповідно:

$$\text{при } \begin{matrix} : & - \\ ; & - \end{matrix}; \quad (2.4)$$

$$\text{при } \begin{cases} \alpha = 0 \\ \alpha = \pi \end{cases} \quad \begin{cases} \beta = 0 \\ \beta = \pi \end{cases} \quad \begin{cases} \gamma = 0 \\ \gamma = \pi \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\text{при } \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \quad ; \quad \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \quad ; \quad \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \quad ; \quad (2.6)$$

а також рівняннями, що враховують еквімолярність системи (за умови електронейтральності рідкої фази):

(2.7)

де C_0 – концентрація іонів (сумарний солевміст) в іоніті та воді відповідно, мг-екв/мл; C_1 – початкова концентрація іонів в іоніті та воді відповідно, мг-екв/мл; C_2 – рівноважна концентрація іонів в іоніті та воді відповідно, мг-екв/мл; C_3 – динамічна обмінна ємність іоніту, мг-екв/мл;

– ефективний коефіцієнт подовжньої дифузії у рідкій фазі, м²/год.;

– ефективний коефіцієнт дифузії домішок у пористому середовищі, м²/год.;

– концентраційна константа обміну для ізотерми Нікольського;

коефіцієнт зовнішньої масовіддачі, 1/год; β – коефіцієнт внутрішнього масопереносу, 1/год; z – координата (початок підрахунку – місце введення в апарат рідкої фази, $z=0$), м; H – довжина (висота) прошарку іоніту, м; τ – час (год.), год.; T – міжрегенераційний період (корисний термін процесу), год.; σ – пористість прошарку іоніту (для стандартних промислових іонітів $\sigma=0.4$); U – зведена швидкість плинину рідини у фільтрі, м/год.

Результатом розв'язання моделі є розподіл іонів по висоті фільтру і часу процесу, також розрахунок потрібної висоти прошарку іоніту для забезпечення заданого ступеня очищення при необхідних лінійній швидкості потоку води, що очищається, і часу фільтроциклу [79].

Ключовим фактором при оптимізації роботи іонообмінних фільтрів є визначення оптимального фільтроциклу, який може бути розрахований із використанням існуючих математичних моделей іонного обміну (2.1-2.7). Проте, такі моделі можуть бути застосовані лише за необхідності отримання динаміки концентрацій іонів солей та не можуть бути використані при рішенні задач керування [65], наприклад, у випадку визначення оптимального навантаження на кожен фільтр іонообмінної установки та забезпечення витрат на енергоблок в цілому, зокрема ПНТ. Тому необхідно отримати математичну модель БЗУ, що дозволить вирішити поставлену задачу.

Така модель надасть можливість розраховувати й відображати стан фільтрів у ході процесу, знаючи продуктивність та склад води, що надходить на вхід фільтру, у різні моменти часу. Результати розрахунків дозволять визначити момент часу, коли необхідно виконати зміну режиму.

Найбільш раціональним є вибір експериментально-статистичного методу ідентифікації досліджуваного об'єкта за наявності даних пасивного експерименту (реальної експлуатації енергоблоку АЕС), що дасть можливість отримати найбільш достовірну інформацію про об'єкт із урахуванням закономірностей притаманних обладнанню конкретного типу.

Основною перевагою на шляху вибору методу дослідження стала відсутність витрат на проведення активного експерименту.

Проведемо структурну та параметричну ідентифікацію БЗУ другого контуру енергоблоку АЕС задля отримання якісної математичної моделі об'єкту керування.

2.1 Ідентифікація БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР-1000

При експлуатації фільтрів БЗУ, крім фізичних величин: швидкості, тиску та температури потоків, необхідно контролювати та підтримувати її якісні фізико-хімічні характеристики, такі як електропровідність, водневий показник, жорсткість, вміст іонів солей та ін. [80]

На АЕС України контроль за роботою ФЗД ведуть за якістю фільтрату, визначаючи вміст іонів натрію, що не повинен перевищувати 5 мкг/кг, та значення питомої електропровідності фільтрату, що у кінці робочого циклу може підвищуватись до 0,3 мкСм/см. Сигналом для виведення фільтру на регенерацію слугує вихід цих параметрів за межі встановлених норм. Вчасне відключення фільтрів запобігає роботі установки на «виснажених» іонітах, тобто проскоку іонів солей у робоче середовище другого контуру АЕС, що призводить до корозійних пошкоджень конструкційних матеріалів обладнання.

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

Відомо, що електропровідність конденсату залежить від наявності та концентрації іонів домішок (мінералізації), температури та в'язкості води. Проте, перші два фактори є визначальними [33].

Отже, із врахуванням вищезазначеного, змінні стану, що були отримані в результаті пасивного експерименту та використані для побудови математичної моделі питомої електропровідності, наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Таблиця ідентифікаторів факторів математичної моделі питомої електропровідності

Xh	Na	N ₂ H ₄	Fe	T	Cl	SO ₄
1	2	3	4	5	6	7
Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Примітка. Xh – питома електропровідність конденсату після БЗУ; Na – концентрація іонів натрію в конденсаті за КЕН-1; N ₂ H ₄ – концентрація гідрозину в живильній воді ПГ; Fe – концентрація іонів феруму в конденсаті за КЕН-1; T – температура проби конденсату за КЕН-1; Cl – концентрація іонів хлору в продувній воді сольового відсіку ПГ; SO ₄ – концентрація іонів сульфату у продувній воді сольового відсіку ПГ.						

Водневий показник, у свою чергу, залежить від температури проби конденсату, наявності у водному розчині металів та концентрації гідрозину, який вводять у робоче середовище задля підвищення значення рН, що суттєво знижує швидкість корозії у другому контурі АЕС.

Таким чином, змінні стану, що були отримані в результаті пасивного експерименту та використані для побудови математичної моделі водневого показника, наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Таблиця ідентифікаторів факторів математичної моделі водневого показника

рН	N ₂ H ₄	T	Fe
1	2	3	4
Y	X1	X2	X3
Примітка. рН – значення водневого показника конденсату після БЗУ; N ₂ H ₄ – концентрація гідрозину в живильній воді ПГ; T – температура проби конденсату за КЕН-1; Fe – концентрація іонів феруму в конденсаті за КЕН-1.			

Далі постало питання виявлення наявності та дослідження тісноти зв'язку між обраними факторами процесу та вихідними змінними, що дозволить встановити міру впливу кожної із вхідних змінних на протікання процесу, або ж її відсутність. Отже, далі було проведено кореляційний аналіз даних з метою ранжування вхідних факторів.

2.2 Кореляційний аналіз даних експлуатації БЗУ

У ході дослідження було проведено розрахунки в аналітичній системі STATISTICA (StatSoft) з метою виявлення ступеня впливу факторів на вихідні змінні. Дані, що є результатами пасивного експерименту, на основі яких було проведено відповідні дослідження, наведені у Додатку В.

Оцінка впливу факторів на досліджувану ознаку проводилась із використанням поглибленого методу аналізу, а саме нелінійного оцінювання, що дозволяє знайти кращу підгонку зв'язку між значеннями залежної змінної і безліччю значень однієї або декількох незалежних змінних. Даний модуль надає можливість задати користувацький тип моделі, ввівши відповідне рівняння у редакторі.

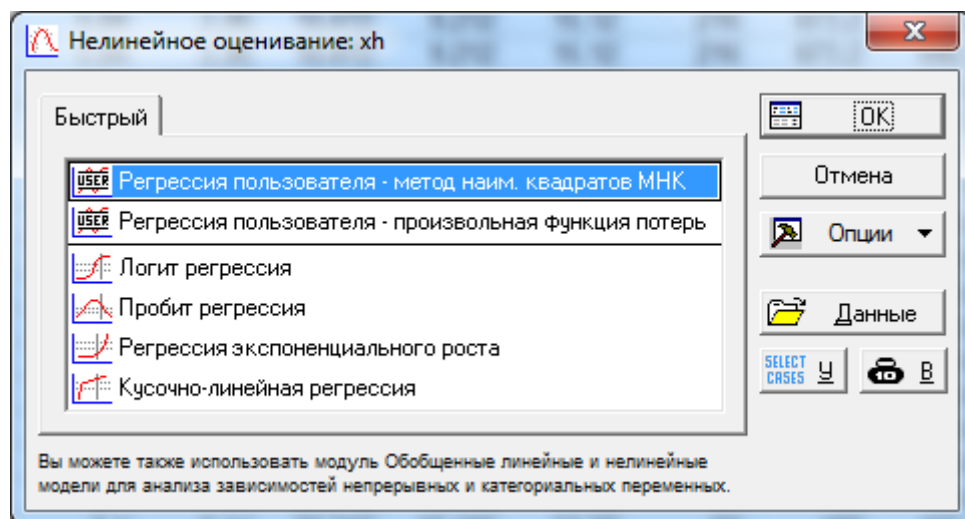


Рисунок 2.1 – Вікно вибору в модулі нелінійного оцінювання

У подальших розрахунках було обрано регресію користувача, що реалізує метод найменших квадратів (МНК) [85], алгоритм якого є найбільш розповсюдженим та широко застосованим на практиці.

У загальному випадку задача МНК формулюється наступним чином. Шукана функціональна залежність величини y від величини x виражається формулою:

$$(2.8)$$

де $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ – задані функції, x_1, x_2, \dots, x_m – шукані параметри – коефіцієнти рівняння (2.8). Передбачається, що значення аргументу x встановлені точно, а відповідні значення функції y визначені в експерименті з деякою похибкою. Якби вимірювання проводилися без помилок, то для визначення параметрів $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ потрібно було б рівно $m + 1$ вимірювань. Але через помилки експерименту різні серії з $m + 1$ вимірювань будуть давати різні значення параметрів $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$. Тому кількість проведених вимірювань має бути значно більшою, ніж число m визначених параметрів, для зменшення впливу помилок експерименту за рахунок використання надлишкової інформації задля досягнення найкращих в деякому розумінні оцінок визначених параметрів.

Отже, для отримання оцінок параметрів $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ проводять n експериментів, результати яких дають значення не цих параметрів, а деякої функції (2.8), що залежить від них лінійно.

МНК полягає в тому, що оцінки параметрів $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ формули (2.8) визначаються з умови: сума квадратів відхилень досягає найменшого значення.

$$(2.9)$$

Для нелінійної регресії найменших квадратів, тобто нелінійної регресійної функції і функції втрат найменших квадратів, модуль Нелінійне оцінювання містить спеціальний алгоритм – метод Левенберга-Маркара, що є дуже ефективним і точним у випадках коли обробляється велика кількість даних при використанні функції втрат найменших квадратів.

Для знаходження оцінок параметра за МНК при використанні функції втрат найменших квадратів не розраховуються часткові похідні другого порядку. Замість цього на кожній ітерації для обчислення градієнта вирішуватися система лінійних рівнянь.

Нехай нелінійна модель задана рівнянням $y = f(x; \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m)$ із заданими значеннями в точках x_1, x_2, \dots, x_n , де n має розмірність k , а $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ –

розмірність n . Метод Левенберга-Маркара здійснює пошук локального рішення з множини S , що мінімізує функцію неузгодженості g :

У методі Левенберга-Маркара на кожній ітерації обчислюється співвідношення:

де \mathbf{d} – вектор розміром $m \times 1$, що містить \mathbf{g} ; \mathbf{H} – матриця розміром $m \times k$, що містить \mathbf{J} ; \mathbf{J} – Якобіан перетворення \mathbf{g} по \mathbf{x} ; \mathbf{D} – діагональна матриця масштабування розміром $n \times n$.

Розглянемо відповідні дослідження для кожної із обраних ознак.

2.2.1 Дослідження відносно змінної питомої електропровідності

На початку досліджень необхідно задати вигляд користувацької функції (рис. 2.2).

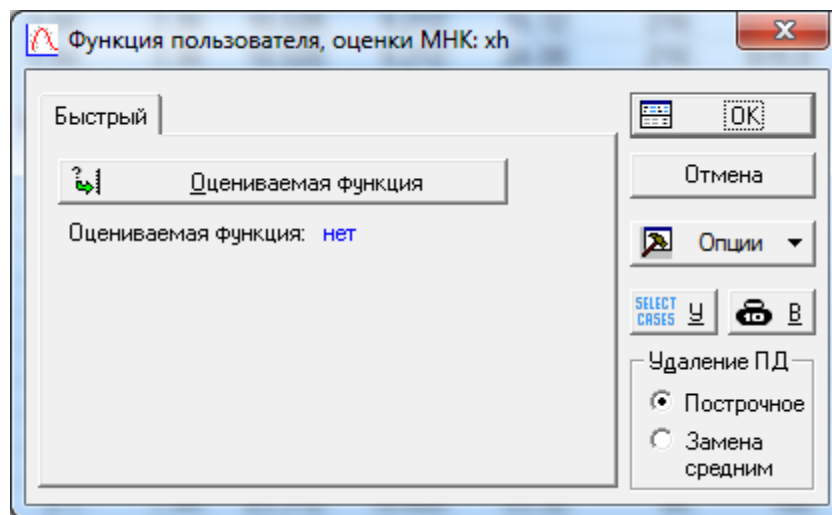


Рисунок 2.2 – Вікно доступу до редактора формул

Далі необхідно задати вигляд оцінюваної функції (рис. 2.3). На першому етапі було досліджено функцію наступного вигляду:

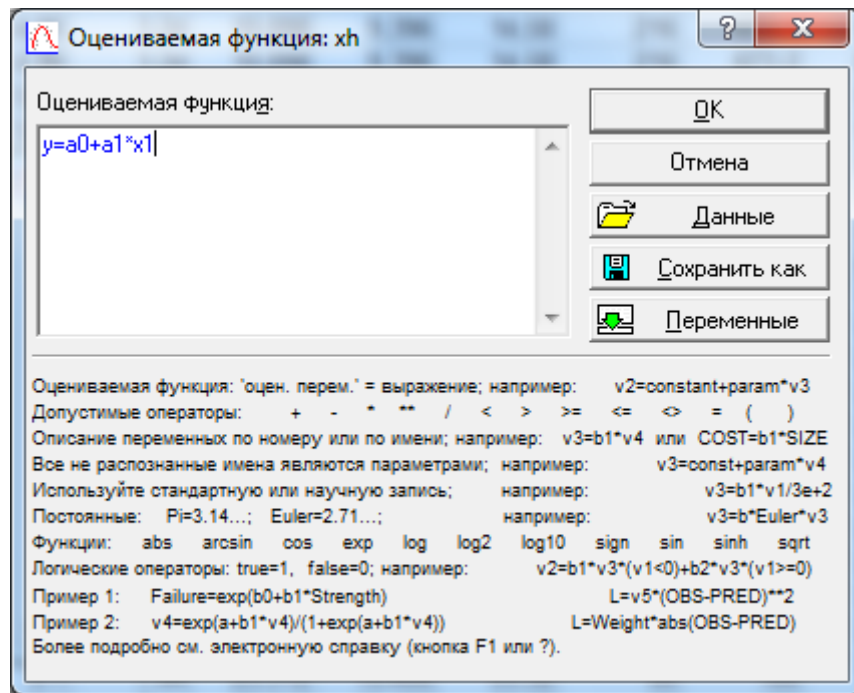


Рисунок 2.3 – Вікно введення досліджуваної функції

У наступному меню програма пропонує встановити необхідні параметри для поточного оцінювання введеної моделі. У даному випадку були збережені параметри запропоновані за замовчуванням.

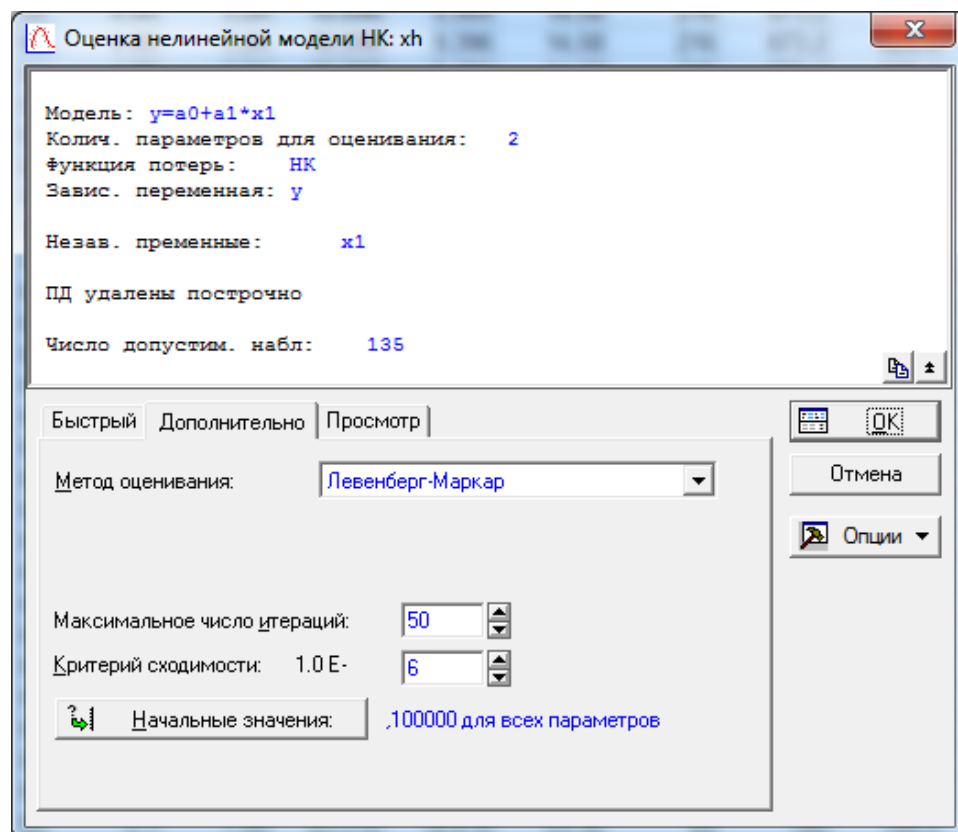


Рисунок 2.4 – Вікно встановлення параметрів оцінювання моделі

Результати проведених розрахунків представлені на рисунку 2.5.

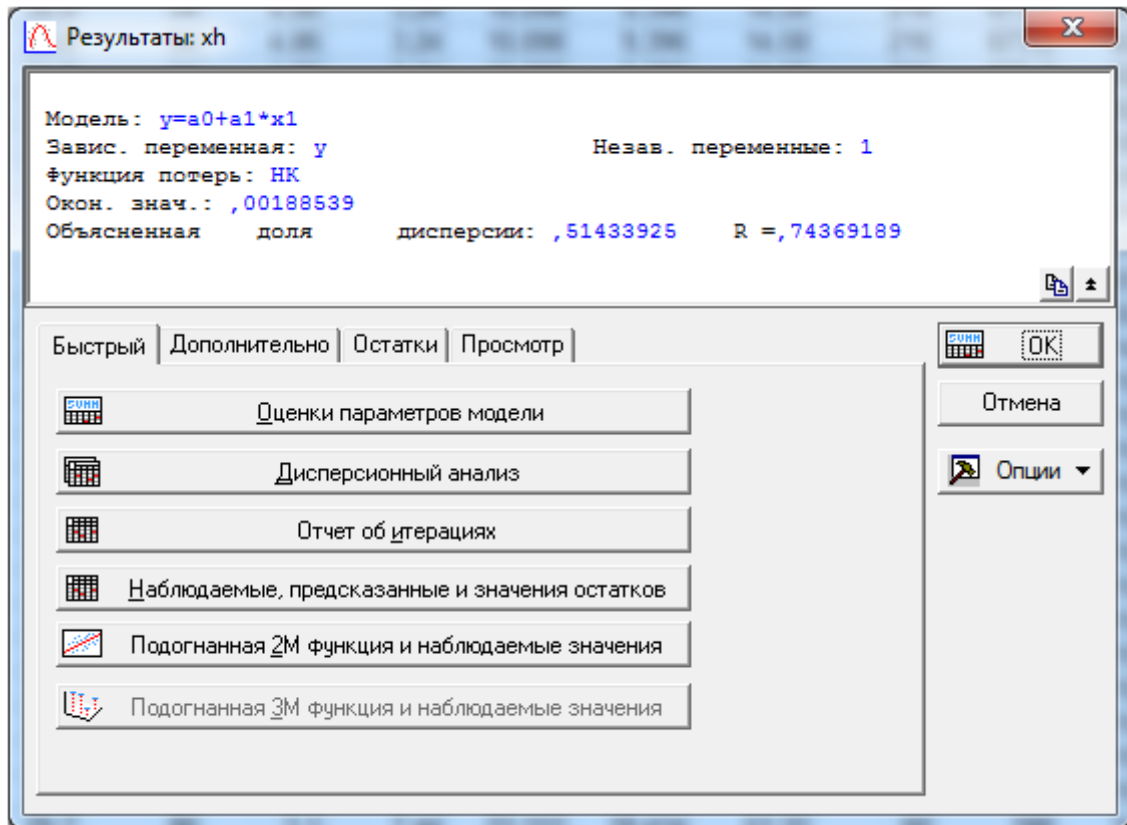


Рисунок 2.5 – Результати проведеного оцінювання

Коефіцієнт детермінації, що пояснює долю дисперсії вихідної змінної, може приймати значення від нуля до одиниці і чим ближче він до одиниці, тим краще параметрична модель наближає вихідні дані.

Коефіцієнт детермінації дорівнює 0,5144, отже запропонована модель пояснює 51 % варіації залежної змінної. Коефіцієнт кореляції становить 0,74, що свідчить про помірний зв'язок між величинами.

Аналогічні дослідження ступеня впливу усіх інших факторів та їх парних ефектів на вихідну змінну наведено у Додатку Е. За результатами проведених розрахунків було складено сумарну таблицю критеріїв придатності отриманих наближень (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розраховані критерії придатності наближень

Фактор	Коефіцієнт детермінації (R^2)	Коефіцієнт кореляції / кореляційне відношення (R)
1	2	3
X1	0,51	0,74
X2	0,21	0,43
X3	0,21	0,43
X4	0,36	0,61
X5	0,23	0,46
X6	0,22	0,45
X1×X2	0,29	0,53
X1×X3	0,39	0,64
X1×X4	0,51	0,74
X1×X5	0,11	0,18
X1×X6	0,49	0,72
X2×X3	0,28	0,53
X2×X4	0,21	0,44
X2×X5	0,34	0,59
X2×X6	0,11	0,21
X3×X4	0,22	0,44
X3×X5	0,23	0,46
X3×X6	0,1	0,12
X4×X5	0,24	0,47
X4×X6	0,21	0,43
X5×X6	0,15	0,33

У результаті проведення кореляційного аналізу всі змінні, а також ефекти їх можливої взаємодії, були розміщені у порядку спадання ступеня їх впливу на вихідну змінну. До таблиці 2.4 занесено лише ті фактори та їх взаємодії, що мають помірну тісноту зв'язку (за шкалою Чеддока) (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Ранжування факторів за ступенем впливу на вихідну змінну

Фактор	X1	X1×X4	X1×X6	X1×X3	X4	X2×X5	...
Коефіцієнт кореляції	0,74	0,74	0,72	0,64	0,61	0,59	<0,59

На підставі проведеного ранжування вхідних змінних були отримані регресійні залежності з почерговим включенням факторів за зменшенням ступеня їх впливу на вихідну змінну.

2.2.2 Дослідження відносно змінної водневого показника

Дослідження ступеня впливу усіх факторів та їх парних ефектів на значення водневого показника наведено у Додатку Е. За результатами проведених розрахунків було складено сумарну таблицю критеріїв придатності отриманих наближень (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Розраховані критерії придатності наближень

Фактор	Коефіцієнт детермінації (R^2)	Коефіцієнт кореляції / кореляційне відношення (R)
1	2	3
X1	0,33	0,31
X2	0,57	0,71
X3	0,39	0,64
X1×X2	0,21	0,32
X1×X3	0,3	0,61
X2×X3	0,41	0,65

Всі змінні, а також їх взаємодії розміщені у порядку спадання ступеня їх впливу на вихідну змінну представлено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Ранжування факторів за ступенем впливу на вихідну змінну

Фактор	X2	X2×X3	X3	X1×X3	...
Коефіцієнт кореляції	0,71	0,65	0,64	0,61	<0,61

На підставі проведеного ранжування вхідних змінних були отримані регресійні залежності з почерговим включенням факторів за зменшенням ступеня їх впливу на вихідну змінну.

2.3 Побудова математичних залежностей із використанням регресійного аналізу

У відповідності до обраних виходів системи було проведено регресійний аналіз задля встановлення функціональних залежностей між експериментальними даними експлуатації БЗУ [81-84].

Усі розрахунки були проведені із використанням програмного продукту STATISTICA (StatSoft), що дозволяє якісно та швидко аналізувати експериментальні дані.

2.3.1 Побудова регресійних залежностей питомої електропровідності

Моделі було проаналізовано із почерговим включенням факторів відповідно до проведеного ранжування даних. Отримані результати досліджень зведено до результуючої таблиці, що наведена нижче (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Розраховані критерії придатності наближень

Модель	Коефіцієнт детермінації (R^2)	Коефіцієнт кореляції / кореляційне відношення (R)
1	2	3
	0,51	0,74

Продовження таблиці 2.7

1	2	3
	0,55	0,77
	0,62	0,82
	0,54	0,76
	0,55	0,77
	0,51	0,74
	0,55	0,77
	0,55	0,77
	0,64	0,83
	0,64	0,84

Подальше додавання регресорів ускладнює структуру моделі та, разом з тим, незначно покращує її. Тому було прийнято рішення зупинитись на передостанній отриманій залежності. Дану модель було перевірено на наявність незначимих регресорів.

Модель: $y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_6 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_4$ (xh) Зав. Пер. : y Уров. значимости: 95.0% (альфа=0.050)						
ая	Оценка	Стандарт ошиб.	t-знач. сс = 129	p-уров.	Ниж. Дов Предел	Вер. Дов Предел
a0	2,01762	0,382563	5,27397	0,000001	1,26071	2,77453
a1	-2,25529	0,537373	-4,19688	0,000050	-3,31850	-1,19208
a2	0,06052	0,014396	4,20426	0,000049	0,03204	0,08901
a3	0,00010	0,000080	1,19820	0,233034	-0,00006	0,00025
a4	0,00005	0,000413	0,12262	0,902595	-0,00077	0,00087
a5	-0,04921	0,010232	-4,80966	0,000004	-0,06945	-0,02897

Коефіцієнти a_3 та a_4 виявились незначимими (рівень статистичної значущості $p > 0,05$). Отже їх можна виключити зі складу моделі. Результати оцінювання моделі наведено на рисунку 2.6.

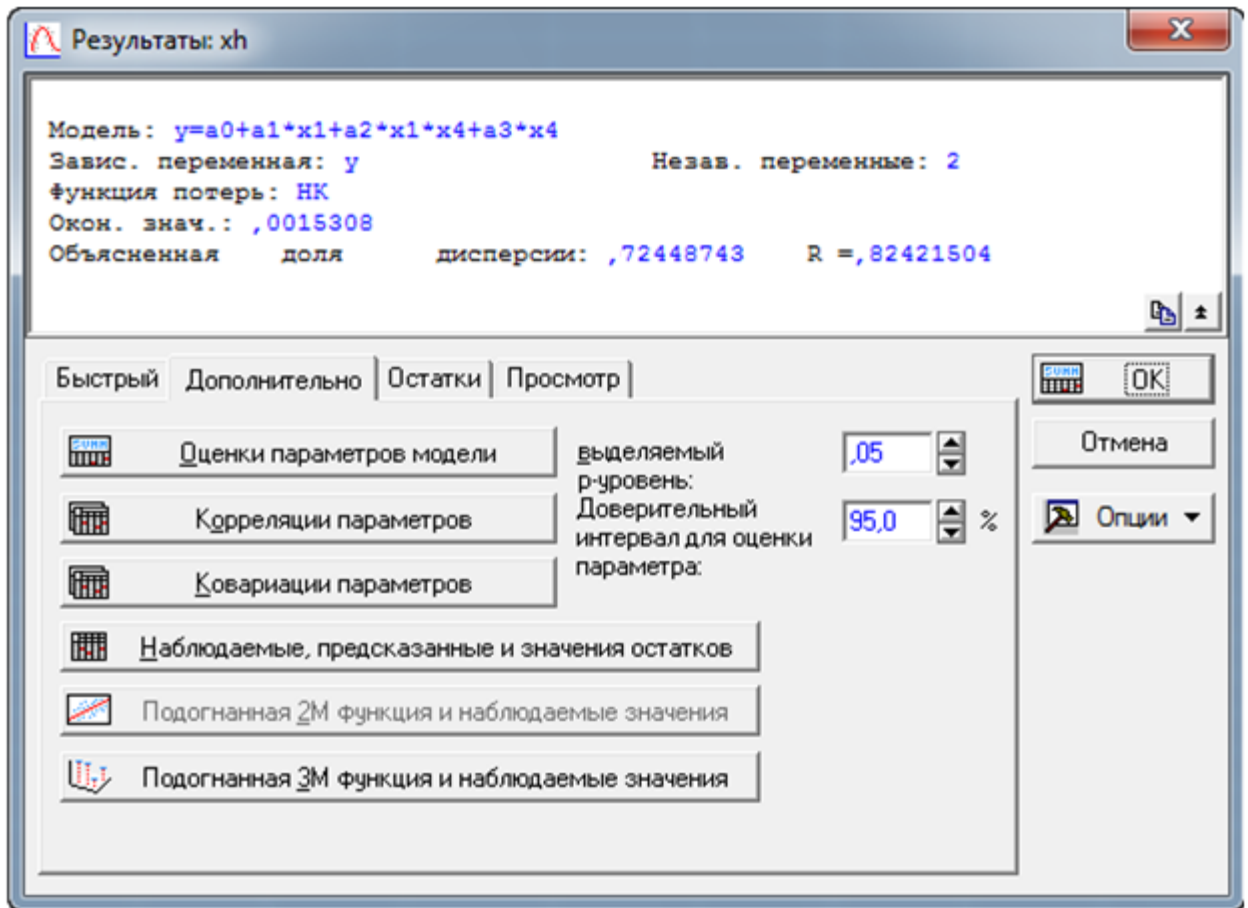


Рисунок 2.6 – Результаты оцінювання придатності моделі

Коефіцієнт детермінації дорівнює 0,7245, отже запропонована модель пояснює 72 % варіації залежної змінної. Кореляційне відношення становить 0,82, що свідчить про тісний зв'язок між величинами.

Порівняння розрахованих за отриманою регресійною залежністю значень питомої електропровідності із експериментальними наведено на рисунку 2.7. У табличному вигляді порівняння даних наведено у Додатку Г.

Із представленої графічної залежності та отриманих параметрів її придатності можна зробити висновок, що отримана математична залежність добре описує експлуатаційні дані.

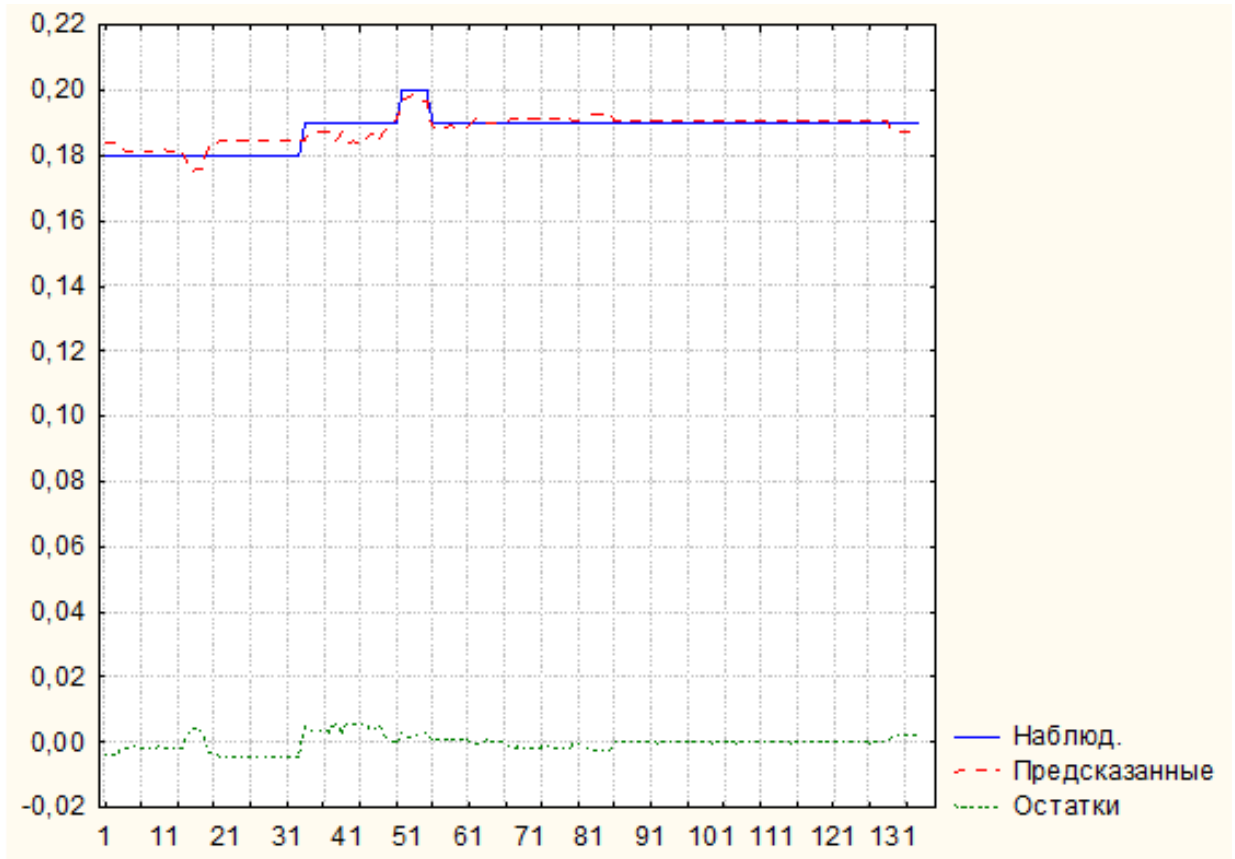


Рисунок 2.7 – Порівняння експериментальних та розрахованих значень питомої електропровідності

У результаті проведеного дослідження була отримана наступна регресійна залежність, що найкраще описує експериментальні дані:

або

2.3.2 Побудова регресійних залежностей водневого показника

Моделі було проаналізовано із почерговим включенням факторів відповідно до проведеного ранжування даних. Отримані результати досліджень зведено до результуючої таблиці, що наведена нижче (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Розраховані критерії придатності наближень

Модель	Коефіцієнт детермінації (R^2)	Коефіцієнт кореляції / кореляційне відношення (R)
1	2	3
	0,57	0,71
	0,60	0,73
	0,62	0,75
	0,74	0,83

Подальше включення регресорів у склад моделі незначно покращує її. Тому було прийнято рішення зупинитись на останній отриманій залежності. Дану модель було перевірено на наявність незначимих регресорів:

Модель: $y=a_0+a_1x_2+a_2x_2x_3+a_3x_3+a_4x_1x_3$ (pH)						
Зав. Пер. : y						
Уров. значимости: 95.0% (альфа=0.050)						
	Оценка	Стандарт ошиб.	t-знач. сс = 130	p-уров.	Ниж. Дов Предел	Вер. Дов Предел
a0	13,77401	2,160891	6,37423	0,000000	9,498949	18,04908
a1	-0,10795	0,058121	-1,85728	0,065534	-0,222934	0,00704
a2	0,01226	0,004954	2,47549	0,014592	0,002463	0,02206
a3	-0,45371	0,184221	-2,46286	0,015091	-0,818169	-0,08925
a4	0,00010	0,000017	5,64791	0,000000	0,000063	0,00013

Коефіцієнт a_1 є незначимим, так як рівень статистичної значущості $p > 0,05$. Результати оцінювання придатності моделі з виключенням відповідного доданку наведено на рисунку 2.8.

Модель незначно, але погіршилась. Тому за оптимальну було прийнято попередню модель із включенням усіх регресорів.

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

Порівняння розрахованих за отриманою регресійною залежністю значень водневого показника із експериментальними наведено Додатку Г.

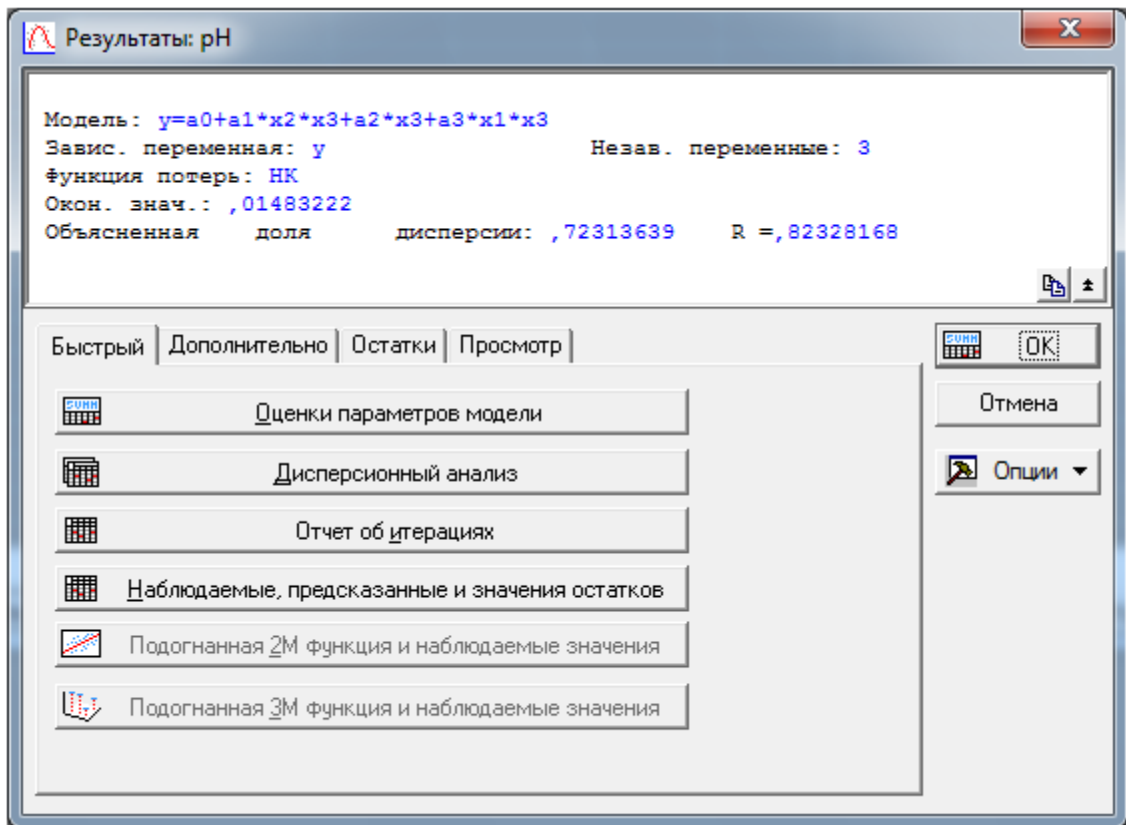


Рисунок 2.8 – Результаты оцінювання придатності моделі

Із представленої графічної залежності та отриманих параметрів її придатності можна зробити висновок, що отримана математична залежність добре описує експлуатаційні дані.

У результаті проведеного дослідження була отримана наступна регресійна залежність, що найкраще описує експериментальні дані:

або

Отже, за отриманими результатами можна зробити висновок, що отримані регресійні моделі адекватно описують реальні дані експлуатації АЕС та можуть бути використані при керуванні БЗУ.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ БЗУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ТИПУ ВВЕР-1000

3.1 Розроблення нечіткої системи керування розподілом навантажень між фільтрами БЗУ другого контуру АЕС із ВВЕР-1000

Управління розподілом навантаження між фільтрами блоку знесолення турбінного конденсату в ручному режимі здійснюється у такий спосіб: на підставі загальної витрати на блок, витрат через кожний фільтр і технологічних вимог оператор приймає рішення щодо перемикання фільтра в один із можливих станів: наприклад вмикає в роботу додатковий фільтр, якщо витрати через працюючі фільтри вище номінальних або не забезпечують заданої витрати на блок.

Завдання системи автоматичного керування полягає у визначенні моменту перемикання фільтрів в один із дискретних станів: робота, резерв, розпушення. Поставлене завдання можна віднести до задач класифікації, яка полягає у виконанні відображення вигляду:

(3.1)

тобто у віднесенні об'єкта, заданого вектором інформативних ознак
(у даному випадку x – вектор значень витрат через фільтри),
до одного із наперед визначених класів – (включити ще один
фільтр у роботу, вивести один фільтр у резерв, провести розпушення, нічого
не робити). Для проведення класифікації на основі нечіткого логічного
виводу необхідно побудувати нечіткі системи з дискретним виходом, у яких
вихідна змінна приймає одне значення із множини .

3.1.1 Фазифікація вхідних сигналів БЗУ АЕС із реактором типу ВВЕР-1000

На етапі фазифікації чіткі значення вхідних змінних за допомогою функцій приналежності перетворюються у значення лінгвістичних змінних [97].

На основі аналізу режимів роботи фільтрів, що характеризуються витратами води через фільтр і експертних оцінок, визначені наступні терми лінгвістичної змінної «Режими роботи фільтра»:

1. A1: «Витрата нижче мінімально допустимої» – менше 150 м³/год.;
2. A2: «Витрата нижче номінальної» – 100-200 м³/год.;
3. A3: «Витрата номінальна» – 150-300 м³/год.;
4. A4: «Витрата вище максимально допустимої» – більше 250 м³/год.

У якості функцій приналежності приймаються стандартні трапецивидні функції приналежності [98]:

Терму A1 «Витрата нижче мінімально допустимої» (рис. 3.1) відповідає функція приналежності :

(3.2)

де – витрата води через фільтр, м³/год.

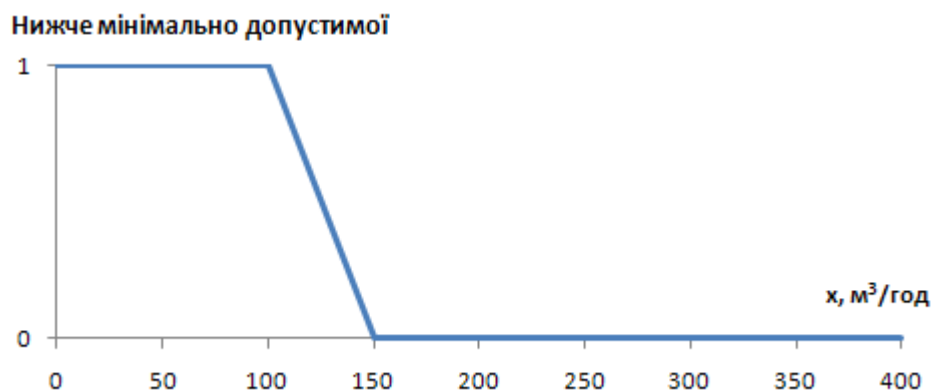


Рисунок 3.1 – Функція приналежності, що описує лінгвістичну змінну «Витрата нижче мінімально допустимої»

Терму А2 «Витрата нижче номінальної» (рис.3.2) відповідає функція приналежності :

$$\mu_{A2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 100 \\ \frac{200-x}{100} & \text{for } 100 \leq x < 200 \\ 0 & \text{for } x \geq 200 \end{cases} \quad (3.3)$$

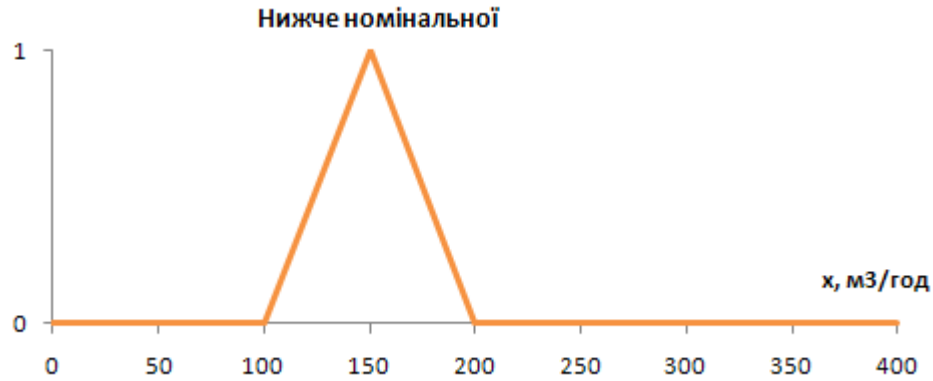


Рисунок 3.2 – Функція приналежності, що описує лінгвістичну змінну «Витрата нижче номінальної»

Номінальній витраті, терм А3 (рис. 3.3) відповідає функція приналежності :

$$\mu_{A3}(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 150 \\ \frac{x-150}{50} & \text{for } 150 \leq x < 200 \\ 1 & \text{for } 200 \leq x < 250 \\ \frac{300-x}{50} & \text{for } 250 \leq x < 300 \\ 0 & \text{for } x \geq 300 \end{cases} \quad (3.4)$$

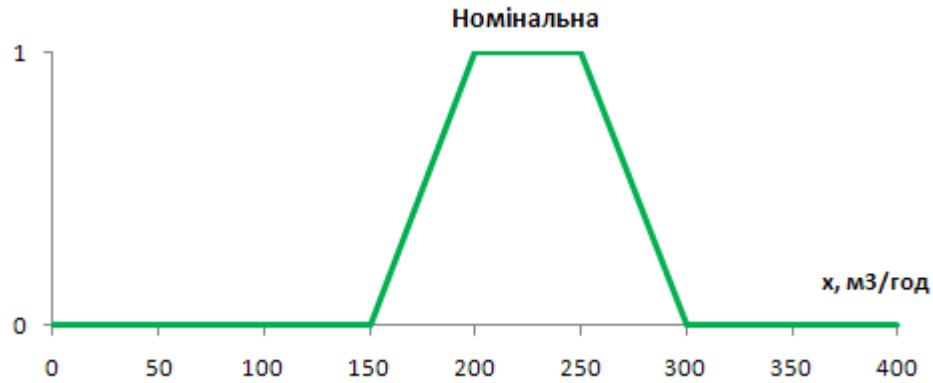


Рисунок 3.3 – Функція приналежності, що описує лінгвістичну змінну «Витрата номінальна»

Терму А4 «Витрата вище максимуму» (рис. 3.4) відповідає функція приналежності :

$$\mu_{A4}(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 300 \\ \frac{x-300}{100} & \text{for } 300 \leq x < 400 \\ 0 & \text{for } x \geq 400 \end{cases} \quad (3.5)$$



Рисунок 3.4 – Функція приналежності, що описує лінгвістичну змінну «Витрата вище максимально допустимої»

Сукупність функцій (3.1)-(3.4) представляє собою модель режимів роботи фільтрів у термінах нечіткої логіки (рис. 3.5).

Отримана модель є вхідною змінною для нечіткого регулятора [99] та описує можливі режими роботи фільтра у термінах нечіткої логіки.

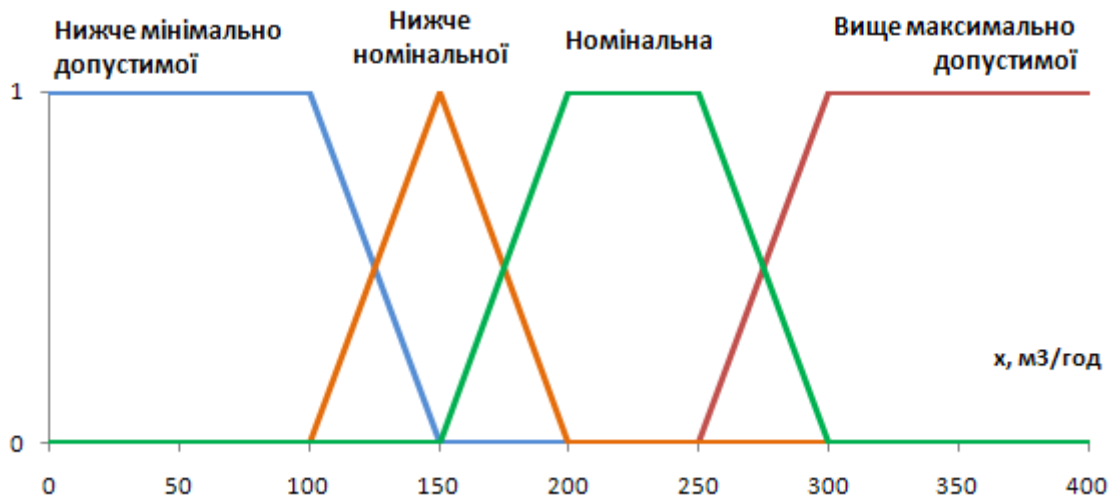


Рисунок 3.5 – Модель режимів роботи фільтра в термінах нечіткої логіки

Моделювання проводилося за допомогою засобів середовища технологічних розрахунків MATLAB. Кількість працюючих фільтрів у кожний момент часу постійне та рівне трьом. Комбінація режимів «нижче

мінімально допустимої» і «вище максимально допустимої» виключені, оскільки виникнення такої ситуації на практиці неможливо.

3.1.2 Формування бази правил нечіткої моделі

Основна перевага нечітких моделей у порівнянні із традиційними математичними моделями пов'язана з можливістю використання для їхньої розробки значно менших обсягів інформації про систему, при цьому інформація може носити наближений, нечіткий характер [100].

Найбільш розповсюдженими алгоритмами вирішення задач нечіткої логіки є Мамдані та Такакі-Сугено. Найважливішим і найбільш часто використовуваним типом нечіткої моделі є модель Мамдані. Дана модель є найпростішою формою моделі Такакі-Сугено. Тобто Такакі-Сугено є узагальненням моделі Мамдані. Це впливає із порівняння форм використовуваних у даних моделях правил.

Оскільки в моделі Такакі-Сугено одержуваний висновок має більш складне математичне представлення, було прийнято рішення щодо використання у роботі алгоритмів моделі типу Мамдані.

У випадку якщо ця модель виявиться незастосовною для рішення даного завдання буде реалізовано перехід до більш складних структур нечітких моделей.

Обрана модель являє собою множину правил, де кожне правило задає в зазначеному просторі деяку нечітку точку. На основі множини нечітких точок формується нечіткий графік, механізм інтерполяції між точками в якому залежить від апарата нечіткої логіки, що використовується [101].

Рішення по переключенню фільтра приймається виходячи із комбінації режимів усіх працюючих у даний момент фільтрів блоку. Кожне продукційне правило записується у вигляді «ЯКЩО ... ТО ...», наприклад:

R: 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).

Набір правил для трьох фільтрів БЗУ представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фрагмент бази продукційних правил

№ правила	Витрата м ³ /год.			Рішення
	Фільтр 1	Фільтр 2	Фільтр 3	
1	2	3	4	5
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 робити

Повний набір правил для трьох фільтрів наведено у Додатку Ж.

Загальна кількість правил може бути розрахована за формулою:

(3.6)

де z – кількість термів лінгвістичної змінної «Режими роботи фільтра»,
 ω – кількість фільтрів.

Число r правил експоненційно залежить від числа w входів моделі та числа z існуючих у ній нечітких множин. Для трьох фільтрів отримуємо кількість правил рівну $4^3 = 64$.

Необхідність врахування усіх можливих комбінацій всередині підмножин вимагається інтерфейсом середовища моделювання. Менша кількість правил у таблиці 3.1 пояснюється виключенням деяких недосяжних на практиці ситуацій.

3.1.3 Алгоритм функціонування механізму дефазифікації

Через те, що в задачах класифікації вирішується задача вибору однієї із можливих дій при реалізації процедура дефазифікації зводиться до вибору правила з максимальним ступенем приналежності, тобто застосовується метод «найбільше із максимумів» (LOM) [102-103]. Функції приналежності, що описують вихідну змінну, представлено на рисунку 3.6.

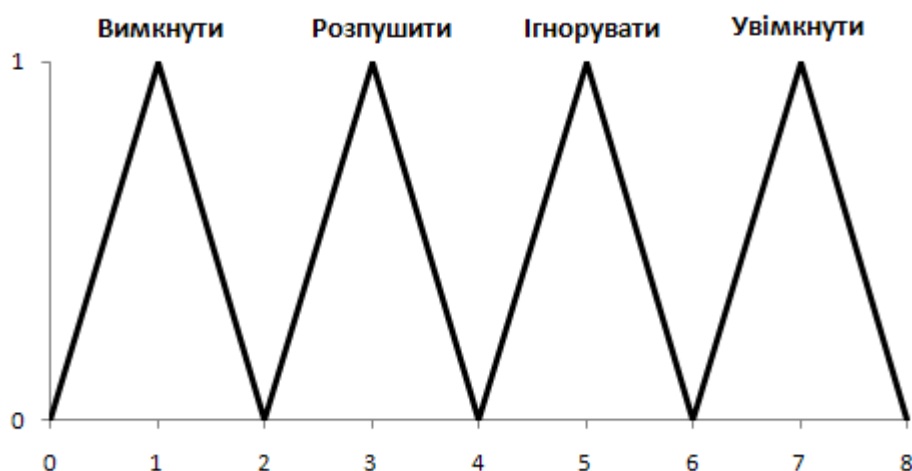


Рисунок 3.6 – Вихідна змінна

3.1.4 Реалізація нечіткого алгоритму керування у середовищі MatLab

Для моделювання системи нечіткого керування розподілом навантаження між фільтрами БЗУ використовувалися можливості середовища технологічних розрахунків MATLAB, а також супутньої системи для моделювання динамічних нелінійних систем Simulink, системи розробки нечітких систем керування Fuzzy Logic Toolbox.

Система моделювання динамічних нелінійних систем Simulink являє собою інтерактивне середовище візуального програмування, у якій користувач «збирає» модель динамічної системи з типових блоків. Після проведення розрахунків, є можливість проаналізувати зміну сигналу в будь-якій точці системи. Simulink дозволяє моделювати лінійні, нелінійні, безперервні, дискретні й багатомірні системи.

Система розробки нечітких систем керування Fuzzy Logic Toolbox має простий і добре продуманий інтерфейс, що дозволяє легко проектувати й діагностувати нечіткі моделі. Графічні засоби Fuzzy Logic Toolbox дозволяють інтерактивно відслідковувати особливості поведінки системи. Fuzzy Logic Toolbox призначена для спільної роботи з Simulink.

3.1.4.1 Розроблення нечіткої системи керування засобами системи Fuzzy Logic Toolbox

У якості інструмента для реалізації розробленого нечіткого алгоритму прийняття рішення була використана система Fuzzy Logic Toolbox.

На рисунку 3.7 представлено діалогове вікно завдання нечіткої моделі. Редактор дозволяє обрати вигляд функцій приналежності та зробити ручне налаштування параметрів нечіткої системи. У даному випадку задано три вхідні лінгвістичні змінні «Режими роботи фільтра» (filter1, filter2, filter3) і вихідна змінна (reshenie). Кожній із лінгвістичних змінних (filter1, filter2, filter3) задані чотири терми (LowLow, Low, Normal, Max) – відповідні

режимам «Нижче мінімально можливого», «Нижче номінального», «Номінальний», «Вище максимально допустимого»).

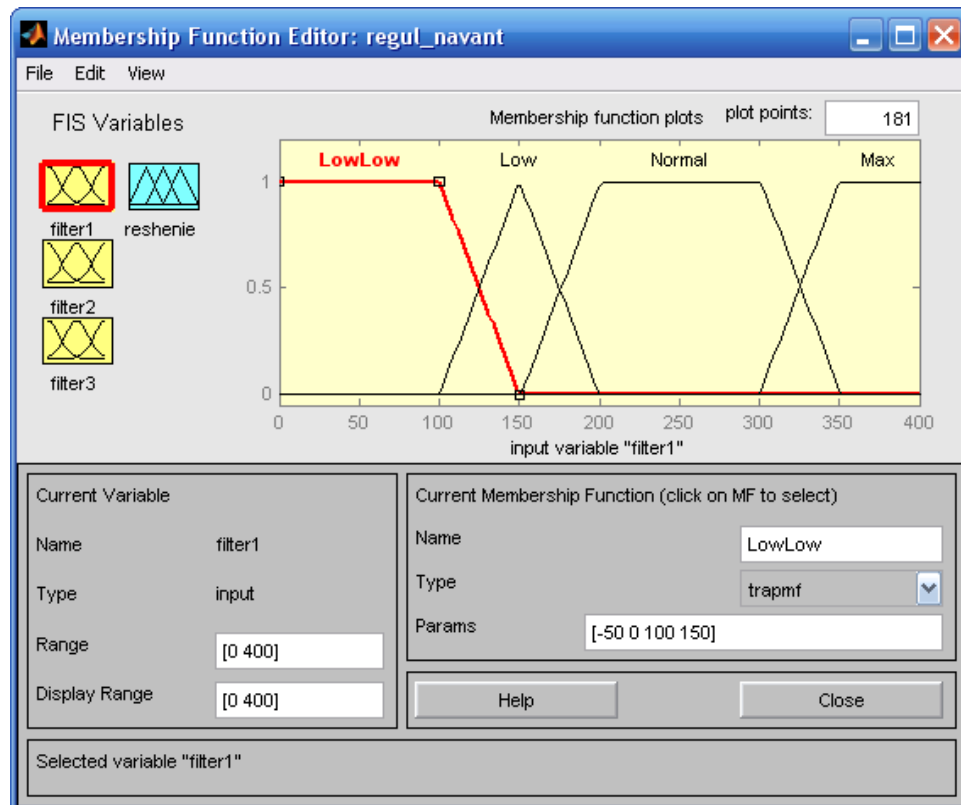


Рисунок 3.7 – Реалізація вхідної змінної для нечіткого регулятора в середовищі Fuzzy logic Toolbox

На рисунку 3.8 представлено діалогове вікно завдання нечітких правил. Редактор дозволяє явно задати базу нечітких правил. Задаються комбінації всіх режимів та необхідна реакція на кожну із комбінацій.

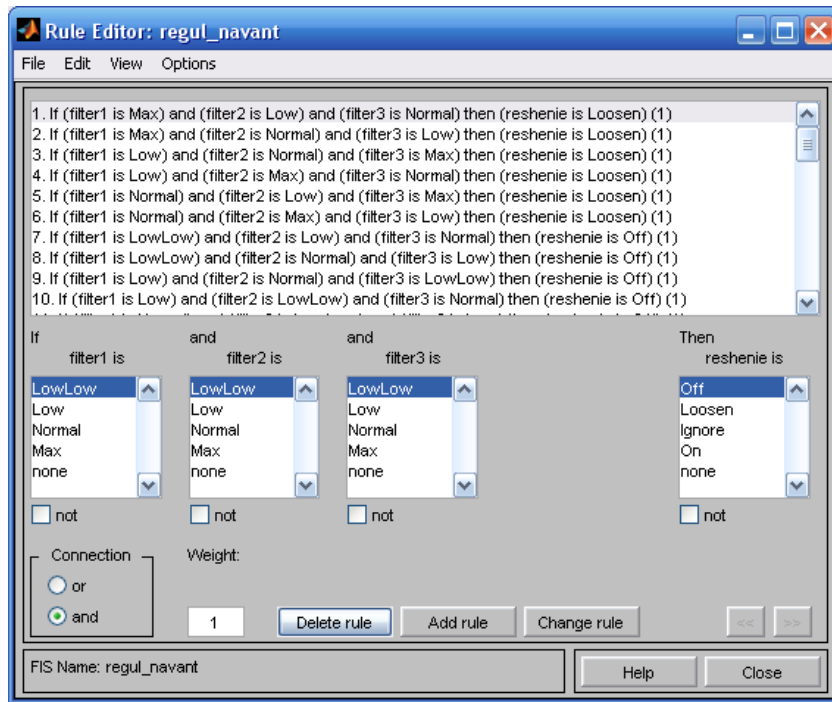


Рисунок 3.8 – Реалізація продукційних правил

На рисунку 3.9 представлено діалогове вікно завдання вихідної змінної типу Мамдані, аналогічно завданню вхідної змінної.

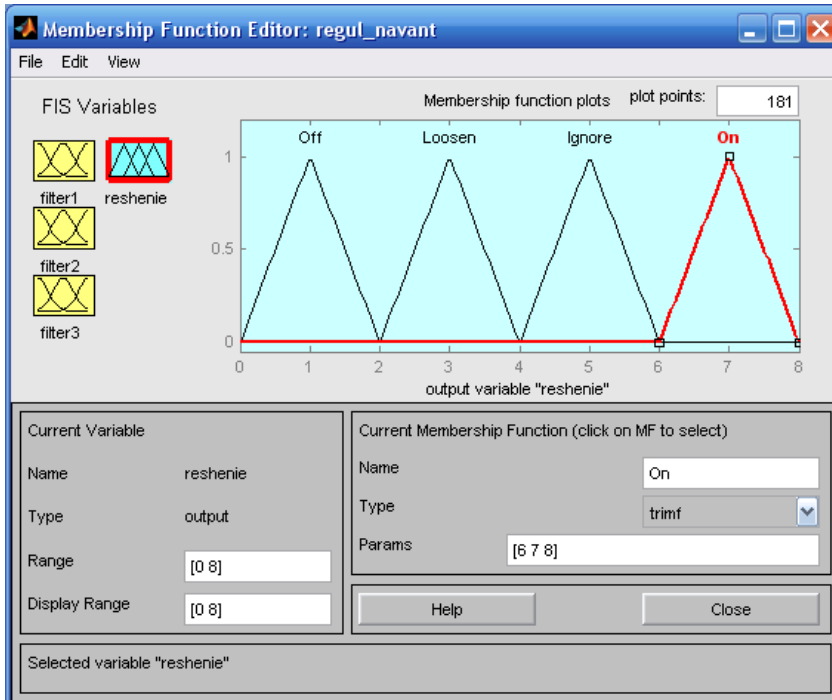


Рисунок 3.9 – Реалізація вихідної змінної

На рисунку 3.10 представлена візуалізація процесу прийняття нечіткого рішення в системі типу Мамдані.

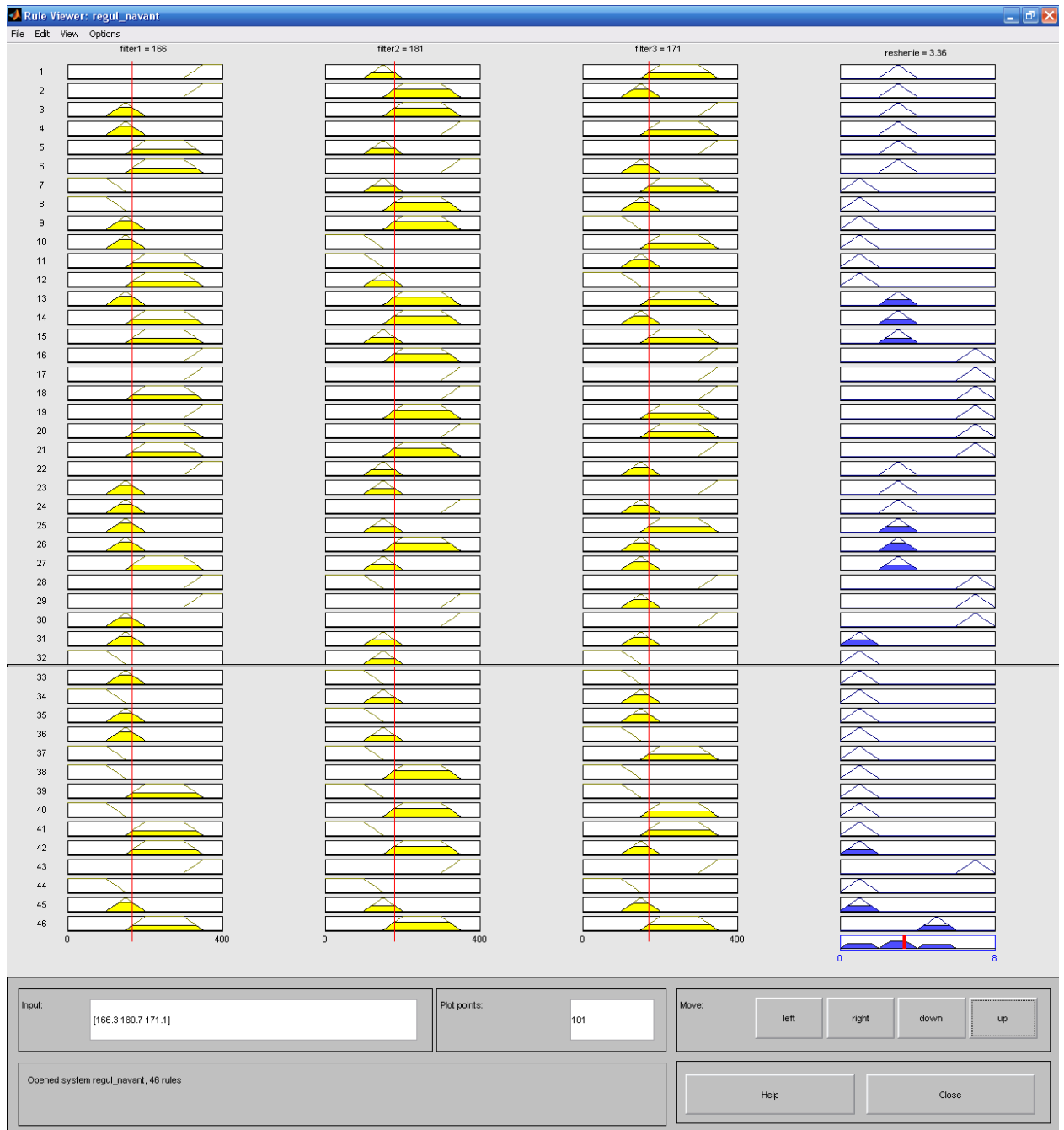


Рисунок 3.10 – Візуалізація процесу прийняття рішення

Залежності вихідної змінної (рішення щодо стану фільтру) від вхідних значень витрат по кожному фільтру представлено у вигляді простору можливих рішень (рис. 3.11).

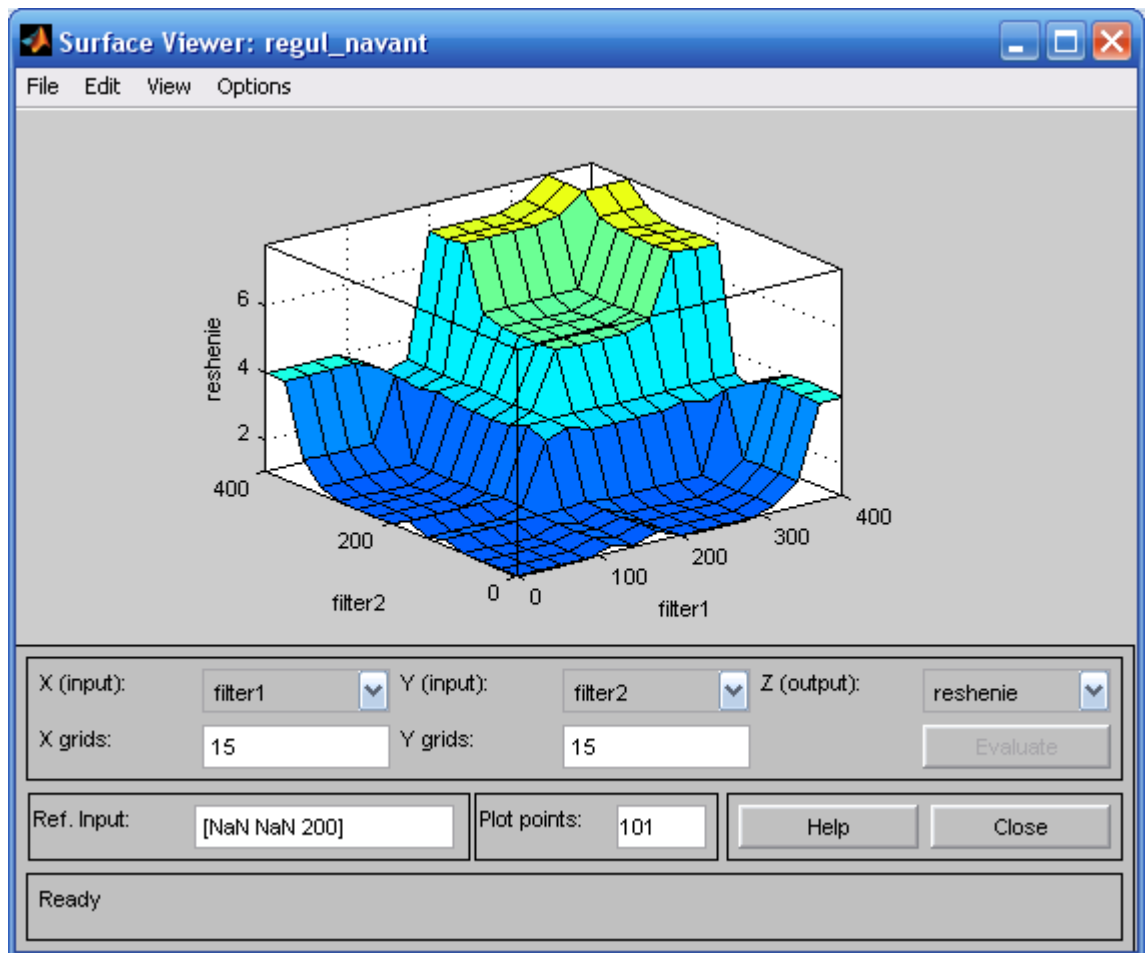


Рисунок 3.11– Поверхня нечіткої моделі прийняття рішень

3.1.4.2 Моделювання нечіткої системи керування у середовищі Simulink

Далі було проведено моделювання роботи нечіткого регулятора. У якості збурюючого впливу було узятो нерівномірне зростання витрат через фільтри від мінімального до максимально допустимого, дане збурення не охоплює всі можливі види збурень, що виникають у процесі роботи БЗУ, однак дозволяє дати якісну оцінку адекватності прийнятих рішень, тому що є найбільш типовим видом збурень для даного об'єкта керування. Simulink-модель процесу прийняття рішення представлена на рисунку 3.12.

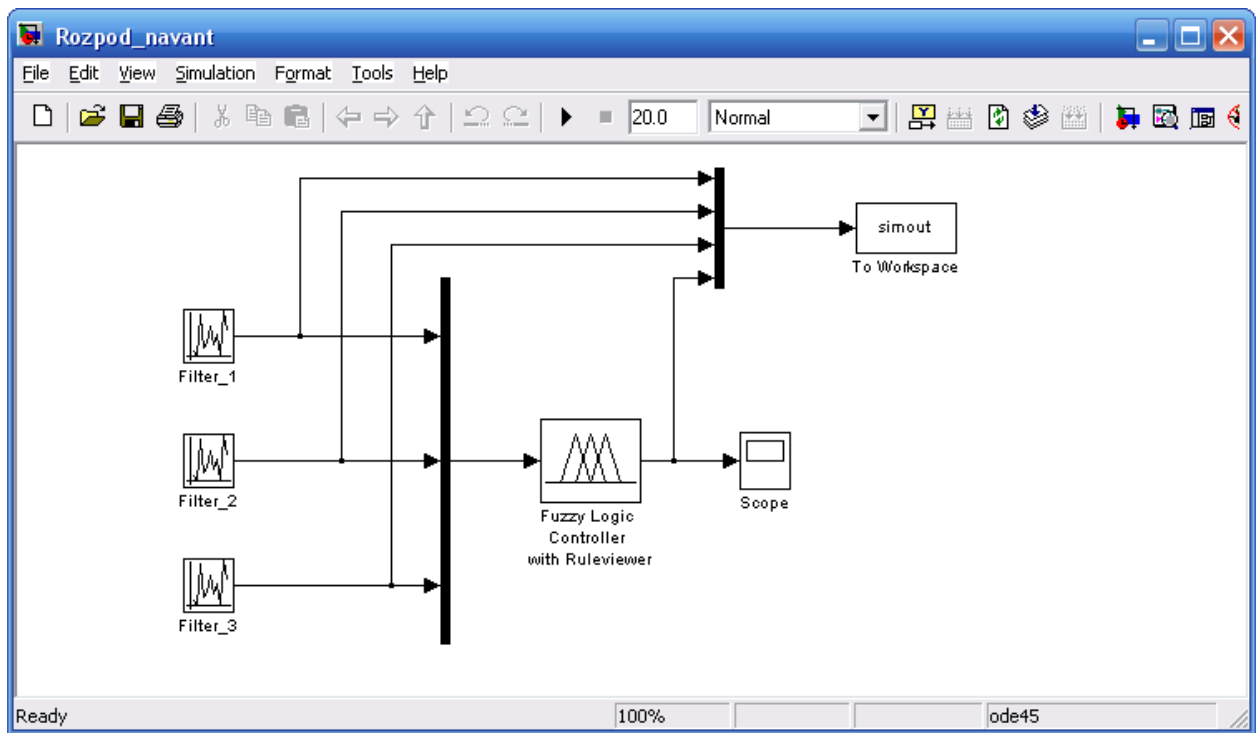


Рисунок 3.12 – Функціональна схема моделювання нечіткої системи керування

Результати моделювання роботи нечіткої системи керування типу Мамдані наведені на рисунку 3.13. У верхній частині рисунка показаний графік зміни витрат через фільтри, на нижній наведені рішення прийняті нечітким регулятором залежно від режимів роботи фільтрів у кожний момент часу. Регулятор у цьому випадку працює в режимі «порадника» – пропонує розв'язок, але не виконує його.

На прикладі розглянута ситуація, коли загальна витрата на блок змінюється від 350 м³/год. до 930 м³/год. При цьому, через різні гідравлічні опори фільтрів витрата через них змінюється не однаково. При малій витраті регулятор приймає рішення «Вимкнути» один із фільтрів. При деякому збільшенні витрати частина фільтрів входять у номінальний режим та починають діяти інші правила. Регулятор пропонує виконати розпушування.

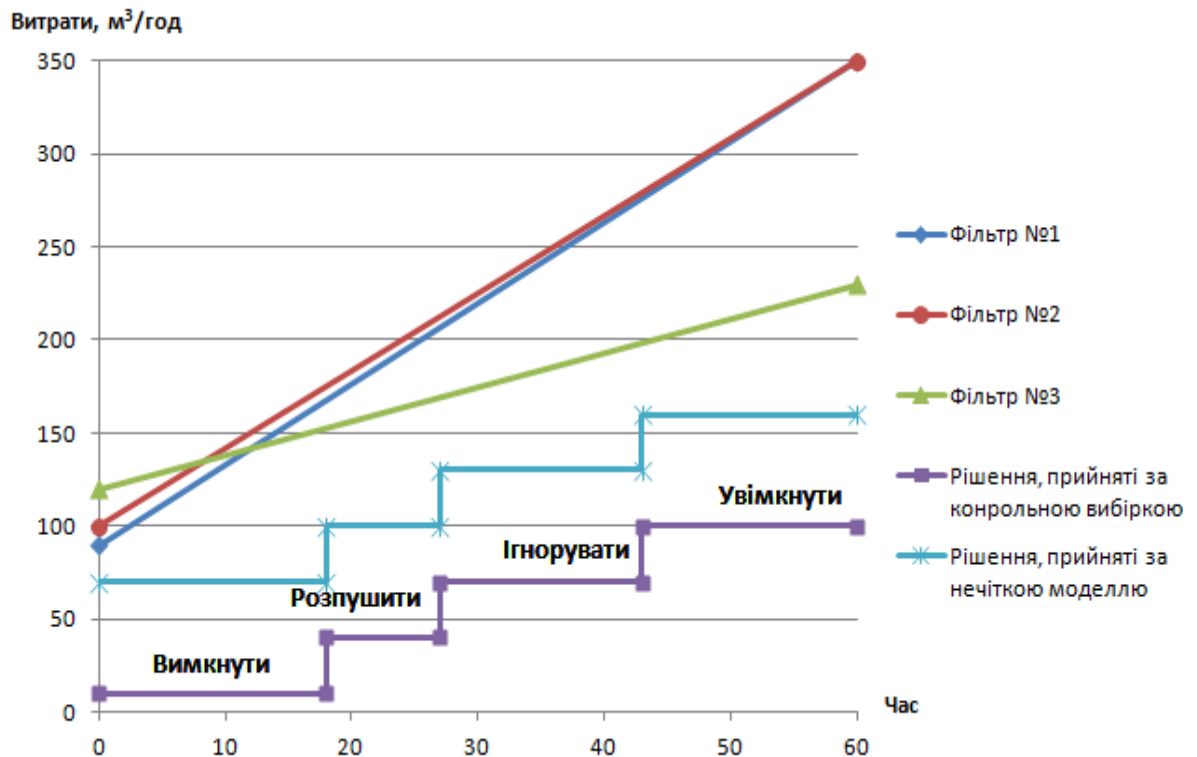


Рисунок. 3.13 – Результати моделювання нечіткої системи керування

Подальше збільшення витрат переводить усі фільтри в номінальний режим і регулятор реагує на це зміною рішення на «Ігнорувати». Зростання витрат вище номінального приводить до прийняття регулятором рішення «Увімкнути».

У результаті порівняння нечітких рішень із еталонною вибіркою, що співпали на 100 %, встановлено адекватність моделі нечіткої системи керування.

РОЗДІЛ 4

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТАНОМ ФЗД БЗУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ТИПУ ВВЕР-1000

Системи автоматичного управління та контролю (САУ) є невід'ємною частиною сучасних АЕС і відіграють ключову роль у забезпеченні їх надійної та безпечної роботи. САУ для АЕС зазвичай служать для вирішення двох основних завдань: автоматичне керування технологічними процесами (ТП) і автоматичний контроль параметрів та режимів роботи АЕС [106-108].

Сучасні САУ, що застосовуються на АЕС України, мають трирівневу розподілену архітектуру. Система керування, що розроблена у рамках даного дисертаційного дослідження, відноситься до середнього рівня ієрархії.

Для реалізації поставленої задачі було використано програмне та апаратне забезпечення розподіленої системи керування Experion PKS (Process Knowledge System – система знань про процес) фірми Honeywell, що є однією із лідерів в області автоматизації виробництв на території України та за її межами.

Розроблені стратегії керування у подальшому можуть бути адаптовані для контролерів АЕС (наприклад, контролера Siemens серії S7-300, що широко використовується у системах автоматичного контролю АЕС [109]), шляхом перенесення аналогічних налаштувань відповідних функціональних блоків.

Стратегії управління системи Experion PKS будуються за допомогою програми побудови стратегій Control Builder – графічного, об'єктно-орієнтованого інструментарію [110].

Для реалізації алгоритму керування необхідно створити модуль із реалізованими у ньому та об'єданими між собою функціональні блоки.

Отже, для вирішення поставленої задачі було обрано систему Experion PKS фірми Honeywell, перевагою якого є можливість візуального конфігурування стратегій керування. Тобто використовуючи елементи

бібліотеки програмного забезпечення, так звані функціональні блоки, є можливість сконфігурувати стратегію керування технологічним процесом у візуальному середовищі Control Builder, що входить до складу системи Experion PKS.

4.1 Розроблення та реалізація комплексних стратегій керування процесом знесолення турбінного конденсату АЕС із ВВЕР-1000

Виходячи з опису процесу очищення води другого контуру, специфіки обладнання і хімічних явищ, котрі були описані в попередніх розділах, виділимо наступні параметри, які безпосередньо впливають на роботу фільтрів та якість очищення води. Основні технічні вимоги до фільтрів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні технічні вимоги фільтрів

Показник, одиниці виміру	Фільтр		
1	2	3	4
Умовний діаметр, мм	2500	1000	1000
Фільтруючий матеріал	КУ-2-8	КУ-2-8	АВ-17-8
Продуктивність фільтра, м ³ /год.	50	40	40
Максимально допустимий перепад тиску, кгс/см ²	1,0	1,5	1,5

В таблиці 4.2 наведені вимоги до якості живильної води ПГ

Таблиця 4.2 – Норми якості живильної води ПГ при експлуатації енергоблоку на енергетичному рівні більше 35%

Показник, одиниці виміру	Діапазон допустимих значень показників
1	2
Величина рН при 25°C, одиниць	9,0±0,2(8,8–9,3) *
Питома електропровідність Н-катионованої проби, мкСм/см, не більше	0,3

1	2
Масова концентрація натрію, мкг/дм ³ , не більше	-
Масова концентрація хлорид-іонів, мкг/дм ³ , не більше	-
Масова концентрація сульфат-іонів, мкг/дм ³ , не більше	-
Масова концентрація кисню, мкг/дм ³ , не більше	10 **
Примітки. * При корекційній обробці середовища морфоліном; ** Після деаератора.	

Тобто, можна зробити висновок, що величини, які впливають на роботу фільтрів та вказують на якість очищеної води наступні:

— перепад тиску являється рушійною силою процесу фільтрації та вказує на забитість фільтруючого матеріалу, повинен становити для фільтрів які досліджувались 0,25 МПа;

— температура впливає на іонний обмін, чим більша температура, тим швидше відбувається обмін в аніонітному і катіонітному фільтрі, але при високих температурах відбувається руйнування фільтруючого матеріалу і винос його в тракт другого контуру, допустиме значення температури фільтрованої води < 45 °С, максимально допустиме значення температури рівне 55 °С;

— концентрація іонів Na у відфільтрованій воді вказує на виснаженість катіонітного фільтру, допустима концентрація у відпрацьованій воді становить не більше 3,0 мкг/дм³;

— питома електропровідність вказує на концентрацію солей у відфільтрованій воді, допустиме значення становить менше 0,5 мкС/см.

Задля перевірки можливості реалізації стратегій керування за визначеними параметрами та їх працездатності, було прийняте рішення спочатку побудувати модуль керування за одним із параметрів із подальшим масштабуванням системи керування у разі позитивної верифікації його роботи.

Тому розглянемо далі алгоритм розроблення стратегії керування температурним режимом роботи БЗУ другого контуру АЕС [111-112].

4.1.1 Побудова та верифікація модуля керування температурним режимом роботи БЗУ другого контуру АЕС

Відповідно до основних вимог щодо умов експлуатації іонітів на АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000, встановлено, що номінальне значення температури конденсату перед ФЗД БЗУ знаходиться у межах $20 \div 40$ °С, максимально допустима температура при цьому становить 55 °С. При підвищенні температури зерна іонітів поступово руйнуються, безповоротно втрачаючи свої іонообмінні властивості (рис. 4.1).

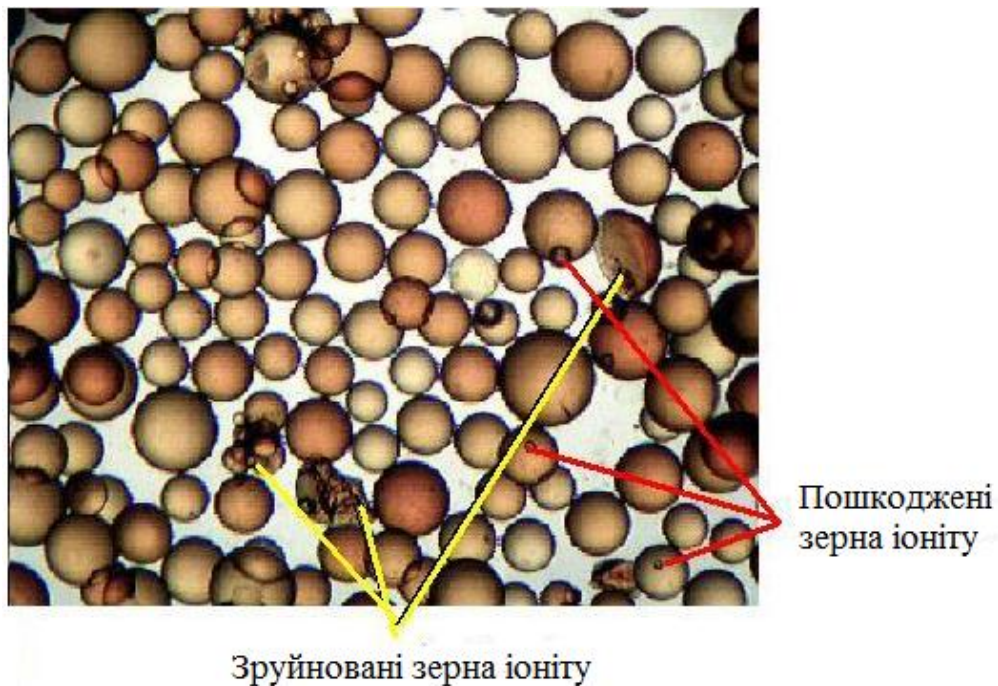
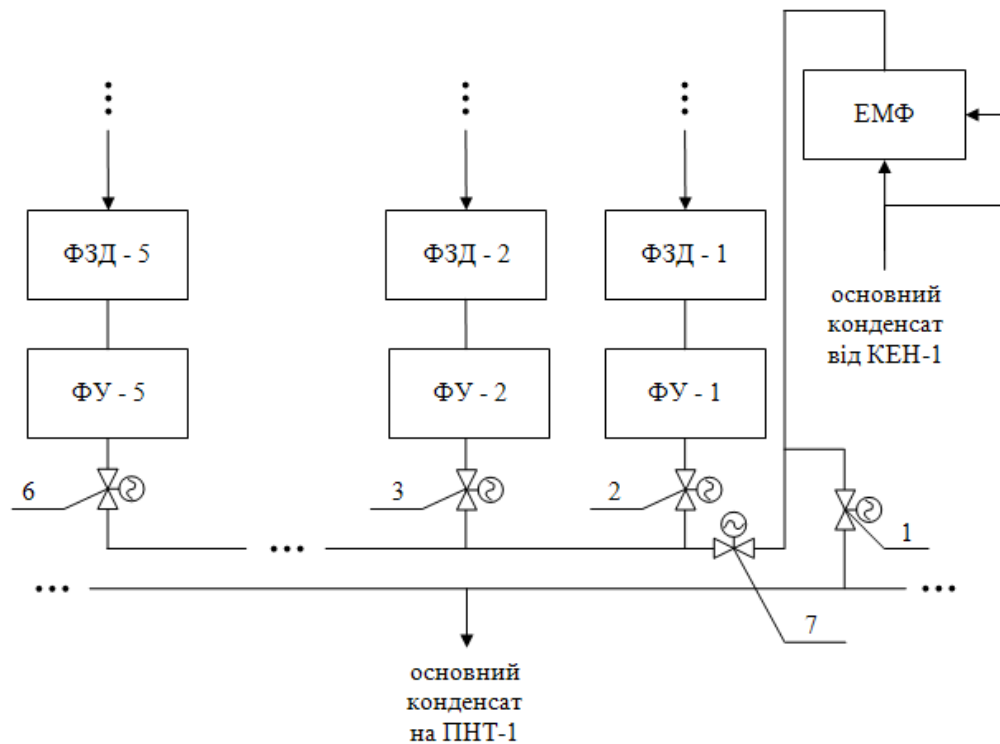


Рисунок 4.1 – Дефектні зерна іонообмінної смоли

Отже, при побудові стратегії керування необхідно передбачити відкриття байпасу ФЗД, закриття секційної арматури та арматури подачі конденсату на ФЗД при підвищенні температури основного конденсату до 55 °С [113]. Фрагмент технологічної схеми БЗУ представлений на

рисунку 4.2. Арматура, представлена на рисунку, на реальних АЕС являє собою вентиля із електроприводами.



ЕМФ – електромагнітний фільтр; ФУ – фільтр-уловлювач; КЕН-1 – конденсатний електронасос першої ступені; ПНТ-1 – підігрівач низького тиску; 1 – байпас ФЗД; 2÷6 – арматура подачі конденсату на ФЗД; 7 – секційна арматура

Рисунок 4.2 – Фрагмент принципової технологічної схеми БЗУ

Для створення алгоритму керування необхідно створити модуль із реалізованими у ньому та об'єднаними між собою функціональними блоками. На рисунку 4.3 наведений проект модуля керування температурним режимом БЗУ.

Значення поточної температури конденсату перед БЗУ (блок T_cond) порівнюється із заданим значенням температури (Set_point_T), рівним 55°C (блок GEA – виконує функцію порівняння «більше ніж або рівно»).

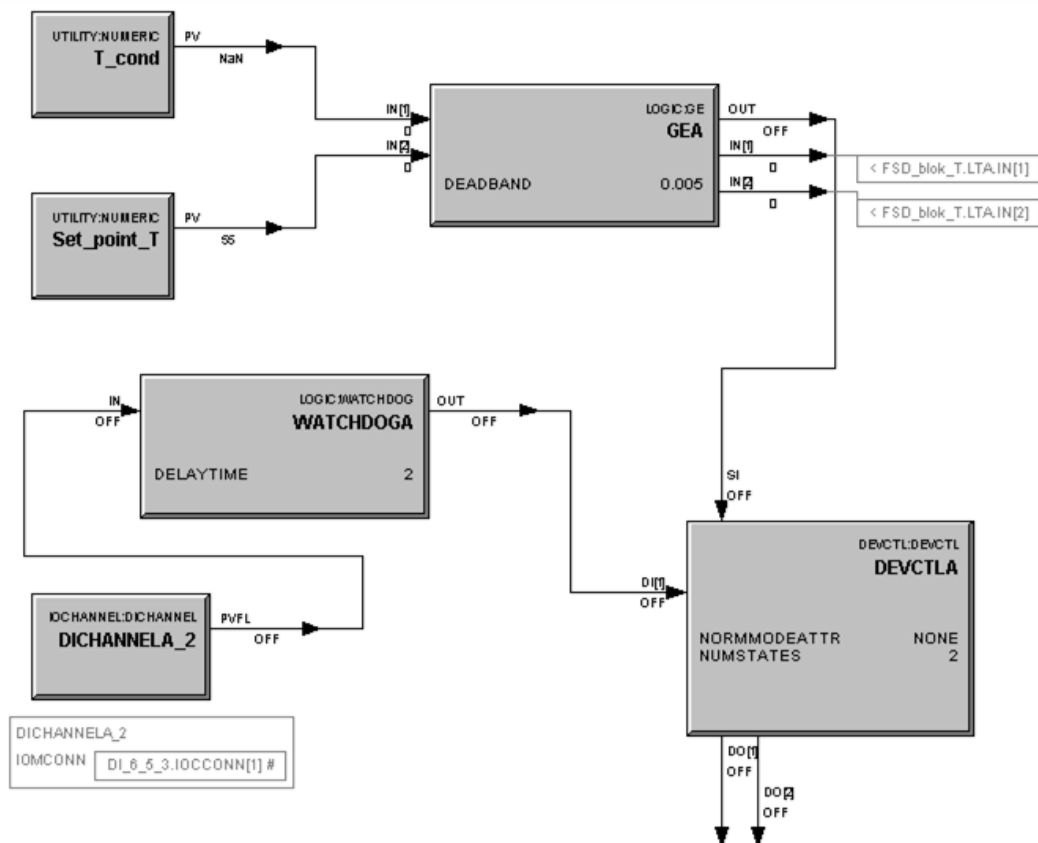
Даний блок встановлює дискретний вихід (OUT) у стан ON тільки тоді, коли один заданий вхід (IN[1]) більше або рівний іншому (IN[2]): якщо $IN[1] \geq IN[2]$, тоді: $OUT = ON$; якщо $IN[1] < IN[2]$, тоді: $OUT = OFF$.

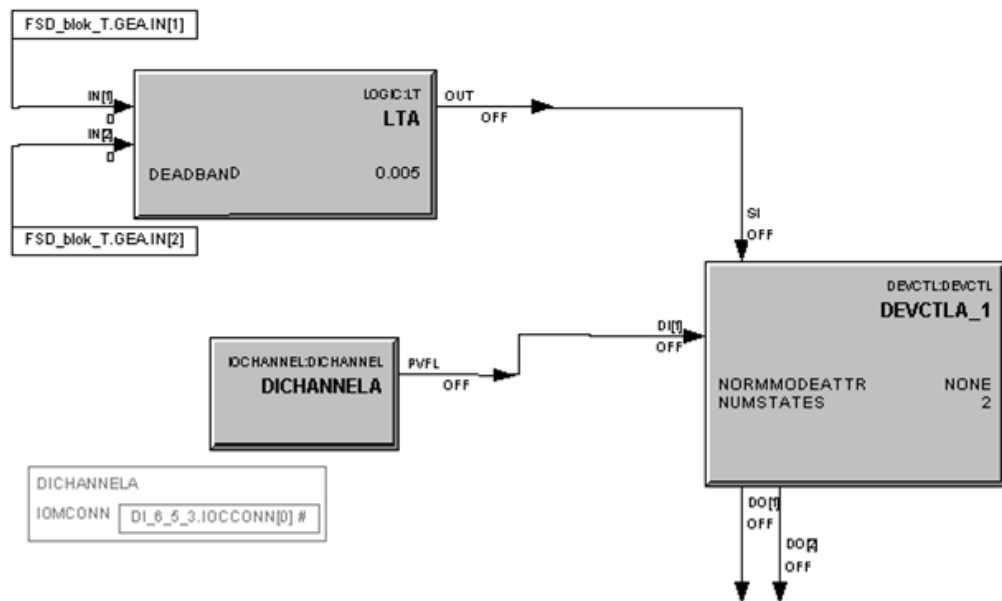
Отримане значення виходу передається на вхід блоку DEVCTLA, що реалізує функцію керування із декількома входами та виходами, які забезпечують зв'язок із дискретним пристроєм, у нашому випадку вентиль із електроприводом.

Вентиль може знаходитись у відкритому (DO[1]) або закритому стані (DO[2]), відповідно до його поточного стану DI[1] та вхідної умови від блоку GEA(SI): якщо SI = OFF та DI[1] = OFF, тоді: DO[1] = OFF та DO[2] = OFF; якщо SI = ON та DI[1] = OFF, тоді: DO[1] = OFF та DO[2] = ON; якщо SI = ON та DI[1] = ON, тоді: DO[1] = ON та DO[2] = OFF.

Метою випробувань є перевірка умови блокування ФЗД при підвищенні температури основного конденсату до 55°C та функціонування системи керування БЗУ в умовах експлуатації.

Виходячи із реальних даних нормальної експлуатації АЕС, розглянемо два сценарії розвитку подій: 1 – поточне значення температури знаходиться у допустимих межах, тобто < 55°C; 2 – перевищення граничнодопустимого значення температури від номінального, що рівне 55°C.





б

а – початковий стан – вентиль відкритий; б – початковий стан – вентиль закритий

Рисунок 4.3 – Структура модуля керування температурним режимом у Control Builder

Результати розвитку першої події наведено на рисунку 4.4.

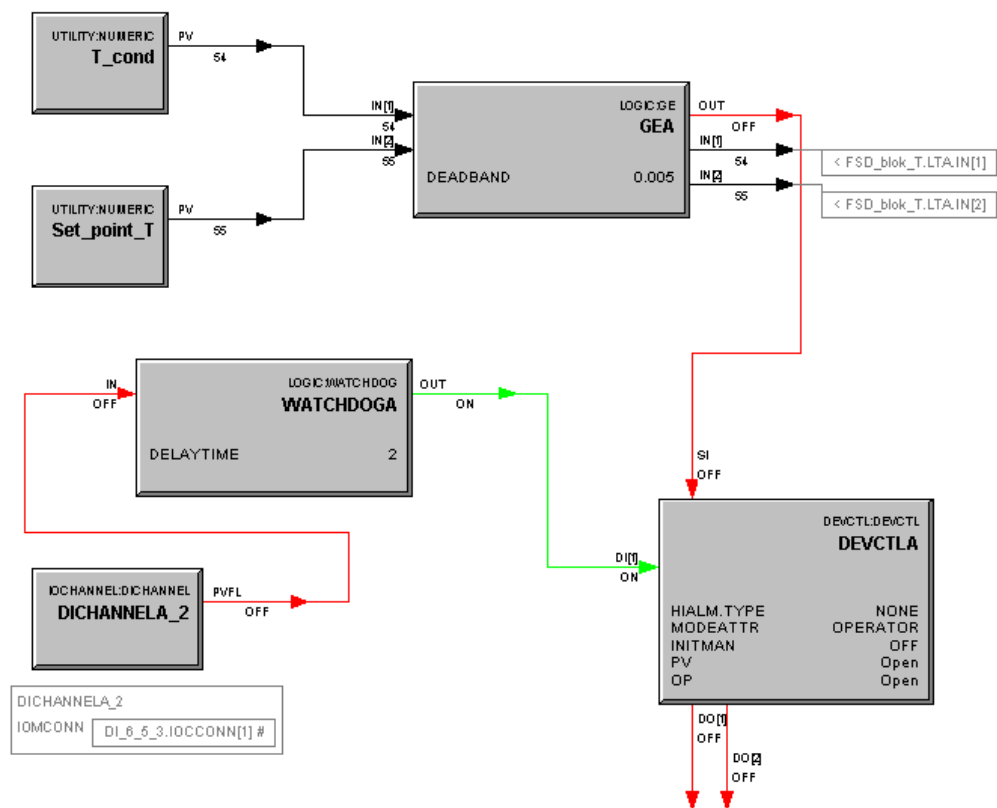


Рисунок 4.4 – Структура формування вихідного сигналу ($T < 55\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Вхідне значення температури конденсату рівне $54\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є меншим за задане. Блок GEA видає дискретний вихідний сигнал OUT рівний OFF, тобто умова не виконується. Вентиль у початковому стані відкритим ($\text{DI}[1] = \text{ON}$). Вихідні сигнали блоку DEVCTLA залишаються у стані OFF, відповідно початковий стан вентиля не змінюється. Отже арматура залишається відкритою.

Розглянемо результати розвитку другої події (рис. 4.5). Вхідне значення температури конденсату $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є більшим за задане. Блок GEA утворює дискретний вихідний сигнал OUT рівний ON, тобто умова виконується. Вентиль у початковому стані є відкритим ($\text{DI}[1] = \text{ON}$).

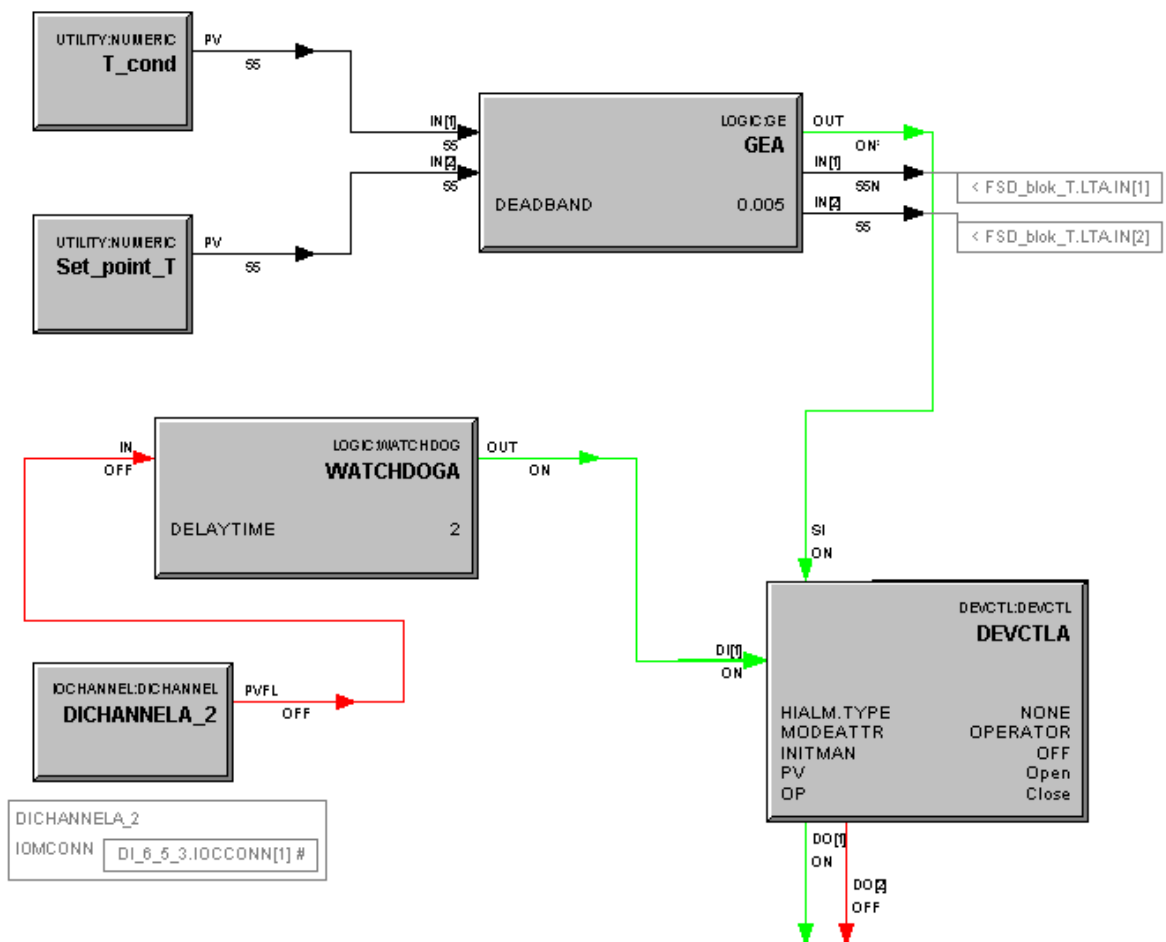


Рис. 4.5. Структура формування вихідного сигналу ($T \geq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Вихідний сигнал блоку DEVCTLA встановлюється у стан ON, відповідно подається сигнал на закриття вентиля.

Модулі керування секційною арматурою та арматурою подачі конденсату на ФЗД мають аналогічну структуру та принцип роботи.

Отримані результати підтверджують адекватність роботи розробленої стратегії управління. Тому є усі підстави, щоб використати їх при побудові комплексної системи керування БЗУ за всіма основними показниками якості робочого середовища другого контуру АЕС.

4.1.2 Розроблення системи блокувань БЗУ другого контуру АЕС

Виходячи із основних параметрів, які впливають на роботу фільтрів було побудовано дві стратегії управління процесами водоочищення другого контуру АЕС з ВВЕР-1000, одна для управління пристроями із дискретним інтерфейсом, інша для тестування в моделюючих середовищах із підтримкою протоколу передачі даних COM. На рисунку 4.6 наведена стратегія керування пристроями із дискретним інтерфейсом створена в середовищі Control Builder [114].

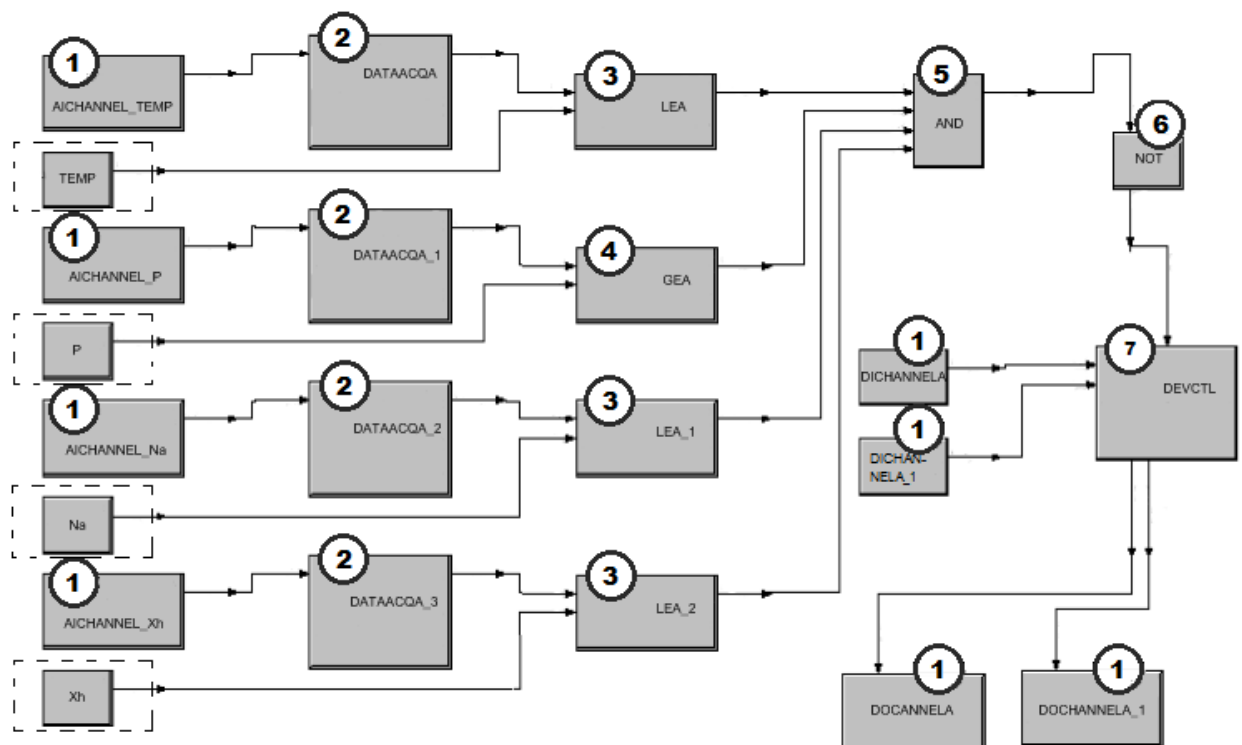


Рисунок 4.6 – Система блокувань БЗУ другого контуру енергоблоку

Вміст кожної стратегії можна поділити на три функціональні групи: прийом і зчитування даних, та блоки передачі даних; ряд логічних операцій для виконання блокуючого управління на основі вхідних даних; блок управління виконавчим приладом [115].

Кожна група описана рядом функціональних блоків.

При побудові стратегії були використанні блоки зчитування (AICHANNEL), запису даних (DOCHANNEL) та блоки обробки даних (рис. 4.7).

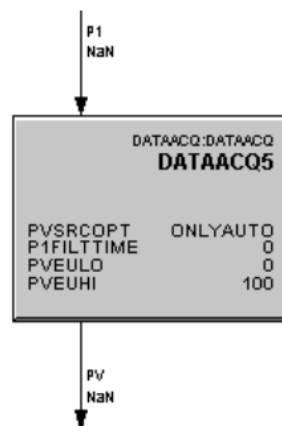


Рисунок 4.7 – Вигляд блоку обробки даних

Блок DATAACQ перетворює задане значення входу від процесу (P1) в бажане значення виходу (PV). Блок конфігурується для зчитування аналогового входу з функціонального блоку каналу AI (AICHANNEL).

Блоки AICHANNEL, кожен з яких через аналоговий вхід зв'язаний із приладами, які зчитують температуру, перепад тиску, електропровідність, та концентрацію іонів натрію з фільтруючої установки.

Наступна група, блоки логічних операцій. Блоки AND, GE та LE (рис. 4.8).

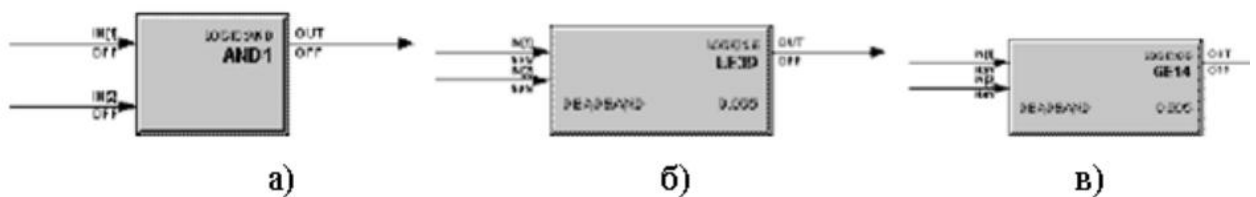


Рисунок 4.8 – Вигляд логічних функціональних блоків

Блок AND встановлює дискретний вихід (OUT) в ON тільки тоді, коли всі входи (IN[1], IN[2], ..., IN[8]) встановлені в ON, в іншому випадку на виході видає OFF.

Блок GE виконує функцію порівняння "більше ніж або дорівнює" (із зоною нечутливості) для одного або двох входів.

Блок LE виконує функцію порівняння "більше ніж або дорівнює" (із зоною нечутливості) для одного або двох входів.

Блок DEVCTL (блок керування пристроєм) реалізує функцію управління з кількома входами і декількома виходами (рис. 4.9), які забезпечує інтерфейс з дискретним пристроєм, таким як двигун, електромагнітний клапан та клапан, керований двигуном. Даний блок містить вбудовані структури для управління блокуваннями і підтримує відображення умов блокування на мнемосхемах або екранах групи і деталювання.

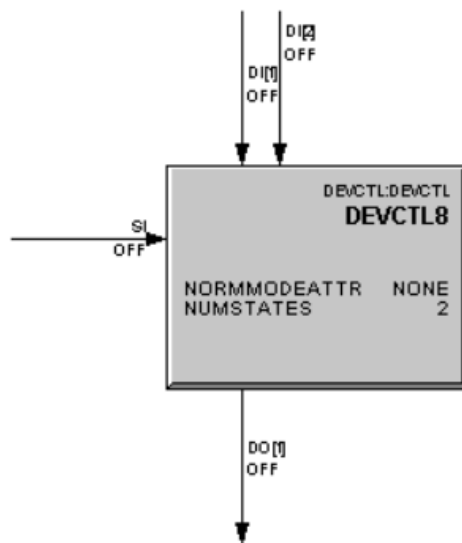


Рисунок 4.9 – Вигляд блоку керування пристроєм

Блок DEVCTL дозволяє маніпулювати безліччю дискретних виходів та інтерпретувати відповідний зворотний зв'язок дискретних входів. Робота полягає в передачі команд, що представляють собою стан параметра OP(командного стану виходу (Commanded Output State)), моніторингу PV(поточного активного стану (Current Active State)), і генеруванні аварійної

сигналізації на основі різних конфігурацій, таких як перевірка досягнення PV командного стану OP.

Блок DEVCTL у синтезованій стратегії керування подає регулюючий сигнал на виконавчий механізм, який, у свою чергу, діє на відповідний клапан. Було припущено, що клапан має 2 стани: відкритий і закритий. На рисунку 4.10 представлено головне вікно конфігурування блоку DEVCTL.

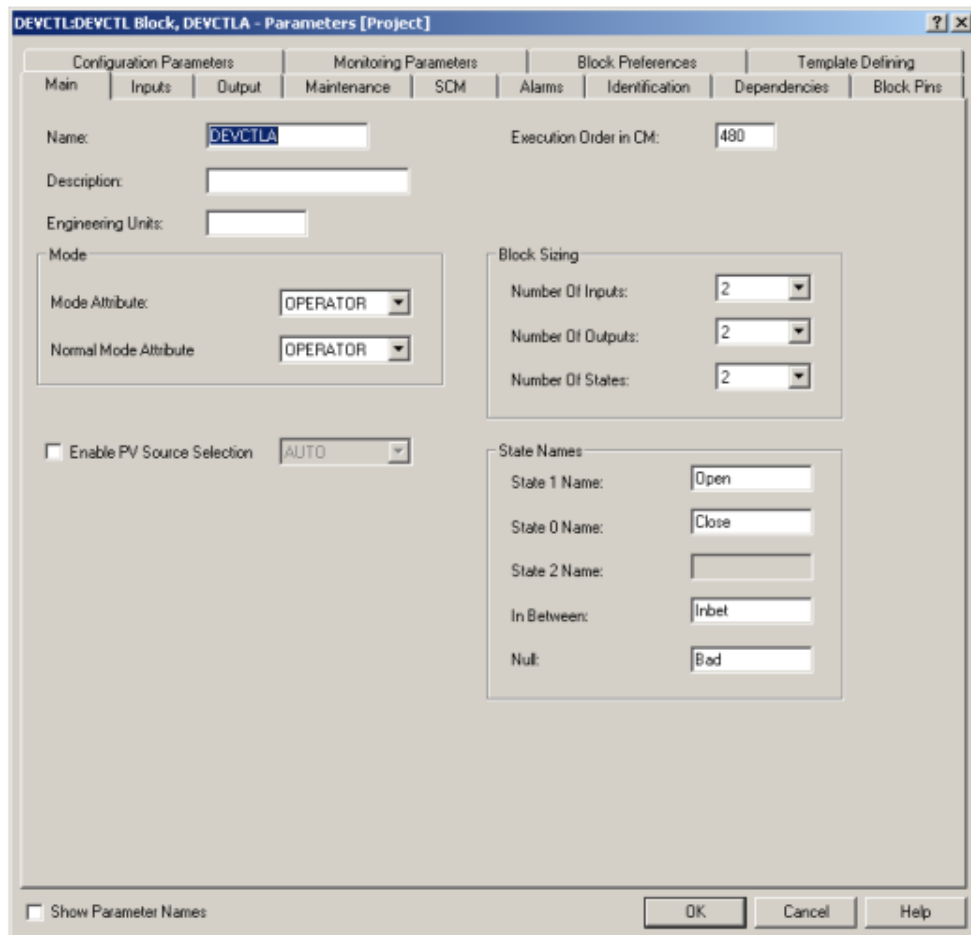


Рисунок 4.10 – Головне вікно налаштування блоку DEVCTL

Режим роботи (Mode Attribute) встановлений в ручний режим(OPERATOR), кількість дискретних входів (Number of Inputs) і виходів(Number of Outputs) встановлено по два, також налаштовано два стани (Number Of States).

На вкладці Input зв'язуються дискретні входи і стани керуючого об'єкту(рис. 4.11).

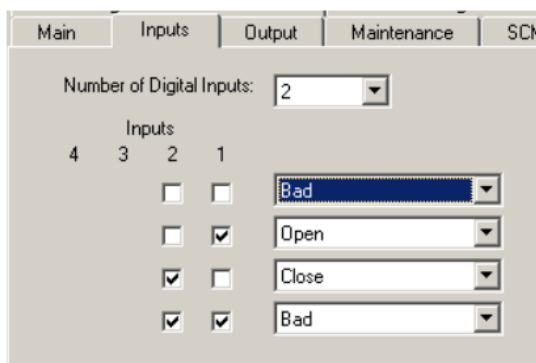


Рисунок 4.11 – Вкладка Input блоку DEVCTL

У наступному вікні (Output) виконується налаштування керуючих сигналів, вибір безпечного стану (Safe OP), та налаштування можливості обходу блокувань безпеки, якщо це потрібно (рис. 4.12).

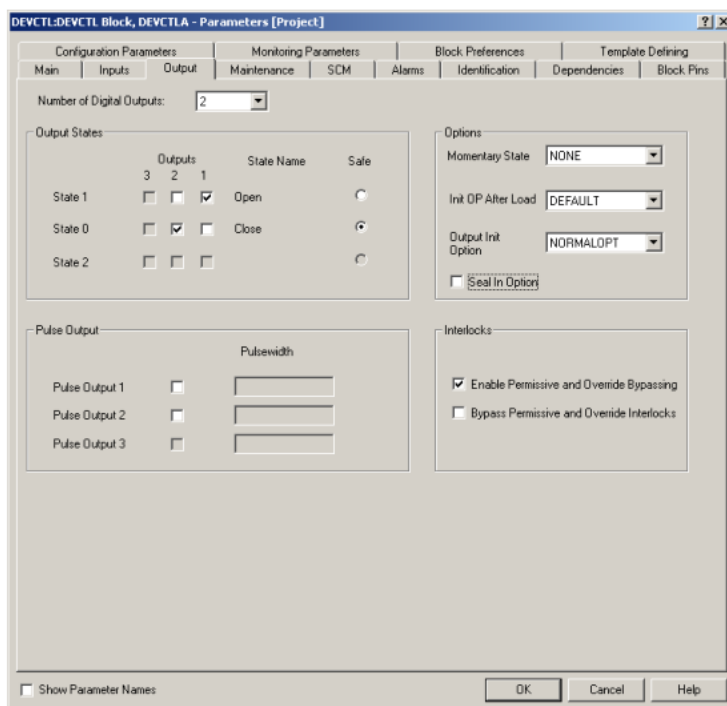


Рисунок 4.12–Вкладка Output блоку DEVCTL

Особливу увагу було приділено налаштуванню поля Safe OP, що відповідає за безпечний стан вихідного сигналу при спрацюванні блокувань. Блок DEVCTL підтримує два типи блокувань: звичайне та безпечне вимкнення блокувань (Override Interlock – OI та Safety Override Interlock – SI).

При спрацюванні SI блокування, стан переходить в стан Safe OP, при такому блокуванні в оператора немає змоги змінити стан, поки блокування

не буде знято. При спрацьовуванні ОІ блокування та за умови правильного налаштування блоку DEVCTL в оператора є можливість обійти блокування. При створенні стратегії керування був обраний саме цей спосіб блокування, задля попередження випадків, коли резервна очисна установка перебуває на регенерації.

У вікні Alarms (рис. 4.13) налаштовується оповіщення на місце оператора про виникнення блокувань, аварійних ситуацій, та виставляються пріоритети ситуації (запис в журнал, відображення на мнемосхемі, та ін.).

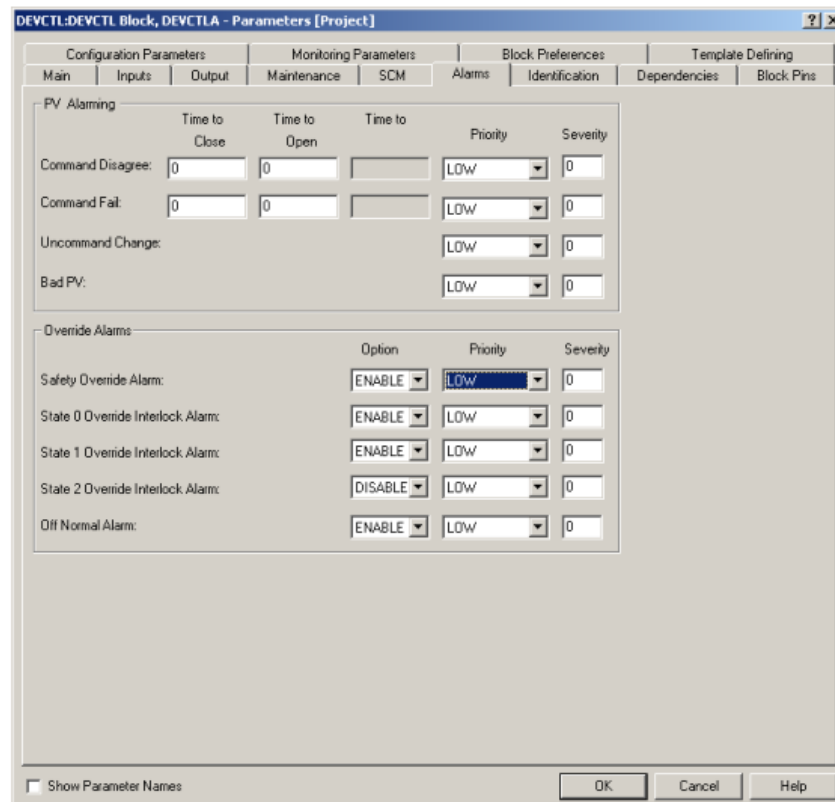


Рисунок 4.13– Вкладка Alarms блоку DEVCTL

4.2 Об'єднання стратегії керування із математичною моделлю БЗУ другого контуру ВВЕР-1000

Процес обміну даними між програмованим логічним контролером (ПЛК) та персональним комп'ютером (ПК) здійснюється за допомогою технології OPC (OLE для управління процесом). OPC представляє собою універсальний програмний інтерфейс, який може використовуватися на

пристроях, що поставляються різними виробниками. В якості промислового стандарту OPC описує обмін даними для різних додатків в умовах промислового виробництва. Працюючи на своєму ПК, користувач може спостерігати, викликати та обробляти дані і події, що відбуваються в системах автоматизації. OPC-інтерфейс є частиною програмного забезпечення, що працює на ПК, і є платформою для систем операторського управління та візуалізації або інших додатків. OPC-інтерфейс базується на моделі «клієнт/сервер». Один компонент надає свої сервіси іншому компоненту через інтерфейси. Інший компонент використовує ці сервіси. Схематично зв'язок між ПЛК та додатком MATLAB на ПК можна зобразити на рисунку 4.14 [116].

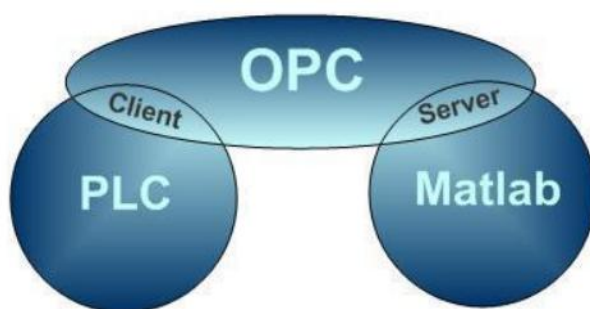


Рисунок 4.14 – Схема зв'язку MATLAB та ПЛК за допомогою OPC

OPC Toolbox – це пакет, який розширює можливості середовища MATLAB і Simulink засобами взаємодії з OLE серверами. Здійснює взаємодію з системами розподіленого управління (SCADA), диспетчерського контролю, захоплення даних.

Отримання математичної моделі БЗУ другого контуру ВВЕР-1000 [117-122] у просторі змінних стану в MATLAB Simulink описано у Розділі 2.

Після запуску математичної моделі дані почали потрапляти до стратегії керування, що свідчить про успішну інтеграцію стратегії керування та математичної моделі БЗУ другого контуру (рис. 4.15).

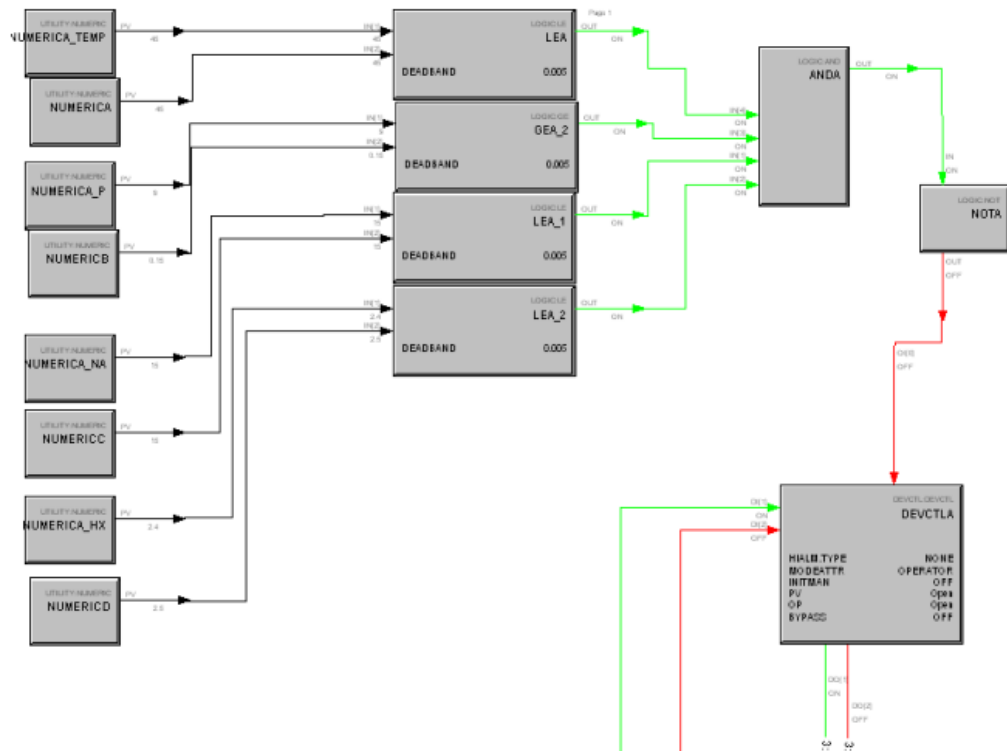


Рисунок 4.15 – Реакція стратегії керування після інтеграції із математичною моделлю БЗУ другого контуру АЕС

При відхиленні показників від норми відбувається блокування блоку DEVCTL (рис. 4.16).

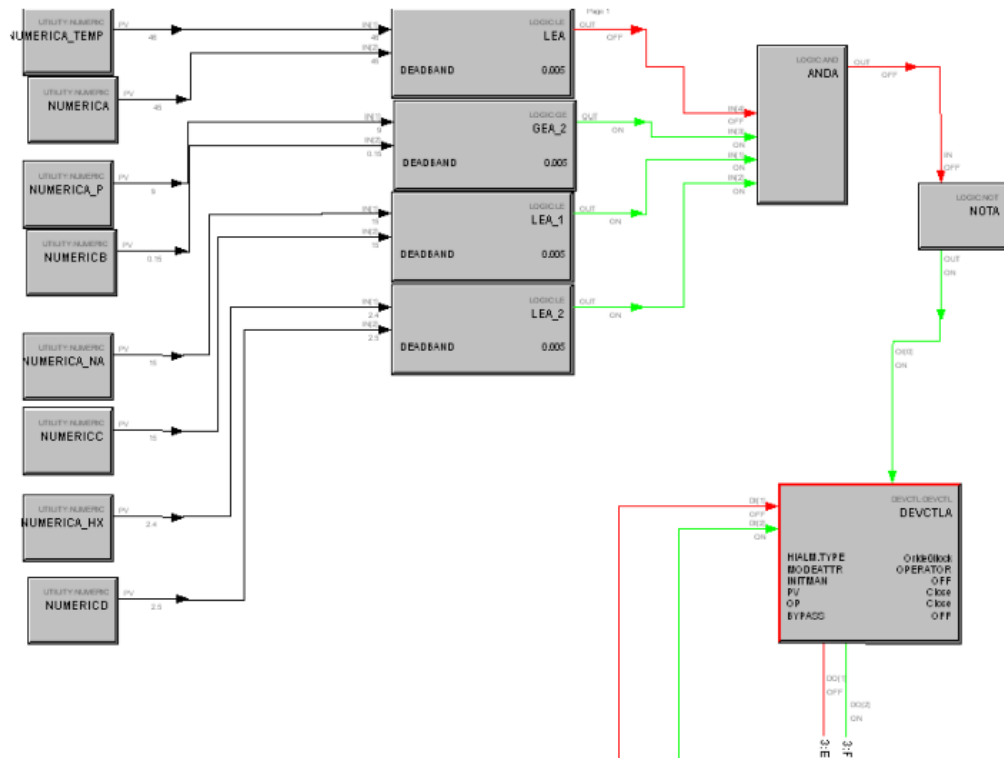


Рисунок 4.16 – Реакція стратегії керування на відхилення показників

4.3 Верифікація комплексної стратегії керування процесом знесолення турбінного конденсату АЕС із ВВЕР-1000

Для тестування використовувалася модифікована стратегія (рис. 4.17)

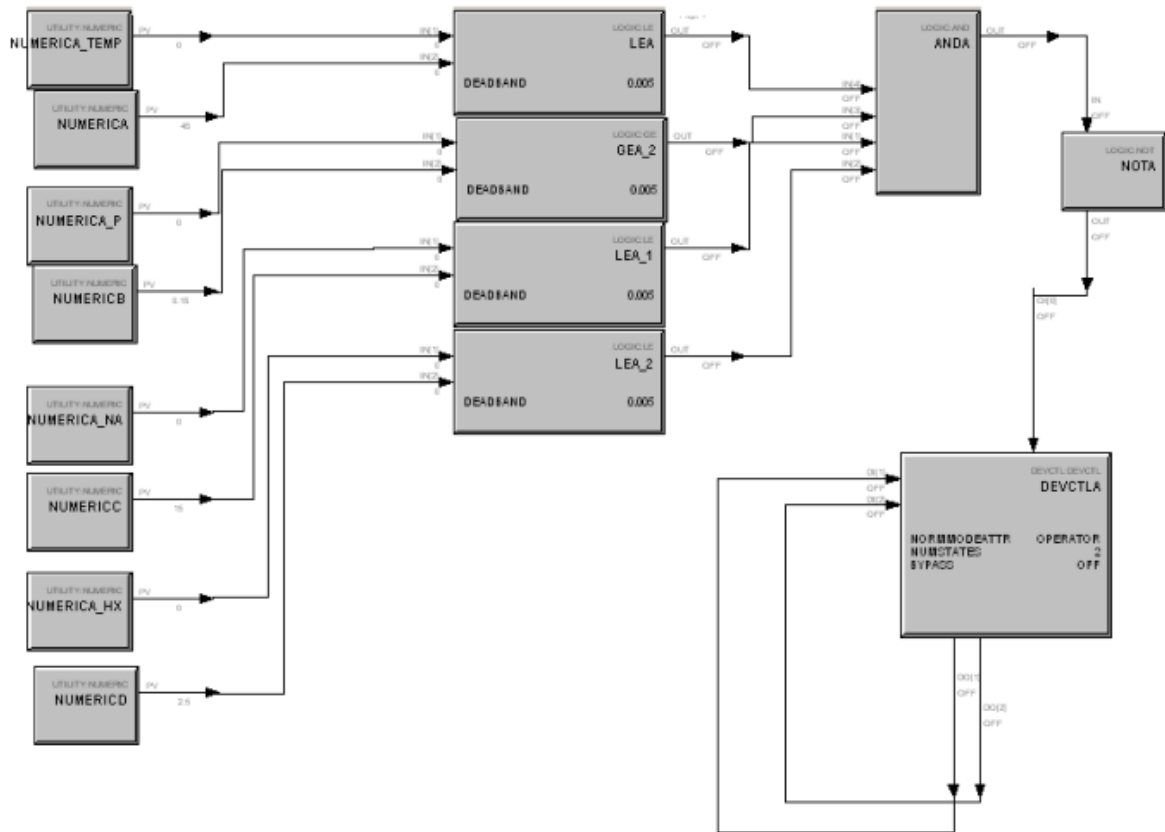


Рисунок 4.17 – Стратегія керування для тестування у моделюючому середовищі

Головною відмінністю даної стратегії являється те, що блоки аналогового входу AICHANNEL і блоки обробки сигналу DATAACQ були замінені на функціональні блоки констант NUMERIC, які через протокол передачі COM зчитують дані з моделюючих середовищ.

COM (Component Object Model) – це технологічний стандарт від компанії Microsoft, призначений для створення програмного забезпечення на основі взаємодіючих компонентів, кожен з яких може використовуватися в багатьох програмах одночасно. Стандарт втілює в собі ідеї поліморфізму, інкапсуляції і об'єктно-орієнтованого програмування.

Також було припущено, що сигнал зворотного зв'язку є миттєвим, тому дискретні виходи на блоці DEVCTL одразу подаються на дискретні входи цього блоку.

Наступним етапом було налаштувати і зв'язати середовище MATLAB із стратегією через OPC Toolbox. На рисунку 4.18 представлена розроблена для тестування програма. Вона складається з блоку OPC Config Real-Time, який відповідає за налаштування зв'язку з сервером на якому розташована стратегія, блоків OPC Write, які нап'ямую зв'язані з блоками NUMERIC, в які відбувається передача даних з MATLAB, та блоків констант для отримання значень в блок OPC Write.

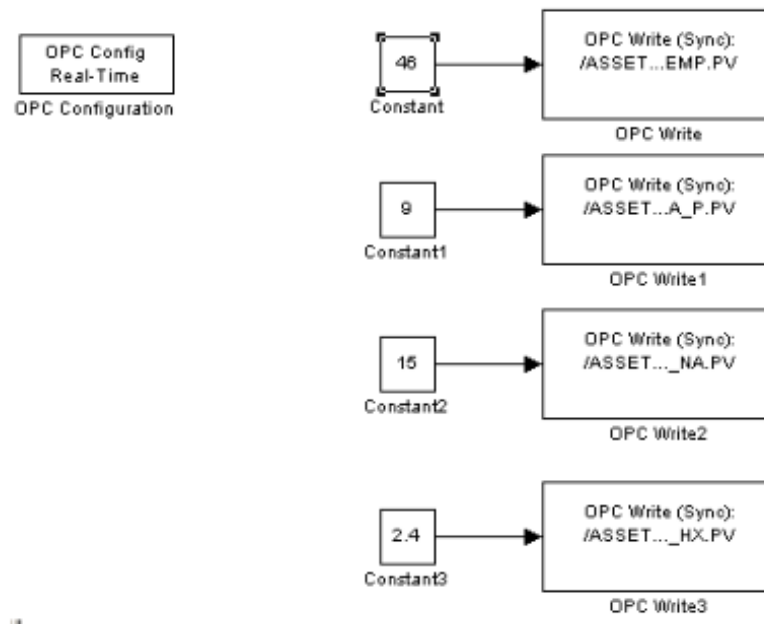


Рисунок 4.18 – Програма для тестування стратегії керування

При відсутності блокування оператор має змогу через поле ОР блоку DEVCTL змінювати стан виконавчого механізму в будь-який бажаний стан (рис. 4.19)

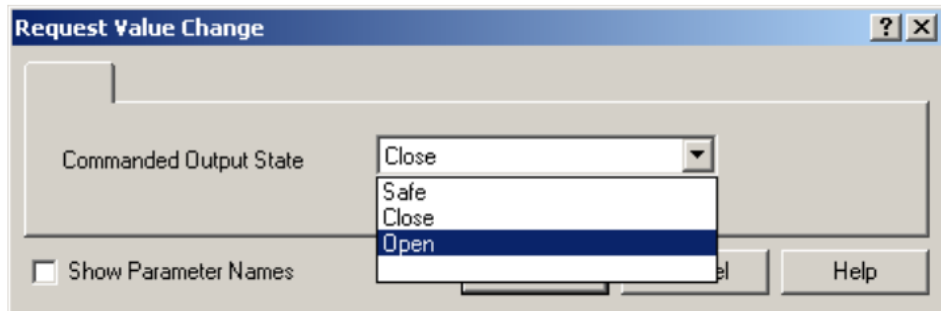


Рисунок 4.19 – Вікно зміни стану виконавчого механізму

При зміні значень констант на небажані, відбувається блокування блоку DEVCTL і перехід до безпечного стану (рис. 4.20).

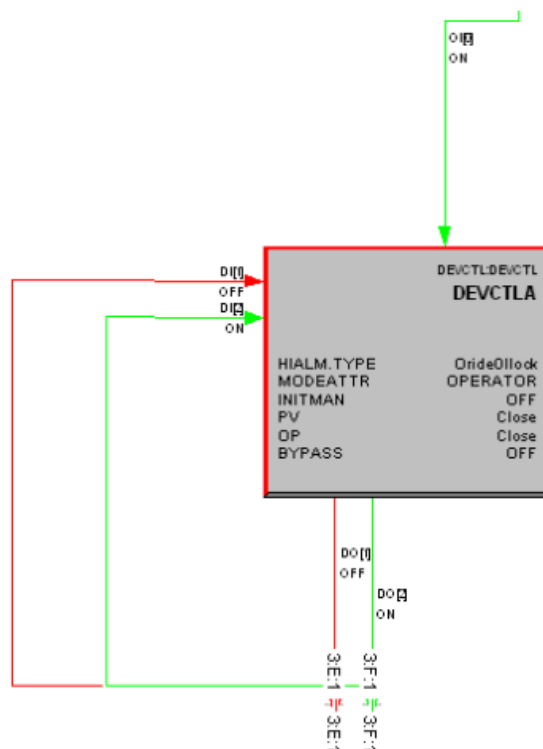


Рисунок 4.20 – Спрацювання блокування на блоці DEVCTL

Значення OP автоматично переведено в SAFE OP, а саме стан Close. Поле HIALM.TYPE (показник блокування) вказує що спрацювало блокування, а саме OrideOllock, при спробі оператора змінити стан виконуючого механізму буде показано вікно з помилкою (рис. 4.21).

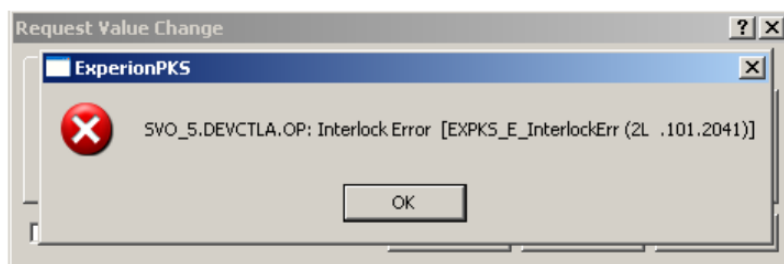


Рисунок 4.21 – Помилка при спробі змінити стан під час блокування

Для ввімкнення можливості зміну стану під час блокування оператору потрібно активувати поле BYPASS (рис. 4.22).

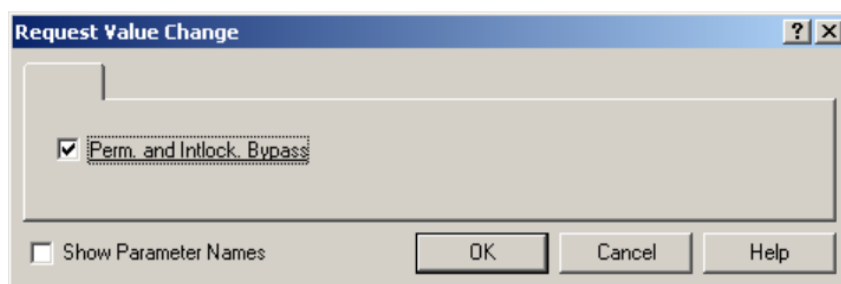


Рисунок 4.22 – Поле зміни значення BYPASS

При такій конфігурації блок DEVCTL не буде заблокований, але оператор буде оповіщений про спрацювання блокування на мнемосхемі, і матиме змогу вжити потрібні заходи.

В таблиці 4.3 наведені результати тестування стратегії.

Таблиця 4.3 – Результати тестування стратегії

№	P, МПа	T, °C	Na, мг/дм ³	χ _н , мкС/см	Відгук стратегії керування
1	2	3	4	5	6
1	0,2	40	0,27	0,4	показники в нормі
2	0,23	39	0,4	0,45	блокування
3	0,26	47	0,26	0,6	блокування
4	0,19	46	0,25	0,48	блокування
5	0,21	42	0,26	0,44	показники в нормі
6	0,2	44	0,29	0,47	показники в нормі
7	0,22	41	0,33	0,52	блокування
8	0,27	48	0,36	0,54	блокування

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

Приклад повідомлення оператора наведено на рисунку 4.23.

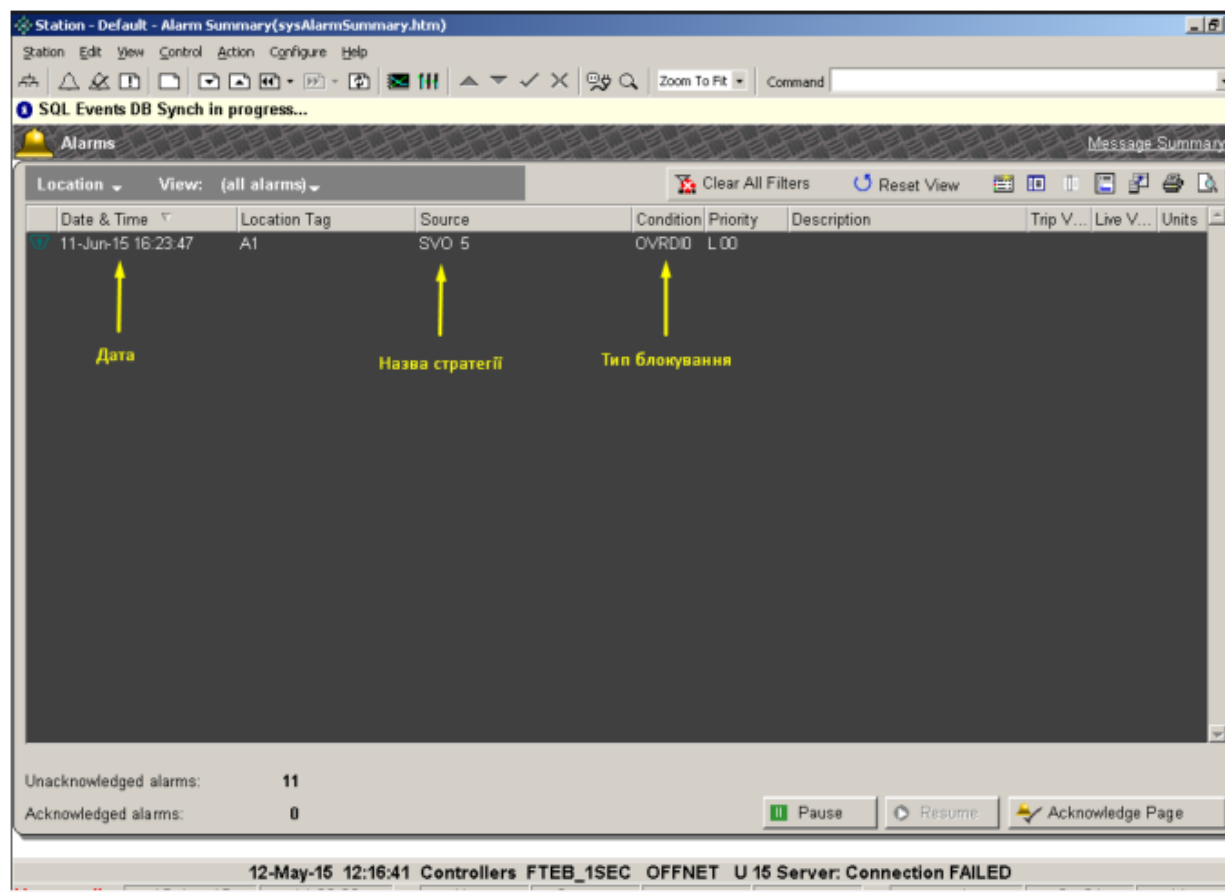


Рисунок 4.23 – Вікно повідомлення оператора

Отже, виходячи з основних параметрів, що впливають на роботу фільтрів було побудовано дві стратегії керування процесом знесолення турбінного конденсату другого контуру АЕС з ВВЕР-1000: одна для управління пристроями с дискретним інтерфейсом; інша для тестування в моделюючих середовищах.

Стратегії автоматизують процес відправки ланцюжків фільтрів на регенерацію, та включення їх в роботу після регенерації. Також було налаштовано систему блокування та інформування робочого персоналу при виникненні аварійних ситуацій [123-124].

4.4 Інтегрування системи керування БЗУ із АСУ ТП енергоблоку АЕС

Автоматизована система управління технологічними процесами (АСУ ТП) ВПУ входить до складу АСУ ТП хімічного цеху, яка взаємодіє із програмно-технічним комплексом (ПТК) ВХР енергоблоків, ПТК БЗУ турбінного конденсату [125].

Спрощена структура ПТК системи знесолення турбінного конденсату представлена на рисунку 4.24.

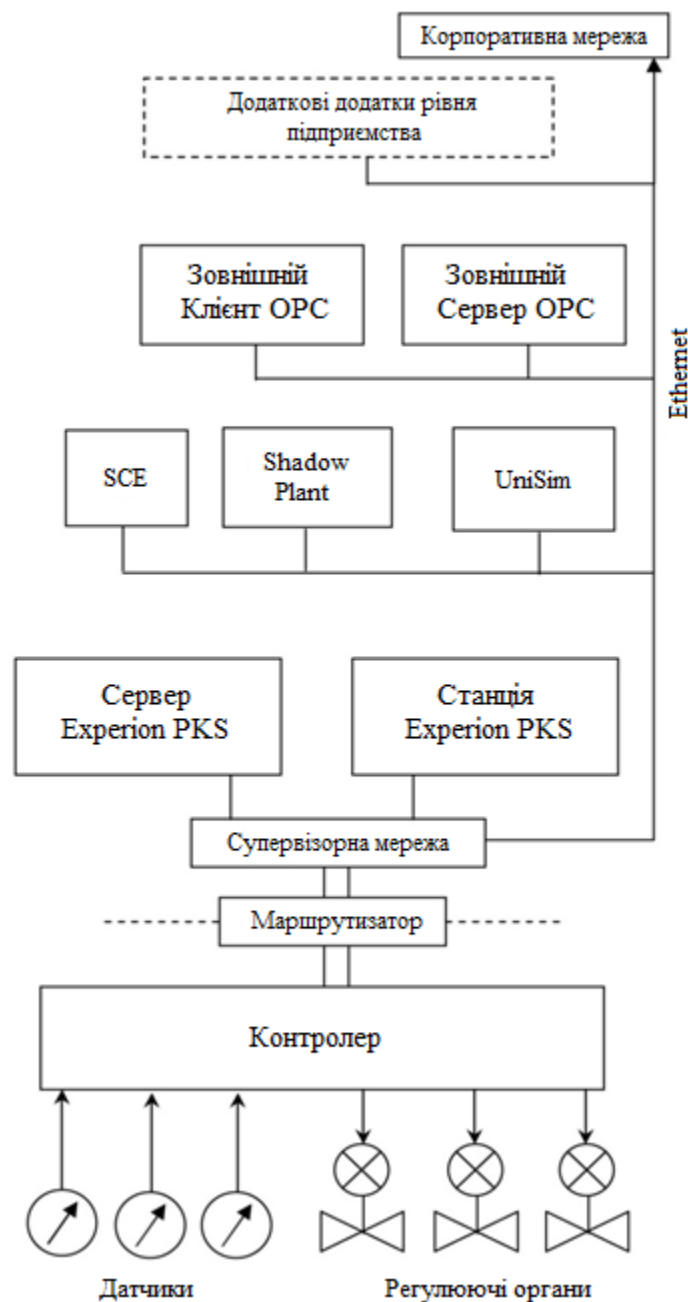


Рисунок 4.24 – Загальна структура ПТК БЗУ

ПТК можна розділити на кілька ієрархічних рівнів, що реалізують різні функції [101]:

1. Рівень безпосереднього цифрового керування. У своєму складі містить один або кілька контролерів, з'єднаних через маршрутизатори із супервізоровою мережею. Контролер знімає інформацію з вимірювальних перетворювачів датчиків і формує керуючі впливи на приводи регульовальних органів у відповідності із завантаженою в контролер стратегією керування.

2. Рівень супервізорного керування й безпосередньої оптимізації технологічного процесу. Включає такі основні елементи, як середовище формування стратегії керування процесом, базу даних процесу (ПО сервера Experion PKS) і одну або кілька станцій оператора (Станція Experion PKS).

3. Рівень моделювання й аналізу. Містить програмне й технічне забезпечення, що дозволяє моделювати розглянутий технологічний процес і емулювати контролер (Unisim, Shadow Plant, середовище імітаційного керування SCE). Із використанням сервера OPC можливості моделювання й керування процесом суттєво розширюються.

4. Рівень допоміжних додатків, що дозволяють аналізувати ефективність керування, проводити планування подальшої роботи та ін.

Усі перераховані елементи зв'язуються через мережу Ethernet. Забезпечується можливість доступу до корпоративної (загальностанційної) мережі.

Архітектура ПТК передбачає можливість інтеграції з інформаційно-обчислювальними мережами (ІОМ) АЕС. Інтеграція ПТК із ІОМ енергоблоку дозволяє отримувати доступ до даних процесу керування будь-якому клієнтові сервера АХК ВХР АЕС, якому вони необхідні; організувати централізований збір та зберігання одержаної в процесі роботи ПТК інформації; використовувати ресурси ІОМ у процесі моделювання, аналізу й керування процесом. Інтеграція може здійснюватися через шлюз ІОМ або за

допомогою сервера OPC. Схема зв'язку системи керування з ІОМ представлена на рисунку 4.25.

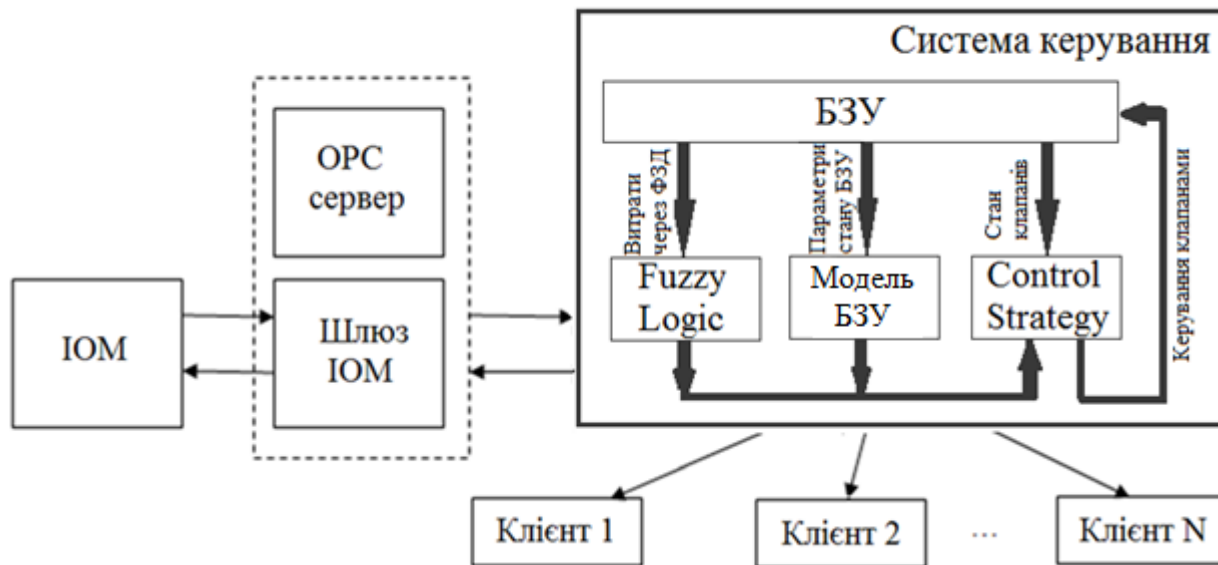


Рисунок 4.25 – Схема зв'язку системи з ІОМ енергоблоку

Створена система керування, структура якої представлена на рисунку 4.25, дозволяє отримати параметри стану БЗУ, такі як концентрація іонів натрію перед БЗУ, концентрація іонів заліза перед БЗУ, концентрація гідразину перед БЗУ, температура потоку перед БЗУ, тиск потоку перед БЗУ, що вимірюються відповідними приладами, вказаними у Додатку Д. На основі цих даних система керування розраховує важливі показники роботи БЗУ, що не вимірюються на виробництві, такі як: водневий показник та питома електропровідність після БЗУ. Ці показники важливі при прийнятті рішення щодо керування станом ФЗД.

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.

У якості клієнтів системи керування можуть виступати операторські станції Experion PKS, робоче місце адміністратора сервера Experion PKS, операторські станції Unisim і т.д.

Результати досліджень було впроваджено у навчальному процесі кафедри кібернетики ХТП хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», що підтверджується відповідними актами наведеними у Додатку 3.

Також розроблена система підтримки прийняття рішень щодо керування фільтрами змішаної дії БЗУ успішно пройшла випробування за Програмою і методикою випробувань та була передана для дослідної експлуатації на площадці ВП «Хмельницька АЕС». Акти проведених випробувань, Програма та методика і Протокол випробувань системи інтелектуального прийняття рішень щодо визначення стану ФСД БЗУ на базі ВП «Хмельницька АЕС» наведеною у Додатку К.

4.5 Економічний ефект запропонованої системи керування БЗУ

Оцінювання економічної ефективності впровадження розробленої системи керування БЗУ було проведено на основі річного звіту по основній діяльності хімічного цеху ВП ХАЕС за 2013 р. та результатів проведених випробувань системи на базі ВП ХАЕС.

Жорсткий контроль температурного режиму роботи БЗУ дозволяє уникнути незворотного руйнування іонообмінних смол, в результаті чого зношування фільтруючого матеріалу зменшується на 10 % (рис. 4.26). Витрати на заміну сорбентів, відповідно, скорочуються вдвічі.

У таблиці 4.4 наведено окремі дані експлуатації БЗУ ХАЕС за 2013 рік.

Таблиця 4.4 – Експлуатація й регенерація фільтрів БЗУ

№ з/п	Найменування фільтра	Кількість регенерацій за рік		Річне зношування сорбенту, %	
		Ручний режим	Автоматичний режим	Ручний режим	Автоматичний режим
1	2	3		4	
2	ФЗД №1	3	2	15-20	10-15
3	ФЗД №2	4	3	15-20	10-15
4	ФЗД №3	5	4	15-20	10-15
5	ФЗД №4	4	3	15-20	10-15
6	ФЗД №5	4	3	15-20	10-15

Збільшення часу роботи фільтрів на зношених іонітах призводить до винесення солей у робочий цикл станції, внаслідок чого виходять зі строю або потребують заміни парогенератори, заміна одного з яких становитиме 5,5 млн. дол., відповідно до офіційних даних наведених на сайті Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» у розділі прес-центру.

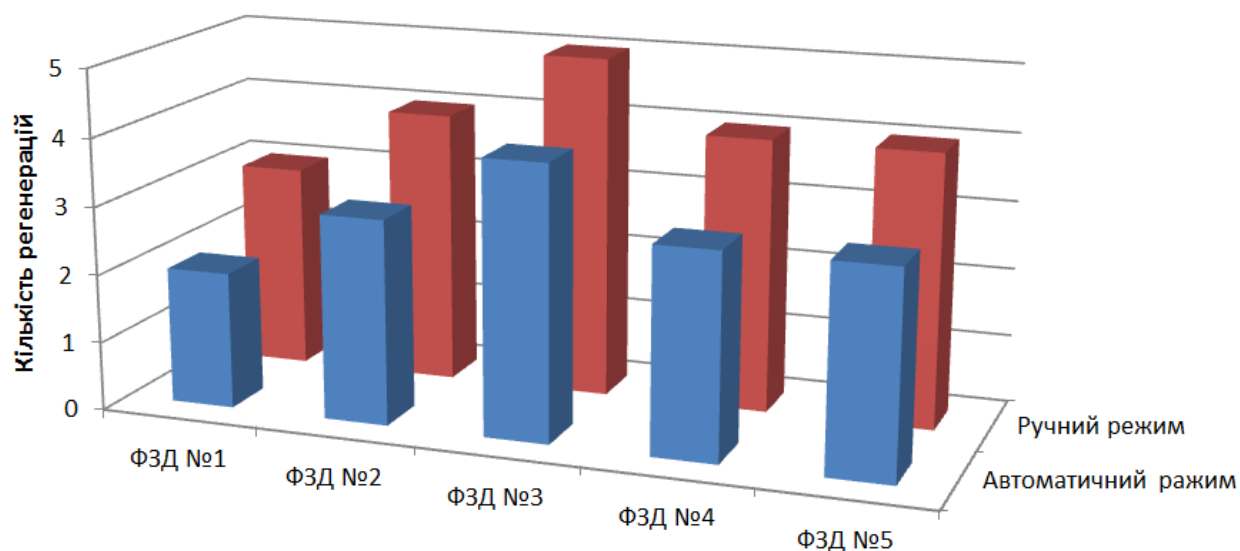


Рисунок 4.26 – Кількість регенерацій ФЗД за рік у ручному та автоматичному режимі роботи БЗУ

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.

Отже, завдяки впровадженню системи керування БЗУ зменшилась частка ручних операцій, підвищилась надійність роботи енергоблоку за рахунок зменшення помилок персоналу, підвищилися економічність і якість роботи за рахунок автоматично контрольованих технологічних режимів, знизилася кількість стоків енергоблоку.

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 Experion 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СОУ-Н ЯЕК 1.028-2010. Водно-хімічний режим другого контуру атомних електростанцій з реакторами типу ВВЕР. Технічні вимоги до якості робочого середовища другого контуру [Текст] // МПЕУ 19.10.2010 № 419 НАЕК 30.11.2010 999-р.
2. Вайнман А. Б. Механизм коррозионных повреждений теплоэнергетического оборудования энергоблоков СКД / А. Б. Вайнман. // Энергетика и электрификация. – 2002. – №4. – С. 44–52.
3. Вайнман А. Б. О повышении эффективности работы водоподготовительных установок ТЭС сверхкритического давления / А. Б. Вайнман, Н. В. Рыжикова, О. А. Бочко. // Энергетика та електрифікація. – 2007. – С. 15–25.
4. Корюкова Л. В. Пути совершенствования воднохимического режима энергоблоков СКД в системе АО «Свердловэнерго» / Л. В. Корюкова, А. Ф. Белоконова, Н. А. Белоконова. // Теплоэнергетика. – 1999. – №7. – С. 30–34.
5. Dausik K. Korrosionsschutz im WasserDampfKreislauf / K. Dausik. – 1990. – №7. – P. 608–611.
6. Верич В. Ф. Исследование эффективности БОУ по качеству первоначального конденсата / В. Ф. Верич. // Энергетика и электрификация. – 1990. – №2. – С. 10–13.
7. Сутоцкий Г. П. Электропроводимость рабочей среды блоков СКД при различных воднохимических режимах / Г. П. Сутоцкий, И. А. Рогальская. // Энергетика и электрификация. – 1991. – №1. – С. 29–30.
8. Condensate purification: The Influence of Operating Conditions on the Ion Exchange Processes. 8. CONDENSATE PURIFICATION The Influence of Operating Conditions on the Ion Exchange Processes. // PUROLITE TECHNICAL BULLETIN. – 1999.

9. Tavares A. Condensate Polishing For Nuclear And Super Critical Power Plants For The 21ST Century / A. Tavares, R. Applegate. // PowerPlant Chemistry. – 2009. – №11(3).
10. Высоцкий С. П. Повышение эффективности работы фильтров смешанного действия в системах глубокого обессоливания воды / С. П. Высоцкий, Е. В. Карпенко. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2008. – №2(7). – С. 122–129.
11. ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила // МПЕУ 13.06.03 №296; НАЕК 29.08.03 №503. – 597 с.
12. Об эксплуатации блочных обессоливающих установках ТЭС сверхкритического давления / [А. Б. Вайнман, Н. В. Рыжикова, О. А. Бочко та ін.]. // Энергетика та електрифікація. – 2008. – №3. – С. 22–31.
13. РД 34.37.516 – 91. Методические указания по очистке турбинного конденсата на блоках с прямоточными котлами / РД 34.37.516 – 91. – Москва: ВТИ, 1993. – 30 с.
14. Мордберг К. Ф. Опыт автоматизации блочной обессоливающей установки Тяньваньской АЭС [Электронный ресурс] / К. Ф. Мордберг – Режим доступа до ресурсу: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=783>.
15. 0.ХЦ.3285.ИЭ-07. Водно-химический режим второго контура. Блок № 1, 2. Инструкция по эксплуатации.
16. 1.ХЦ.0726.ИУ-10. Блочная обессоливающая установка. Система 1RE. Инструкция по управлению.
17. 1.ХЦ.0726.ТО-09. Блочная обессоливающая установка. Система 1RE. Техническое описание.
18. НПАОП 1.1.10-1.02-01. Правила безпечної експлуатації тепломеханічного обладнання електростанцій і теплових мереж.
19. НП306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій (ОПБ).

20. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безопасной эксплуатации электроустановок.
21. Огляд вітчизняного та міжнародного досвіду оптимізації планування випробувань систем, важливих для безпеки АЕС / [В. І. Скалозубов, Ю. О. Комаров, В. М. Колиханов та ін.]. // ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ І ЧОРНОБИЛЯ. – 2009. – №12. – С. 8–14.
22. НП 306.2.141-2008. Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій / НП 306.2.141-2008. – К.: Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2008. – 35 с.
23. ГОСТ 26291-84. Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей / ГОСТ 26291-84. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 14 с.
24. Кострикин Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления / Ю. М. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. И. Коровина. – М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1990. – 248 с.
25. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок / О. В. Лифшиц. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.
26. Ястребенецкий М. А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов / М. А. Ястребенецкий, Г. М. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
27. Клемин А. И. Надежность ядерных энергетических установок. Основы расчета / А. И. Клемин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 344 с.
28. Швыряев Ю. В. Влияние технического обслуживания на надежность систем безопасности атомных станций / Ю. В. Швыряев, А. Ф. Барсуков, А. А. Деревянкин. // Электрические станции. – 1984. – №6. – С. 12–13.

29. Бахметьев А. М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ / А. М. Бахметьев, О. Б. Самойлов, Т. Б. Усынин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
30. Risk Based Optimization of Technical Specifications for Operation of Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-729 / IAEA. – Vienna (Austria), December 1993. – 145 p.
31. Guidance for Optimizing Nuclear Power Plant Maintenance Programmes: IAEA-TECDOC-1383 // Report prepared within the framework of the Technical Working Group on Life Management of Nuclear Power Plants. - Vienna (Austria), December 2003. – 141 p.
32. Риск-ориентированные подходы оптимизации технического обслуживания и эксплуатационного контроля систем, важных для безопасности АЭС / [Д. В. Билей, С. В. Васильченко, Н. И. Власенко та ін.]. – Одесса: ТЭС, 2004. – 530 с. – (Монографія. Под ред. В. И. Скалозубова).
33. Кишневский В. А. Технологии подготовки воды в энергетике : учебник для вузов по направлениям "Теплоэнергетика" и "Атомная энергетика" / В. А. Кишневский. – Одесса: Фенікс, 2008. – 400 с. - ISBN 978-966-438-117-5
34. Шкроб М. С. Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках / М. С. Шкроб. // Сборник статей. – 1978.
35. СОУ-Н ЯЕК 1.028:2010. Водно-химический режим второго контура АЭС с реакторами типа ВВЭР. Технические требования к качеству рабочей среды второго контура.
36. Оптимизация планирования ремонтов и испытаний систем безопасности атомных электростанций на основе риск-ориентированных подходов / [Ю. Л. Коврижкин, Ю. А. Комаров, В. М. Пышный та ін.]. – Одесса: ТЭС, 2006. – 386 с. – (Монографія. Под ред. В. И. Скалозубова).

37. НП 306.2.106–2005. Вимоги до проведення модифікацій ядерних установок та порядку оцінки їх безпеки / НП 306.2.106–2005., 2005. – 39 с.
38. Sparre E. Research Risk Based Test Interval and Maintenance Optimisation. Application and Uses: SKI Report 99:55 // SKI Project Number 97014. - October 1999. – 39 p.
39. 0.ХЦ.0715.ИО-08. Инструкция по ОТ для аппаратчиков ХВО БОУ.
40. 0.ХЦ.0701.ИД-10. Посадова інструкція апаратника блочної знесолювальної устави 5гр. Оперативного персоналу хімічного цеху.
41. Водоподготовка и водно-химические режимы в теплоэнергетике. Учеб. пособие / Э. П.Гужулев, В. В. Шалай, В. И. Гриценко, М. А. Таран. – Омск: ОмГТУ, 2005. – 384 с.
42. Гребенюк В. Д. Обессоливание воды ионитами / В. Д. Гребенюк, А. А. Мазо. – М.: Химия, 1980. – 256 с.
43. Фрог Б. Н. Водоподготовка. Учебное пособие для вузов / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко. – М.: МГУ, 1996. – 680 с.
44. СТП 0.08.049-2003. Материалы ионообменные фильтрующие. Систем очистки водного теплоносителя АЭС.
45. ГОСТ 20298-74. Смолы ионообменные. Катиониты. Технические условия.
46. ГОСТ 20301-74. Смолы ионообменные. Аниониты. Технические условия.
47. Вихрев В. Ф. Водоподготовка. 2-е изд., перераб. и доп. Учебник для вузов. / В. Ф. Вихрев, М. С. Шкроб. – М.: Энергия, 1973. – 416 с. – (Под ред. Шкроба М.С.).
48. Гурвич С. М. Водоподготовка / С. М. Гурвич. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 240 с.
49. Иваненко А. С. Водоподготовка (пособие аппаратчику) / А. С. Иваненко. – К.: Техника, 1978. – 184 с.

50. Стерман Л. С. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС. Учебник для вузов / Л. С. Стерман, В. Н. Покровский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 328 с. – ISBN 5-283-00041-9.
51. Кострикин Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. Справочник / Ю. М. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. И. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
52. Высоцкий С. П. Мембранная и ионитная технологии водоподготовки в энергетике / С. П. Высоцкий. – К.: Техника, 1989. – 176 с.
53. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп. / О. В. Лифшиц. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.
54. Водоподготовка. Справочник для профессионалов – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с. – (Под ред. д. т. н., действительного члена Академии промышленной экологии С. Е. Беликова).
55. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп. / О. В. Лифшиц. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.
56. Соловьев Ю. П. Вспомогательное оборудование паротурбинных электростанций / Ю. П. Соловьев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
57. Белан Ф. И. Водоподготовка - Расчеты, примеры, задачи / Ф. И. Белан. – М.: Энергия, 1980. – 256 с.
58. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. Учебник для вузов/Изд. 2-е. В 2-х кн. / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. – 400 с. –ISBN 5-7245-1006-5.
59. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. – 368 с. – ISBN 5-7245-1007-3.

60. Солодянников В. В. Расчет и математическое моделирование процессов водоподготовки / В. В. Солодянников. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 384 с. – ISBN 5-283-00770-7.
61. О.ЦА.6677.РГ-09. Регламент технического обслуживания и ремонта средств тепловой автоматики и измерений, оборудования и технических средств АСУ ТП систем, важных для безопасности, энергоблоков №1 и №2.
62. СО 34.35.146-2003. Методические указания по созданию АСУ ТП водоподготовительных установок (ВПУ) электростанций.
63. СО 153-34.37.103. Методические указания по проектированию обессоливающих установок с сокращенными расходами реагентов и сокращенными стоками.
64. ТС.0030.ИЭ-07. Инструкция о порядке вывода оборудования в ремонт (на техническое обслуживание или на испытания) и ввод его в работу (резерв) по окончании ремонта (технического обслуживания или испытания).
65. Визуализация процесса ионообменного умягчения воды с целью прогнозирования и управления / И. В. Комарова, Н. К. Галкина, Б. Г. Анфилов, К. И. Шептовецкая. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2008. – №1. – С. 30–36.
66. Теоретические основы деминерализации пресных вод / [М. М. Сенявин, Р. Н. Рубинштейн, И. В. Комарова та ін.]. – М.: Наука, 1975. – 325 с.
67. Основы расчета и оптимизации ионообменных процессов / [М. М. Сенявин, Р. Н. Рубинштейн, Е. В. Веницианов та ін.]. – М.: Наука, 1972. – 172 с.
68. Решение задач ионообменной водоподготовки на основе математического моделирования с применением ЭВМ / [И. В. Комарова, Н. К. Галкина, Е. М. Махалов та ін.]. // Теория и практика сорбционных процессов. – 1989. – №20. – С. 30–41.

69. Математическая модель глубокой отмывки ионообменного фильтра / Н. К. Галкина, И. В. Комарова, Б. Г. Анфилов, К. И. Шептовецкая. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2004. – №5. – С. 644–652.
70. Моделирование технологических процессов в ионитных фильтрах / И. М. Закова, И. В. Комарова, К. Ю. Одинцов, В. Ю. Лебедев. // Теплоэнергетика. – 1983. – №7. – С. 13–16.
71. Расчет процесса умягчения на основе математической модели / А. Г. Калинина, С. Акмамедов, И. В. Комарова, М. М. Сенявин. // Теплоэнергетика. – 1981. – №9. – С. 53–55.
72. Комплекс программ расчета процесса химводоочистки на основе математической модели / [И. В. Комарова, Н. К. Галкина, Б. Г. Анфилов та ін.]. // Наука производству. – 1998. – №2(4). – С. 53–56.
73. Прогнозирование технологических характеристик противоточных ионообменных фильтров с использованием математического моделирования / [Е. Б. Юрчевский, И. В. Комарова, Н. К. Галкина та ін.]. // Теплоэнергетика. – 2003. – №7. – С. 29–34.
74. Комплексная очистка промышленных сточных вод с повышенным содержанием сульфата кальция / [И. В. Комарова, Н. К. Галкина, К. И. Шептовецкая та ін.]. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2007. – №2. – С. 187–196.
75. Безотходный способ регенерации ионитов / [И. В. Комарова, Н. К. Галкина, К. И. Шептовецкая та ін.]. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2007. – №2. – С. 197–204.
76. Кокотов Ю. А. Равновесие и кинетика ионного обмена / Ю. А. Кокотов, В. А. Пасечник. – Л.: Химия, 1970. – 336 с.
77. Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Математичне моделювання та застосування ЕОМ в хімічній технології" – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – 32 с. – (Сост.: І. В. Голуб).

78. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Математичне моделювання та застосування електроннообчислювальних машин в хімічній технології» / [Т. В. Бойко, В. І. Бендюг, І. О. Потяженко та ін.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 126 с.
79. Сенявин М. М. Основы расчета и оптимизации ионообменных процессов / М. М. Сенявин, Р. Н. Рубинштейн. – М.: Наука, 1972.
80. Бондарь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / А. Г. Бондарь. – К.: Вища школа, 1973. – 280 с.
81. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
82. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
83. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
84. Кафаров В. В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин. – М.: Химия, 1974. – 344 с.
85. Земляк Е. М. Автоматизированное моделирование непрерывных и периодических процессов и систем / Е. М. Земляк, Г. А. Статюха. – Киев: УМК ВО, 1992. – 142 с.
86. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
87. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 535 с.
88. Кишенько В. Д. Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації Конспект лекцій / В. Д. Кишенько. – К.: НУХТ, 2007. – 102 с.

89. Малай Г. П. Методы пространства состояний в системах автоматического управления на персональном компьютере / Г. П. Малай. – Хабаровск, 2001.
90. Методи сучасної теорії управління: Навч. посіб. / А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько, Н. М. Луцька, В. В. Іващук. – К.: НУХТ, 2010. – 196 с.
91. Тюкин В. Н. Теория управления: Конспект лекций. Часть 1. Обыкновенные линейные системы управления. – 2-е изд., испр. и доп. / В. Н. Тюкин. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – 200 с. – ISBN 5-87851-110-X.
92. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3 – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 748 с. – (Под ред. Н.Д. Егупова).
93. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
94. Сю Д. Современная теория автоматического управления и ее применение. Перевод с английского / Д. Сю, А. Мейер. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с. – (Под ред. д-ра техн. наук проф. Ю. И. Топчиева).
95. Красовский Н. Н. Проблемы управляемости, наблюдаемости / Н. Н. Красовский. // Труды 2-го Всесоюзного съезда по механике. – 1964. – С. 77–93.
96. William L. Brogan Modern Control Theory // Paperback, Third Edition // Prentice-Hall, 1990 – 736 p.
97. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.
98. Аверкин А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 312 с. – (Проблемы искусственного интеллекта).
99. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. Пер. с франц. / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

100. Алиев Р. А. Управление производством при нечеткой исходной информации / Р. А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. А. Мамедова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
101. Семькина И. Ю. Синтез регуляторов на основе нечёткой логики / И. Ю. Семькина. – Кемерово: КузГТУ, 2008.
102. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and Control. — 1965. — №8. — P. 338-353.
103. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде. // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – 1976. – С. 172–215.
104. ГОСТ 24.104-85. Автоматизированные системы управления. Общие требования.
105. Правила організації технічного обслуговування і ремонту систем та обладнання атомних електростанцій СОУ-Н ЯЕК 1.010:2008. – К., Міністерство палива та енергетики України, ДП НАЕК «Енергоатом», 2008. – 116 с.
106. Безруков, Н.С. Особенности и опыт разработки проектов АСУТП для действующих объектов теплоэнергетики / Н.С. Безруков, Д.Ю. Лебедко, Д.А. Теличенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов VI Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2011. – С. 108-114.
107. Теличенко Д. А. Современные подходы при реализации АСУ ТП для объектов теплоэнергетики / Д. А. Теличенко, А. А. Милосердлова. // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2012. – №59. – С. 89–99.
108. 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.

109. 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.
110. 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.
111. Медведєв, Р. Б. Система керування температурним режимом блочної знесолювальної 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.
112. 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.
113. 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»).
114. 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»).
115. Сангинова, О. В. Компьютерная поддержка водно-химического режима второго контура атомной электростанции [Текст] / О. В. Сангинова, 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.
 116. Медведєв, Р. Б. Керування блочно-знесолювальною 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.
 117. Медведев, Р. Б. Постановка задачи управления блочной обессоливающей установкой атомной электростанции с ВВЭР-1000 [Текст] / Р. Б. Медведев, 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.
 118. Мердух, С. Л. Ідентифікація математичної моделі блочної знесолювальної 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.
 119. Медведев, Р. Б. Анализ процесса обессоливания турбинного конденсата как объекта управления [Текст] / Р. Б. Медведев, 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.

120. Мердх, С. Л. Комп'ютерне моделювання електропровідності у другому контурі АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 [Текст] / С. Л. Мердх, 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.
121. Медведєв, Р. Б. Комп'ютерне моделювання системи знесолення турбінного конденсату АЕС із реактором ВВЕР-1000 [Текст] / Р. Б. Медведєв, О. В. Сангінова, С. Л. Мердх // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Компьютерное моделирование в химии, технологиях и системах развития. – 2012. - № 2/14 (56). – С. 34 – 37.
122. Медведєв, Р. Б. Особливості водно-хімічного режиму та математичного моделювання другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 / Р. Б. Медведєв, С. Л. Мердх // Науково-технічний журнал «Наукові вісті».
123. Сангінова, О. В. Розроблення алгоритмів діагностування стану водно-хімічного режиму другого контуру атомних електростанцій / О. В. Сангінова, Р. Б. Медведєв, С. Л. Мердх // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2015. - №1/3 (21). – Том 1. – С. 37-41.
124. Застосування методів теорії ігор для пошуку оптимальних стратегій керування водно-хімічним режимом другого контуру АЕС з реакторами типу ВВЕР [Текст] / Р. Б. Медведєв, С. В. Брановицька, О. В. Сангінова, С. Л. Мердх // Енергетика та електрифікація. – № 9 (325). 2010. – С. 8 – 12.
125. 0.ЦА.0492.ИЭ-07. Инструкция по эксплуатации программного и информационного обеспечения ИВС энергоблока №1 и энергоблока №2.









126. Мердух, С. Л. Пакет прикладних програм для розрахунку безперервних та дискретних моделей динамічних процесів у контурах керування [Текст] / С. Л. Мердух, Р. Б. Медведєв // Науковий журнал «Проблеми програмування». – 2012. - №4. – С. 105-115
127. 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.

ДОДАТКИ



Додаток А


Основні позначення та характеристики паровідборів

Таблиця А.1 – Характеристики паровідборів

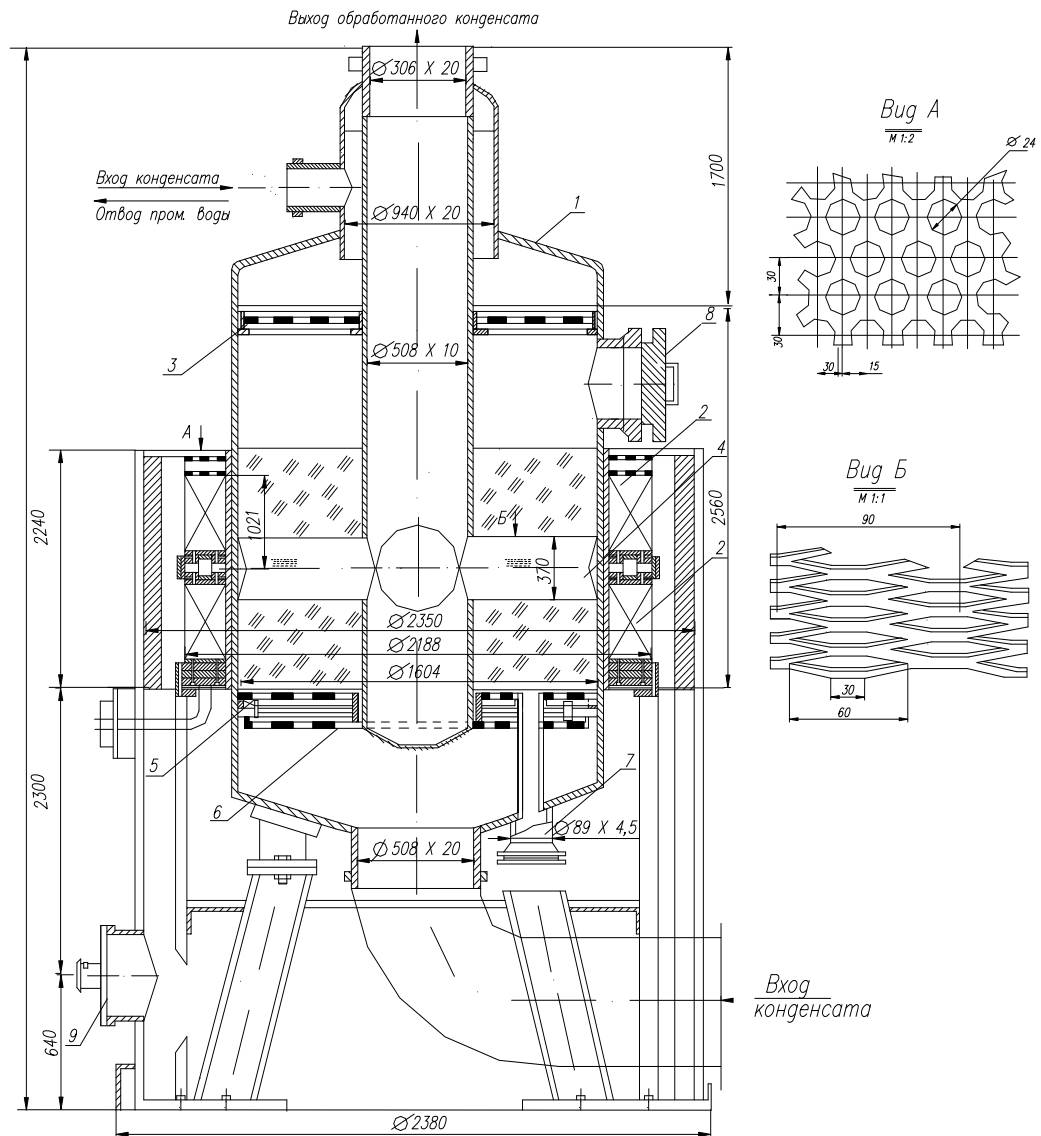
№ відбору	Позначення	Місце відбору	Місце подачі	Витрата, G, т/ч	Параметри пару
1	2	3	4	5	6
1		Камери після других ступенів обох потоків ЦВТ	ПВТ-7	300,1	P=21,6 кгс/см ² t=218 °C i=632 ккал/кг
2		Камери після третіх ступенів обох потоків ЦВТ	ПВТ-6, КВП	289,8	P=13,66 кгс/см ² t=196 °C i=615,5 ккал/кг
3		Камери після четвертих ступенів обох потоків ЦВТ	деаератори	110,2	P=9,3 кгс/см ² t=176 °C i=599,9 ккал/кг
4	 	Ресивери після ЦВТ, Ресивери після СПП	ПНТ-5 Приводні турбіни живильних турбонасосів	284,4 131,2	P=5,68 кгс/см ² t=157 °C i=584,3 ккал/кг P=5,0 кгс/см ² t=249,1 °C i=706,8 ккал/кг
5		Камери після перших ступенів обох потоків ЦНТ-2	ПНТ-4	139,7	P=2,33 кгс/см ² t=176 °C i=673,4 ккал/кг
6		Камери після других ступенів обох потоків ЦНТ-1	ПНТ-3	105,2	P=1,21 кгс/см ² t=118 °C i=617,2 ккал/кг
7		Камери після третіх ступенів обох потоків ЦНТ-3 й ЦНТ-4	ПНТ-2	139,8	P=0,613 кгс/см ² t=187 °C i=617,2 ккал/кг

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6
8		Камери після четвертих ступенів обох потоків всіх ЦНТ	ПНТ-1	165,7	$P=0,229 \text{ кгс/см}^2$ $t=65 \text{ }^\circ\text{C}$ $i=595,2 \text{ ккал/кг}$
9		Пароперегрівач	В тракт за ПВТ-7	508,8	$P=5,56 \text{ кгс/см}^2$ $t=217,8 \text{ }^\circ\text{C}$ $i=284,3 \text{ ккал/кг}$

Конденсат із сепараторів-пароперегрівників  подається в лінію основного конденсату за ПНТ-5.

Конструкція та основні технічні характеристики основного обладнання БЗУ

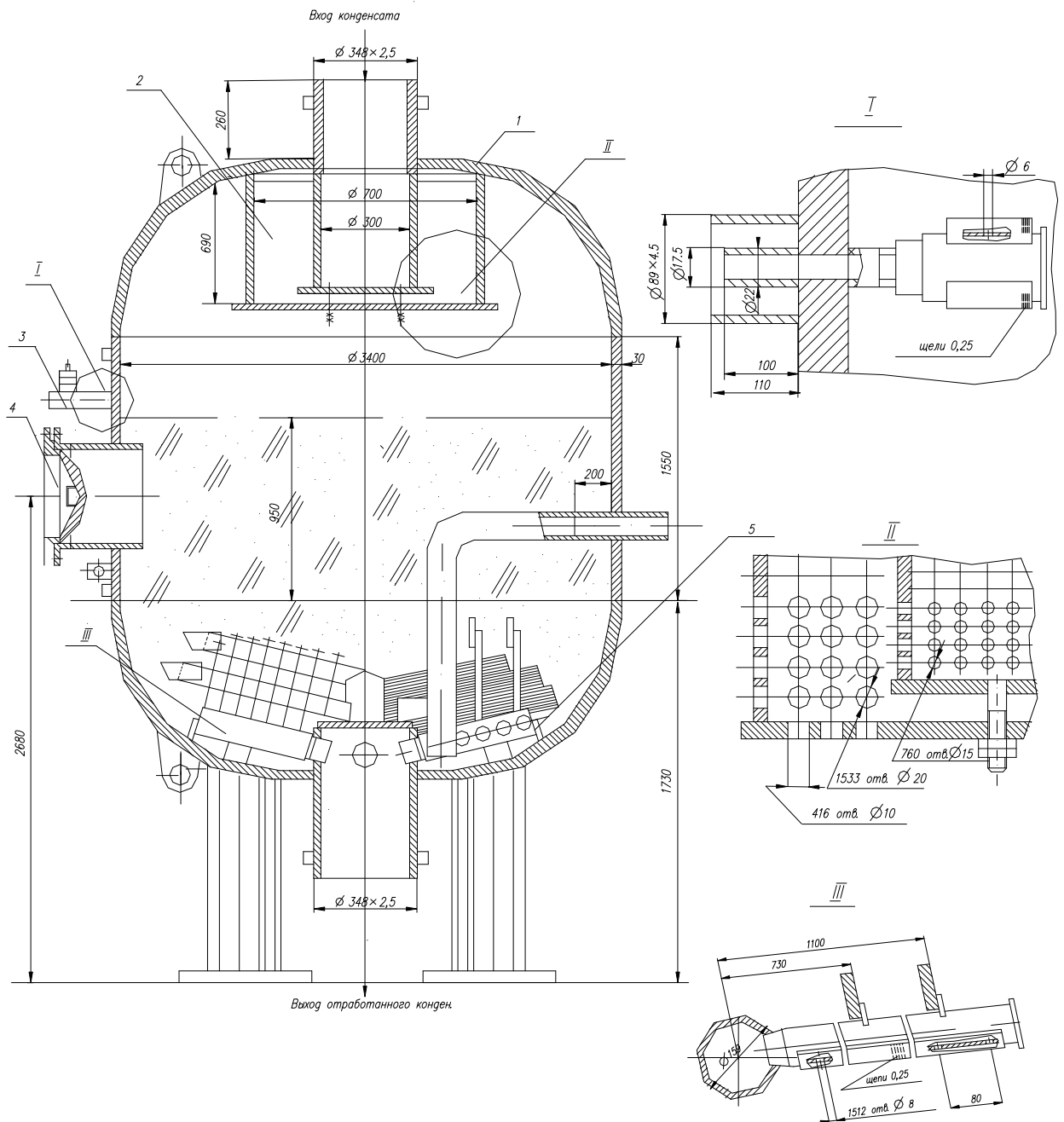


Технічні характеристики:

1. Робочий тиск $P_p = 16 \text{ кгс/см}^2$
2. Пробний гідравлічний тиск $P_{пр} = 21 \text{ кгс/см}^2$
3. Продуктивність – $3600 \text{ м}^3/\text{год.}$
4. Робоче середовище – конденсат
5. Робоча температура – 65°C
6. Об'єм кульковою завантаження – $4,68 \text{ м}^3$
7. Об'єм – $8,9 \text{ м}^3$

№ з/п	Найменування	Кількість
1	Корпус	1
2	Електромагнітна котушка	2
3	Верхній розподільний пристрій (запобіжні ґрати)	1
4	Середній розподільний пристрій	1
5	Підтримуюча решітка	1
6	Нижній розподільний пристрій	1
7	Штуцер для вивантаження кульок	2
8	Люк-лаз	1
9	Вентилятори	1

Рисунок Б.1 – Фільтр електромагнітний АЕМФ-1.6-1.6-2п

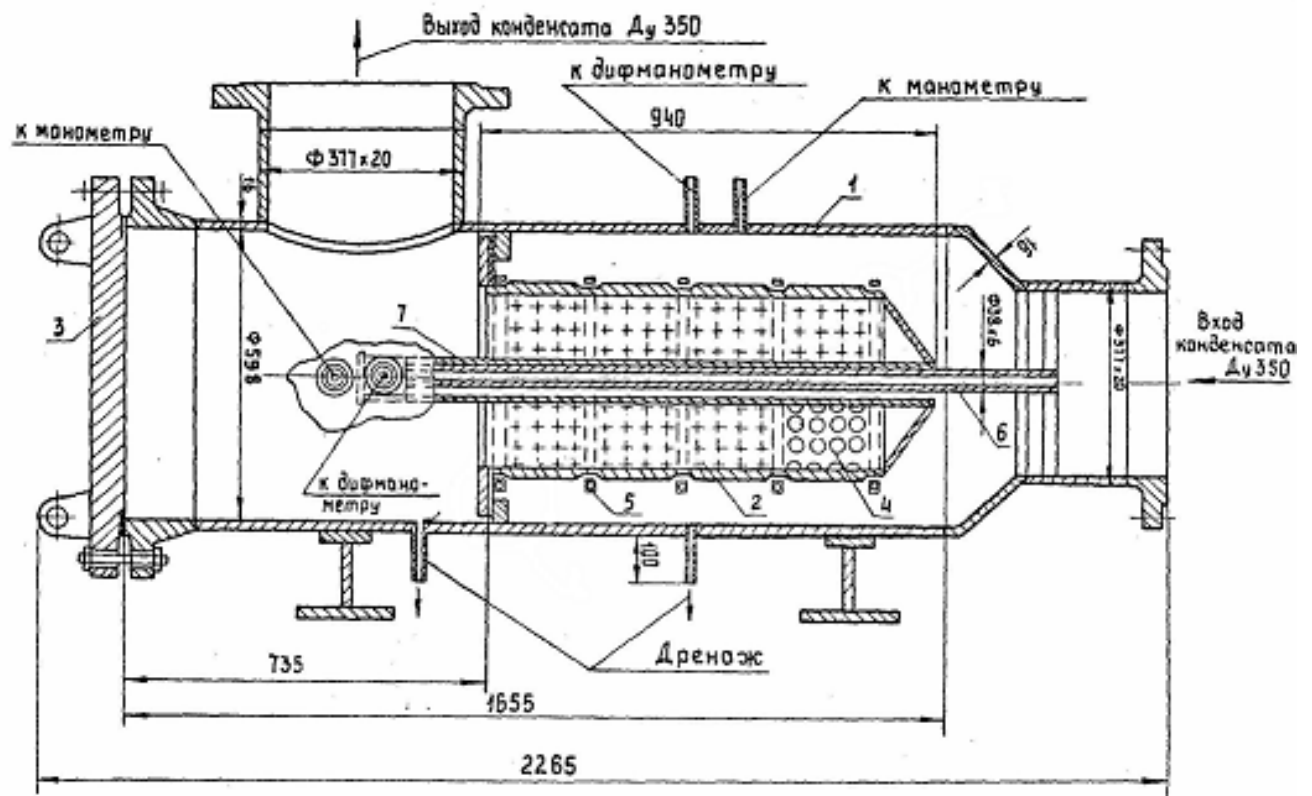


Технічні характеристики:

1. Робочий тиск $P_p=16 \text{ кгс/см}^2$
2. Пробний гідравлічний тиск $P_{пр}=20,5 \text{ кгс/см}^2$
3. Продуктивність – $900 \text{ м}^3/\text{год.}$
4. Робоче середовище – конденсат
5. Робоча температура до $50 \text{ }^\circ\text{C}$
6. Об'єм завантажувального матеріалу – $14,2 \text{ м}^3$

№ з/п	Найменування	Кількість
1	Корпус	1
2	Верхній розподільний пристрій	1
3	Сигнальна трубка	1
4	Люк-лаз	1
5	Нижній розподільний пристрій	1

Рисунок Б.2 – Фільтр іонітів змішаної дії АФІЗДНР-3.4-1.6



Технічні характеристики:		№ з/п	Найменування	Кількість
1. Робочий тиск $P_p=13,5$ кгс/см ²		1	Корпус	1
2. Пробний гідравлічний тиск $P_{пр}=16,9$ кгс/см ²		2	Фільтруючий патрон	1
3. Продуктивність – 900 м ³ /год.		3	Зйомна кришка	1
4. Робоче середовище – конденсат		4	Фільтруюча сітка	3
5. Робоча температура – 50 °С		5	Кріпильний хомут	5
6. Максимальний перепад тисків – 0,3 кгс/см ²		6	Центральна труба	1
7. Об'єм – 0,57 м ³		7	Напрямна штанга	1

Рисунок Б.3 – Фільтр-уловлювач АФЛ-0.6-1.6

Результати пасивного експерименту

Таблиця В.1 – Дані експлуатації БЗУ щодо питомої електропровідності

Номер дослідку	x1	x2	x3	x4	x5	x6	y
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,27	18	12	37,3	36,7	54	0,18
2	0,27	18	12	37,3	36,7	54	0,18
3	0,27	18	12	37,3	36,7	54	0,18
4	0,27	18	12	37,4	36,7	54	0,18
5	0,27	18	12	37,4	36,7	54	0,18
6	0,27	18	12	37,4	36,7	54	0,18
7	0,27	18	12	37,4	36,7	54	0,18
8	0,27	18	12	37,4	34,8	54	0,18
9	0,27	18	12	37,4	34,8	54	0,18
10	0,27	18	12	37,4	34,8	54	0,18
11	0,27	18	12	37,4	34,8	54	0,18
12	0,27	18	12	37,4	34,8	54	0,18
13	0,28	18	12	37,4	32,9	54	0,18
14	0,28	18	12	37,4	32,9	54	0,18
15	0,28	18	12	37,6	32,9	54	0,18
16	0,28	18	12	37,6	32,9	86	0,18
17	0,28	18	12	37,6	32,9	86	0,18
18	0,57	18	12	37,6	28,2	86	0,18
19	0,57	5	12	37,6	29,7	86	0,18
20	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
21	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
22	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
23	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
24	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
25	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
26	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
27	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
28	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
29	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
30	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8
31	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
32	0,62	5	12	37,6	31,3	86	0,18
33	0,62	5	12	37,6	29,7	86	0,18
34	0,62	5	12	37,6	24	86	0,19
35	0,7	5	12	37,6	24	86	0,19
36	0,7	5	12	37,6	25,9	86	0,19
37	0,7	5	12	37,6	25,9	86	0,19
38	0,7	5	12	37,6	27,5	86	0,19
39	0,6	5	12	37,6	29,4	86	0,19
40	0,7	5	12	37,6	31	86	0,19
41	0,6	5	12	37,6	31	86	0,19
42	0,6	5	12	37,6	32,9	86	0,19
43	0,6	5	12	37,6	34,8	86	0,19
44	0,6	5	12	37,6	34,8	86	0,19
45	0,7	5	12	37,6	34,8	86	0,19
46	0,59	5	12	37,6	34,8	86	0,19
47	0,71	5	12	37,6	34,8	86	0,19
48	0,6	5	12	37,3	34,8	86	0,19
49	0,71	5	12	37,3	34,8	86	0,19
50	0,71	5	12	37,3	34,8	86	0,2
51	0,59	5	12	37,3	29,1	86	0,2
52	0,59	10	12	37,3	29,1	86	0,2
53	0,59	10	12	37,3	30,7	86	0,2
54	0,59	10	12	37,3	30,7	86	0,2
55	0,59	10	12	37,3	32,6	86	0,19
56	0,59	10	12	37,3	32,6	86	0,19
57	0,59	10	12	37,3	34,5	86	0,19
58	0,59	10	12	37,3	36,4	86	0,19
59	0,59	10	12	37,3	38,6	86	0,19
60	0,59	10	12	37,3	38,6	86	0,19
61	0,59	10	12	37,3	38,6	86	0,19
62	0,7	10	12	37,3	38,6	86	0,19
63	0,7	10	12	37,3	38,6	86	0,19
64	0,6	10	12	37,3	38,6	86	0,19
65	0,6	10	12	37	38,6	86	0,19
66	0,6	10	12	37	38,6	86	0,19
67	0,72	10	12	37	32,9	86	0,19
68	0,83	10	12	37	32,9	86	0,19
69	0,83	10	12	37	31,3	86	0,19
70	0,83	10	12	37	31,3	86	0,19
71	0,83	10	12	37	31,3	86	0,19

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8
72	0,81	10	12	37	31,3	86	0,19
73	0,81	10	12	37	29,7	86	0,19
74	0,81	10	12	37	29,7	86	0,19
75	0,81	10	12	37	28,2	86	0,19
76	0,81	10	12	37	28,2	86	0,19
77	0,81	10	12	37	27,2	86	0,19
78	0,71	10	12	37	27,2	86	0,19
79	0,71	10	12	37	27,2	86	0,19
80	0,81	10	12	37	27,2	86	0,19
81	0,81	10	12	37,2	27,2	86	0,19
82	0,81	10	12	37,2	27,2	86	0,19
83	0,81	10	12	37,2	0,2	86	0,19
84	0,81	10	12	37,2	0,2	86	0,19
85	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
86	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
87	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
88	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
89	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
90	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
91	0,81	10	8,5	37,2	0,2	86	0,19
92	0,81	10	8,5	37,2	0,8	86	0,19
93	0,81	10	8,5	37,2	2,1	86	0,19
94	0,81	10	8,5	37,2	3	86	0,19
95	0,81	10	8,5	37,2	4	86	0,19
96	0,81	10	8,5	37,2	4,6	86	0,19
97	0,81	10	8,5	37,2	2,7	86	0,19
98	0,81	10	8,5	37,2	1,5	70	0,19
99	0,81	10	8,5	37,2	2,1	70	0,19
100	0,81	10	8,5	37,2	0,5	70	0,19
101	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
102	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
103	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
104	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
105	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
106	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
107	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
108	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
109	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
110	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
111	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
112	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19

Закінчення таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8
113	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
114	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
115	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
116	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
117	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
118	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
119	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
120	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
121	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
122	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
123	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
124	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
125	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
126	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
127	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
128	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
129	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
130	0,81	10	8,5	37,2	0,2	70	0,19
131	0,81	10	8,5	36,9	0,2	70	0,19
132	0,81	10	8,5	36,9	0,2	70	0,19
133	0,81	10	8,5	36,9	0,2	70	0,19
134	0,81	10	8,5	36,9	0,2	70	0,19
135	0,81	10	8,5	36,9	0,2	70	0,19

Таблиця В.2 – Дані експлуатації БЗУ щодо водневого показника

Номер дослід	x1	x2	x3	y
1	2	3	4	5
1	18	37,3	12	9,82
2	18	37,3	12	9,82
3	18	37,3	12	9,82
4	18	37,4	12	9,82
5	18	37,4	12	9,82
6	18	37,4	12	9,82
7	18	37,4	12	9,82
8	18	37,4	12	9,82
9	18	37,4	12	9,82
10	18	37,4	12	9,82
11	18	37,4	12	9,82
12	18	37,4	12	9,82
13	18	37,4	12	9,82
14	18	37,4	12	9,82
15	18	37,6	12	9,82
16	18	37,6	12	9,82
17	18	37,6	12	9,82
18	5	37,6	12	9,83
19	5	37,6	12	9,83
20	5	37,6	12	9,83
21	5	37,6	12	9,83
22	5	37,6	12	9,83
23	5	37,6	12	9,83
24	5	37,6	12	9,83
25	5	37,6	12	9,83
26	5	37,6	12	9,83
27	5	37,6	12	9,83
28	5	37,6	12	9,83
29	5	37,6	12	9,83
30	5	37,6	12	9,83
31	5	37,6	12	9,83
32	5	37,6	12	9,83
33	5	37,6	12	9,83
34	5	37,6	12	9,79
35	5	37,6	12	9,79
36	5	37,6	12	9,79
37	5	37,6	12	9,79
38	5	37,6	12	9,79
39	5	37,6	12	9,79

Продовження таблиці В.2

1	2	3	4	5
40	5	37,6	12	9,79
41	5	37,6	12	9,79
42	5	37,6	12	9,79
43	5	37,6	12	9,79
44	5	37,6	12	9,79
45	5	37,6	12	9,79
46	5	37,6	12	9,79
47	5	37,6	12	9,79
48	5	37,3	12	9,79
49	5	37,3	12	9,79
50	5	37,3	12	9,79
51	5	37,3	12	9,79
52	5	37,3	12	9,79
53	5	37,3	12	9,79
54	5	37,3	12	9,79
55	5	37,3	12	9,79
56	5	37,3	12	9,79
57	5	37,3	12	9,79
58	5	37,3	12	9,79
59	5	37,3	12	9,79
60	5	37,3	12	9,79
61	5	37,3	12	9,79
62	5	37,3	12	9,79
63	5	37,3	12	9,79
64	5	37,3	12	9,79
65	5	37	12	9,79
66	5	37	12	9,79
67	5	37	12	9,79
68	5	37	12	9,79
69	5	37	12	9,79
70	5	37	12	9,79
71	5	37	12	9,79
72	5	37	12	9,79
73	5	37	12	9,79
74	5	37	12	9,79
75	5	37	12	9,79
76	5	37	12	9,79
77	5	37	12	9,79
78	5	37	12	9,79
79	5	37	12	9,79
80	5	37	12	9,79

Продовження таблиці В.2

1	2	3	4	5
81	5	37,2	12	9,79
82	10	37,2	12	9,79
83	10	37,2	12	9,79
84	10	37,2	12	9,79
85	10	37,2	8,5	9,79
86	10	37,2	8,5	9,79
87	10	37,2	8,5	9,79
88	10	37,2	8,5	9,79
89	10	37,2	8,5	9,79
90	10	37,2	8,5	9,79
91	10	37,2	8,5	9,79
92	10	37,2	8,5	9,79
93	10	37,2	8,5	9,79
94	10	37,2	8,5	9,79
95	10	37,2	8,5	9,79
96	10	37,2	8,5	9,79
97	10	37,2	8,5	9,79
98	10	37,2	8,5	9,79
99	10	37,2	8,5	9,79
100	10	37,2	8,5	9,79
101	10	37,2	8,5	9,79
102	10	37,2	8,5	9,79
103	10	37,2	8,5	9,79
104	10	37,2	8,5	9,79
105	10	37,2	8,5	9,79
106	10	37,2	8,5	9,79
107	10	37,2	8,5	9,79
108	10	37,2	8,5	9,79
109	10	37,2	8,5	9,79
110	10	37,2	8,5	9,79
111	10	37,2	8,5	9,79
112	10	37,2	8,5	9,79
113	10	37,2	8,5	9,79
114	18	37,2	8,5	9,79
115	18	37,2	8,5	9,79
116	18	37,2	8,5	9,79
117	18	37,2	8,5	9,79
118	18	37,2	8,5	9,79
119	18	37,2	8,5	9,79
120	18	37,2	8,5	9,79
121	18	37,2	8,5	9,79

Закінчення таблиці В.2

1	2	3	4	5
122	18	37,2	8,5	9,79
123	18	37,2	8,5	9,79
124	18	37,2	8,5	9,79
125	18	37,2	8,5	9,79
126	18	37,2	8,5	9,79
127	18	37,2	8,5	9,79
128	18	37,2	8,5	9,79
129	18	37,2	8,5	9,79
130	18	37,2	8,5	9,79
131	18	36,9	8,5	9,79
132	10	36,9	8,5	9,79
133	10	36,9	8,5	9,79
134	10	36,9	8,5	9,79
135	10	36,9	8,5	9,79

Порівняння розрахованих та експериментальних даних роботи БЗУ

Таблиця Г.1 – Порівняння спостережуваних та передбачуваних значень питомої електропровідності

Модель: $y=a_0+a_1*x_1+a_2*x_1*x_4+a_3*x_4$ (xh)			
	Спостережувані	Передбачувані	Залишки
1	2	3	4
1	0,180000	0,184650	-0,004650
2	0,180000	0,184650	-0,004650
3	0,180000	0,184650	-0,004650
4	0,180000	0,181349	-0,001349
5	0,180000	0,181349	-0,001349
6	0,180000	0,181349	-0,001349
7	0,180000	0,181349	-0,001349
8	0,180000	0,181349	-0,001349
9	0,180000	0,181349	-0,001349
10	0,180000	0,181349	-0,001349
11	0,180000	0,181349	-0,001349
12	0,180000	0,181349	-0,001349
13	0,180000	0,181523	-0,001523
14	0,180000	0,181523	-0,001523
15	0,180000	0,175049	0,004951
16	0,180000	0,175049	0,004951
17	0,180000	0,175049	0,004951
18	0,180000	0,183750	-0,003750
19	0,180000	0,183750	-0,003750
20	0,180000	0,185250	-0,005250
21	0,180000	0,185250	-0,005250
22	0,180000	0,185250	-0,005250
23	0,180000	0,185250	-0,005250
24	0,180000	0,185250	-0,005250
25	0,180000	0,185250	-0,005250
26	0,180000	0,185250	-0,005250
27	0,180000	0,185250	-0,005250
28	0,180000	0,185250	-0,005250
29	0,180000	0,185250	-0,005250
30	0,180000	0,185250	-0,005250
31	0,180000	0,185250	-0,005250
32	0,180000	0,185250	-0,005250
33	0,180000	0,185250	-0,005250

1	2	3	4
34	0,190000	0,185250	0,004750
35	0,190000	0,187650	0,002350
36	0,190000	0,187650	0,002350
37	0,190000	0,187650	0,002350
38	0,190000	0,187650	0,002350
39	0,190000	0,184650	0,005350
40	0,190000	0,187650	0,002350
41	0,190000	0,184650	0,005350
42	0,190000	0,184650	0,005350
43	0,190000	0,184650	0,005350
44	0,190000	0,184650	0,005350
45	0,190000	0,187650	0,002350
46	0,190000	0,184350	0,005650
47	0,190000	0,187950	0,002050
48	0,190000	0,188285	0,001715
49	0,190000	0,189497	0,000503
50	0,200000	0,189497	0,010503
51	0,200000	0,188175	0,011825
52	0,200000	0,188175	0,011825
53	0,200000	0,188175	0,011825
54	0,200000	0,188175	0,011825
55	0,190000	0,188175	0,001825
56	0,190000	0,188175	0,001825
57	0,190000	0,188175	0,001825
58	0,190000	0,188175	0,001825
59	0,190000	0,188175	0,001825
60	0,190000	0,188175	0,001825
61	0,190000	0,188175	0,001825
62	0,190000	0,189387	0,000613
63	0,190000	0,189387	0,000613
64	0,190000	0,188285	0,001715
65	0,190000	0,191921	-0,001921
66	0,190000	0,191921	-0,001921
67	0,190000	0,190965	-0,000965
68	0,190000	0,190089	-0,000089
69	0,190000	0,190089	-0,000089
70	0,190000	0,190089	-0,000089
71	0,190000	0,190089	-0,000089
72	0,190000	0,190248	-0,000248
73	0,190000	0,190248	-0,000248
74	0,190000	0,190248	-0,000248

1	2	3	4
75	0,190000	0,190248	-0,000248
76	0,190000	0,190248	-0,000248
77	0,190000	0,190248	-0,000248
78	0,190000	0,191045	-0,001045
79	0,190000	0,191045	-0,001045
80	0,190000	0,190248	-0,000248
81	0,190000	0,190482	-0,000482
82	0,190000	0,190482	-0,000482
83	0,190000	0,190482	-0,000482
84	0,190000	0,190482	-0,000482
85	0,190000	0,190482	-0,000482
86	0,190000	0,190482	-0,000482
87	0,190000	0,190482	-0,000482
88	0,190000	0,190482	-0,000482
89	0,190000	0,190482	-0,000482
90	0,190000	0,190482	-0,000482
91	0,190000	0,190482	-0,000482
92	0,190000	0,190482	-0,000482
93	0,190000	0,190482	-0,000482
94	0,190000	0,190482	-0,000482
95	0,190000	0,190482	-0,000482
96	0,190000	0,190482	-0,000482
97	0,190000	0,190482	-0,000482
98	0,190000	0,190482	-0,000482
99	0,190000	0,190482	-0,000482
100	0,190000	0,190482	-0,000482
101	0,190000	0,190482	-0,000482
102	0,190000	0,190482	-0,000482
103	0,190000	0,190482	-0,000482
104	0,190000	0,190482	-0,000482
105	0,190000	0,190482	-0,000482
106	0,190000	0,190482	-0,000482
107	0,190000	0,190482	-0,000482
108	0,190000	0,190482	-0,000482
109	0,190000	0,190482	-0,000482
110	0,190000	0,190482	-0,000482
111	0,190000	0,190482	-0,000482
112	0,190000	0,190482	-0,000482
113	0,190000	0,190482	-0,000482
114	0,190000	0,190482	-0,000482
115	0,190000	0,190482	-0,000482

1	2	3	4
116	0,190000	0,190482	-0,000482
117	0,190000	0,190482	-0,000482
118	0,190000	0,190482	-0,000482
119	0,190000	0,190482	-0,000482
120	0,190000	0,190482	-0,000482
121	0,190000	0,190482	-0,000482
122	0,190000	0,190482	-0,000482
123	0,190000	0,190482	-0,000482
124	0,190000	0,190482	-0,000482
125	0,190000	0,190482	-0,000482
126	0,190000	0,190482	-0,000482
127	0,190000	0,190482	-0,000482
128	0,190000	0,190482	-0,000482
129	0,190000	0,190482	-0,000482
130	0,190000	0,190482	-0,000482
131	0,190000	0,190131	-0,000131
132	0,190000	0,190131	-0,000131
133	0,190000	0,190131	-0,000131
134	0,190000	0,190131	-0,000131
135	0,190000	0,190131	-0,000131

Таблиця Г.2 – Порівняння спостережуваних та передбачуваних значень водневого показника

Модель: $y=a_0+a_1*x_2+a_2*x_2*x_3+a_3*x_3+a_4*x_1*x_3$ (pH)			
	Спостережувані	Передбачувані	Залишки
1	2	3	4
1	9,820000	9,812796	0,007204
2	9,820000	9,812796	0,007204
3	9,820000	9,812796	0,007204
4	9,820000	9,816717	0,003283
5	9,820000	9,816717	0,003283
6	9,820000	9,816717	0,003283
7	9,820000	9,816717	0,003283
8	9,820000	9,816717	0,003283
9	9,820000	9,816717	0,003283
10	9,820000	9,816717	0,003283
11	9,820000	9,816717	0,003283
12	9,820000	9,816717	0,003283
13	9,820000	9,816717	0,003283
14	9,820000	9,816717	0,003283
15	9,820000	9,824558	-0,004558
16	9,820000	9,824558	-0,004558
17	9,820000	9,824558	-0,004558
18	9,830000	9,809489	0,020511
19	9,830000	9,809489	0,020511
20	9,830000	9,809489	0,020511
21	9,830000	9,809489	0,020511
22	9,830000	9,809489	0,020511
23	9,830000	9,809489	0,020511
24	9,830000	9,809489	0,020511
25	9,830000	9,809489	0,020511
26	9,830000	9,809489	0,020511
27	9,830000	9,809489	0,020511
28	9,830000	9,809489	0,020511
29	9,830000	9,809489	0,020511
30	9,830000	9,809489	0,020511
31	9,830000	9,809489	0,020511
32	9,830000	9,809489	0,020511
33	9,830000	9,809489	0,020511
34	9,790000	9,809489	-0,019489
35	9,790000	9,809489	-0,019489
36	9,790000	9,809489	-0,019489
37	9,790000	9,809489	-0,019489
38	9,790000	9,809489	-0,019489

1	2	3	4
39	9,790000	9,809489	-0,019489
40	9,790000	9,809489	-0,019489
41	9,790000	9,809489	-0,019489
42	9,790000	9,809489	-0,019489
43	9,790000	9,809489	-0,019489
44	9,790000	9,809489	-0,019489
45	9,790000	9,809489	-0,019489
46	9,790000	9,809489	-0,019489
47	9,790000	9,809489	-0,019489
48	9,790000	9,797727	-0,007727
49	9,790000	9,797727	-0,007727
50	9,790000	9,797727	-0,007727
51	9,790000	9,797727	-0,007727
52	9,790000	9,797727	-0,007727
53	9,790000	9,797727	-0,007727
54	9,790000	9,797727	-0,007727
55	9,790000	9,797727	-0,007727
56	9,790000	9,797727	-0,007727
57	9,790000	9,797727	-0,007727
58	9,790000	9,797727	-0,007727
59	9,790000	9,797727	-0,007727
60	9,790000	9,797727	-0,007727
61	9,790000	9,797727	-0,007727
62	9,790000	9,797727	-0,007727
63	9,790000	9,797727	-0,007727
64	9,790000	9,797727	-0,007727
65	9,790000	9,785964	0,004036
66	9,790000	9,785964	0,004036
67	9,790000	9,785964	0,004036
68	9,790000	9,785964	0,004036
69	9,790000	9,785964	0,004036
70	9,790000	9,785964	0,004036
71	9,790000	9,785964	0,004036
72	9,790000	9,785964	0,004036
73	9,790000	9,785964	0,004036
74	9,790000	9,785964	0,004036
75	9,790000	9,785964	0,004036
76	9,790000	9,785964	0,004036
77	9,790000	9,785964	0,004036
78	9,790000	9,785964	0,004036
79	9,790000	9,785964	0,004036

1	2	3	4
80	9,790000	9,785964	0,004036
81	9,790000	9,793806	-0,003806
82	9,790000	9,799602	-0,009602
83	9,790000	9,799602	-0,009602
84	9,790000	9,799602	-0,009602
85	9,790000	9,787572	0,002428
86	9,790000	9,787572	0,002428
87	9,790000	9,787572	0,002428
88	9,790000	9,787572	0,002428
89	9,790000	9,787572	0,002428
90	9,790000	9,787572	0,002428
91	9,790000	9,787572	0,002428
92	9,790000	9,787572	0,002428
93	9,790000	9,787572	0,002428
94	9,790000	9,787572	0,002428
95	9,790000	9,787572	0,002428
96	9,790000	9,787572	0,002428
97	9,790000	9,787572	0,002428
98	9,790000	9,787572	0,002428
99	9,790000	9,787572	0,002428
100	9,790000	9,787572	0,002428
101	9,790000	9,787572	0,002428
102	9,790000	9,787572	0,002428
103	9,790000	9,787572	0,002428
104	9,790000	9,787572	0,002428
105	9,790000	9,787572	0,002428
106	9,790000	9,787572	0,002428
107	9,790000	9,787572	0,002428
108	9,790000	9,787572	0,002428
109	9,790000	9,787572	0,002428
110	9,790000	9,787572	0,002428
111	9,790000	9,787572	0,002428
112	9,790000	9,787572	0,002428
113	9,790000	9,787572	0,002428
114	9,790000	9,794141	-0,004141
115	9,790000	9,794141	-0,004141
116	9,790000	9,794141	-0,004141
117	9,790000	9,794141	-0,004141
118	9,790000	9,794141	-0,004141
119	9,790000	9,794141	-0,004141
120	9,790000	9,794141	-0,004141

1	2	3	4
121	9,790000	9,794141	-0,004141
122	9,790000	9,794141	-0,004141
123	9,790000	9,794141	-0,004141
124	9,790000	9,794141	-0,004141
125	9,790000	9,794141	-0,004141
126	9,790000	9,794141	-0,004141
127	9,790000	9,794141	-0,004141
128	9,790000	9,794141	-0,004141
129	9,790000	9,794141	-0,004141
130	9,790000	9,794141	-0,004141
131	9,790000	9,795255	-0,005255
132	9,790000	9,788686	0,001314
133	9,790000	9,788686	0,001314
134	9,790000	9,788686	0,001314
135	9,790000	9,788686	0,001314

**Обсяг та характеристика контрольованих параметрів
системи знесолення турбінного конденсату**

Таблиця Д.1 – Контрольовані параметри системи знесолення турбінного конденсату

Найменування контрольованого параметра	Позначення	Номинальне значення	Допустиме відхилення	Місце встановлення приладу	Примітка
1	2	3	4	5	6
1. Витрати конденсату через ВРП ЕМФ, $\text{м}^3/\text{год.}$	1RE10F01B1 1RE10F01P1	1500÷1700	500÷1850	Дифманометр за місцем; МЦУ БЗУ панель 1RE10J06	
2. Витрати конденсату через СРП ЕМФ, $\text{м}^3/\text{год.}$	1RE20F01B1 1RE20F01P1	3000÷3500	min- 800 max- 3700	—"	
3. Витрати води на промивання ЕМФ, $\text{м}^3/\text{час}$	1RE11F01B1 1RE11F01P1	1400	до 1600	—"	
4. Витрати конденсату через ВРП ФЗД, $\text{м}^3/\text{год.}$	1RE10F02B1÷F06B1 1RE10F02P1÷F06P1	600÷750	300÷900	За місцем (дифманометр); МЦУ БЗУ панелі 1RE10J02, 1RE10J03	При $F < 300 \text{ м}^3/\text{год.}$ опускається смола й збільшується $\Delta P_{\text{сл}}$
5. Витрати конденсату по байпасу в НРП при пуску ФЗД, $\text{м}^3/\text{год.}$	1RE10F12B1÷F16B1; 1RE10F12P1	150	80÷175	За місцем (дифманометр); МЦУ БЗУ панель 1RE10J07	При $F < 80 \text{ м}^3/\text{год.}$ опускається смола й збільшується $\Delta P_{\text{сл}}$
6. Витрати відмивних вод до ФЗД та ФУ, $\text{м}^3/\text{год.}$	1RE21F01B1 1RE21F01P1	30÷90	—	За місцем (дифманометр); МЦУ БЗУ панель 1RE10J01	
7. Тиск на вході ЕМФ, кгс/см^2	1RE10P01B1	7÷8	6,5÷10,0	За місцем, відм. 15.00, ряд В, вісь 9	$> 8 \text{ кгс/см}^2$ при роботі одного КЕН-I ст.
8. Тиск на виході ЕМФ, кгс/см^2	1RE20P01B1	5÷6	4,0÷10,0	—"	
9. Перепад тиску на ЕМФ, кгс/см^2	1RE10P01B2 1RE10P01P1	1,5÷1,7	0,2÷2,5	За місцем; МЦУ БЗУ панель 1RE10J06	$> 2,0 \text{ кгс/см}^2$ короткочасно
10. Тиск у верхній камері ФЗД, кгс/см^2	1RE20P02B1÷P06B1	5÷6	3,5÷10,0	За місцем ФЗД	$> 6 \text{ кгс/см}^2$ при роботі одного КЕН-I ст.

Продовження таблиці Д.1

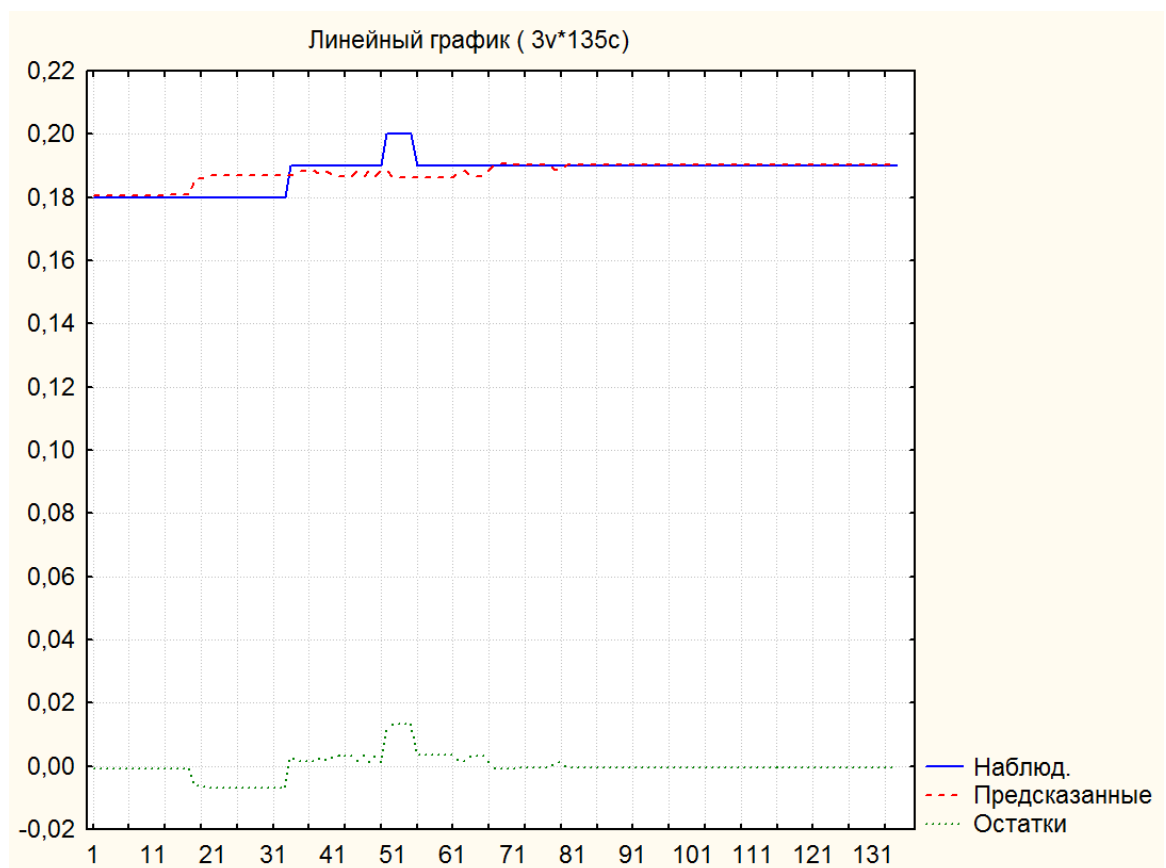
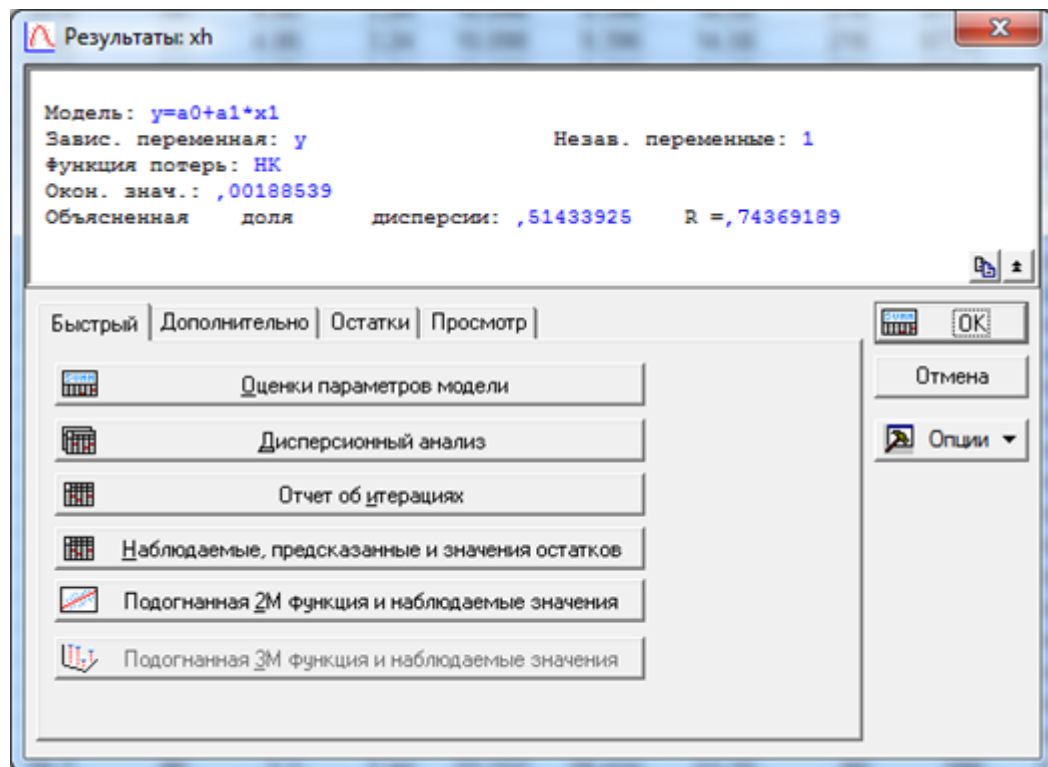
1	2	3	4	5	6
11. Тиск у нижній камері ФЗД, кгс/см^2	1RE20P12B1÷ P16B1	5÷6	3,0÷10,0	—"	—"
12. Перепад тиску на вході й виході ФЗД, кгс/см^2	1RE20P02B2÷ P06B2; 1RE20P02P1	1÷2	0,5 ÷ 3,0	дифманометр за місцем; панель 1RE10J07	
13. Перепад тиску на фільтруючому шарі ФЗД (робочий), кгс/см^2	1RE20P12B3÷ P16B3; 1RE20P12P1÷ F16P1;	0,1÷0,3	0,05÷0,5	За місцем дифманометр; МЦУ БЗУ панель 1RE10J07	$\Delta P_{\text{сл}} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ короткочасно;
14. Перепад тиску на фільтруючому шарі ФЗД (пусковий), кгс/см^2	1RE20P12B2÷ P16B2; 1RE20P12P2÷ P16P2	-0,1 ÷ - 0,3	-0,1 ÷ -0,3	—"	Від'ємні значення $\Delta P_{\text{сл}}$ при пуску ФЗД при $P_{\text{верх}} < P_{\text{низ}}$
15. Тиск на виході ФЗД, кгс/см^2	1RE20P07B1÷ P11B1	2÷5	1,5÷9,0	За місцем	При $P_{\text{вых}} < 1,5 \text{ кгс/см}^2$ не надходить проба до експрес- лабораторії
16. Тиск на виході ФУ, кгс/см^2	1RE30P11B1÷ P15B1	1,7÷4,7	0÷7,5	—"	
17. Перепад тиску на ФУ, кгс/см^2	1RE30P01B1, P03B1, P05B1, P07B1, P09B1; 1RE30P01P1, P03P1, P05P1, P07P1, P09P1	0,1÷0,3	0,1÷1,5	За місцем (дифманометр) МЦУ БЗУ панелі 1RE10J02÷ J03	При $\Delta P > 0,3$ потрібне додаткове промивання уловлювача
18. Тиск у трубопроводі гідроперевантаження, кгс/см^2 - відм. 15.00	1RE22P01B1;	≤ 6,0		За місцем	
19. Тиск стисненого повітря, кгс/см^2 - відм. 15.00 - відм. 0.00	1RE24P03B1 1RE24P02B1	5,5	5,0÷6,0	По месту Манометры; -"	
20. Температура конденсата перед ФЗД БЗУ, $^{\circ}\text{C}$	1RE10T02P1	20÷40	< 55 <u>60</u>	МЦУ БЗУ панель 1RE10J01	При $T \geq 55^{\circ}\text{C}$ - відкривається байпас ФЗД 1RE20S02 <u>Короткочасно, не</u> <u>більше 8 годин</u>

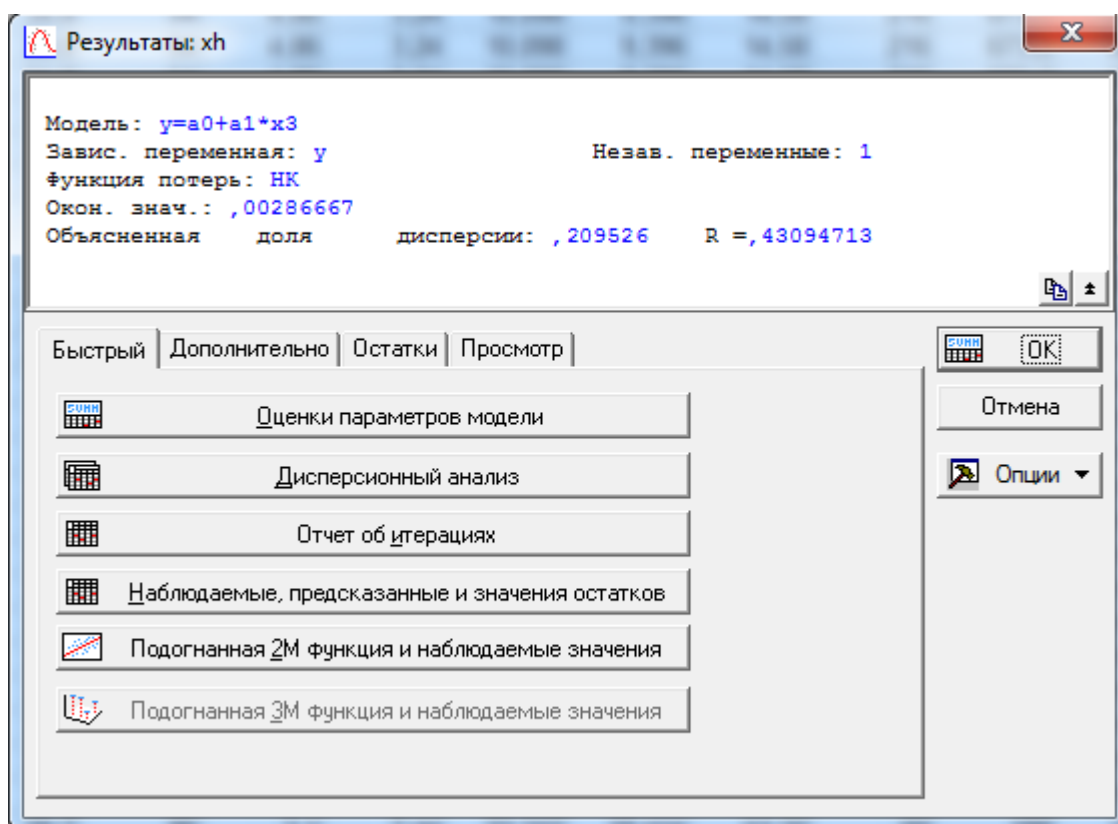
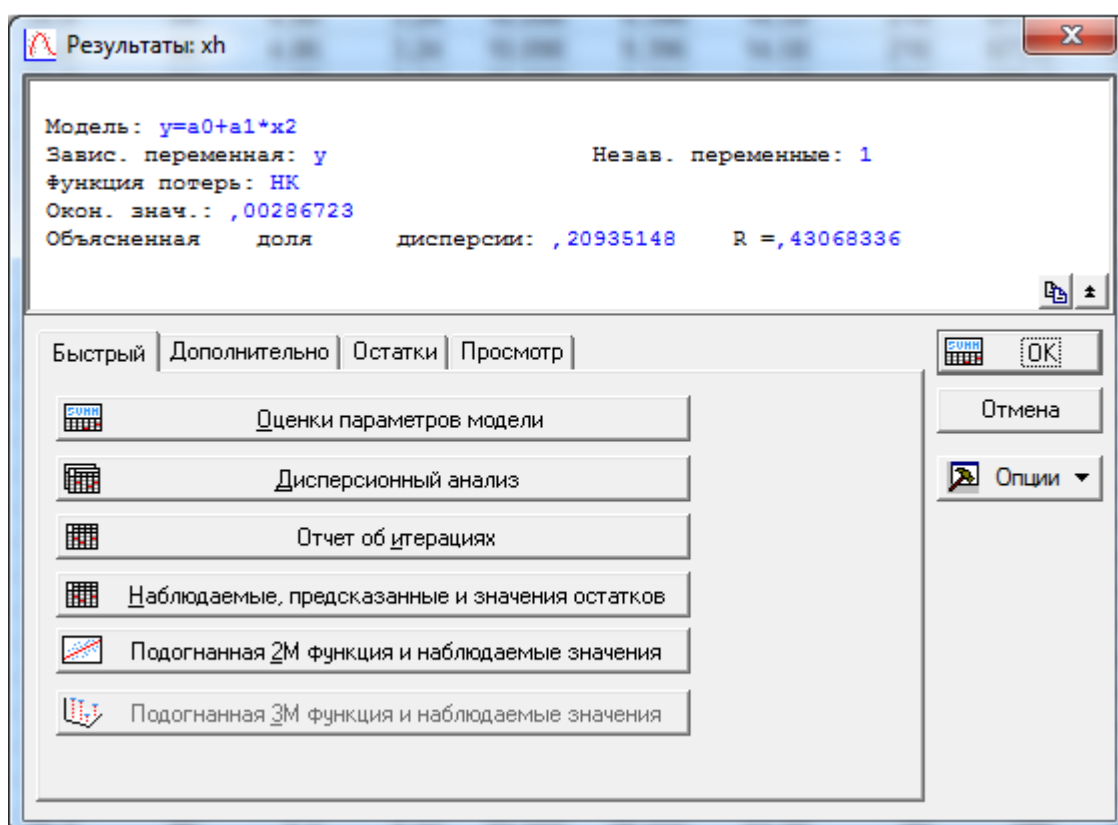
Закінчення таблиці Д.1

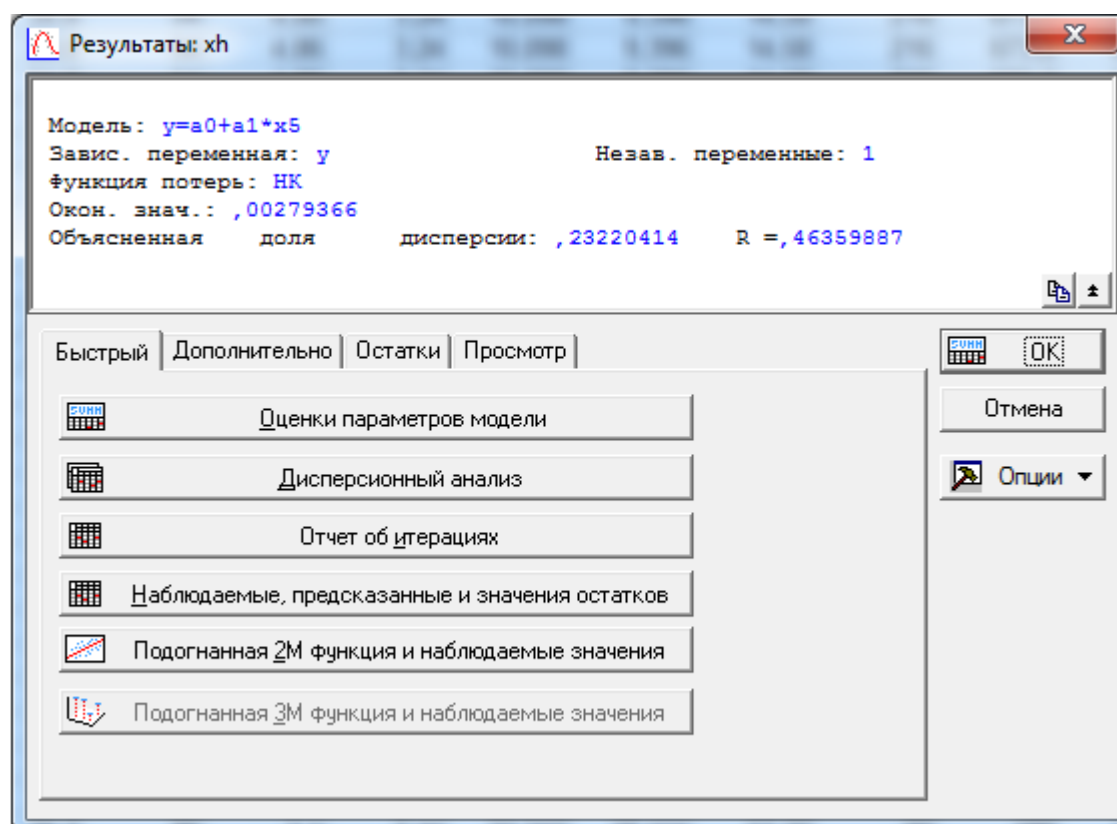
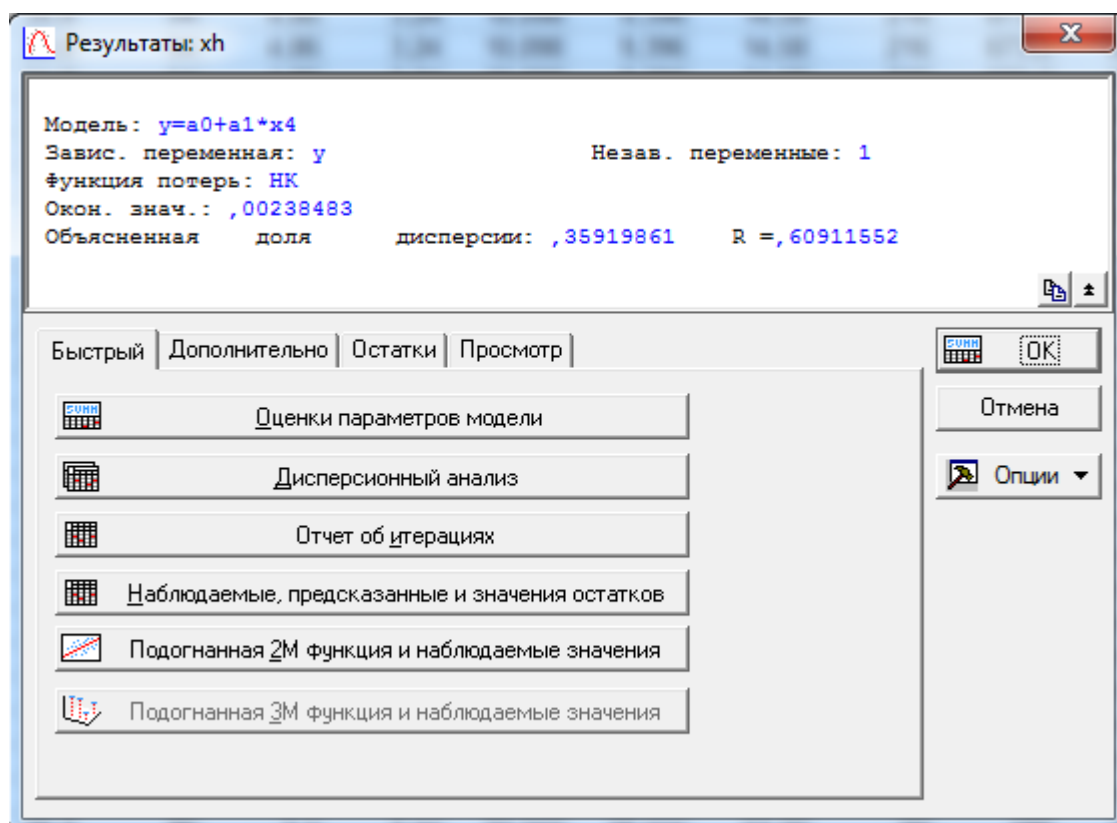
1	2	3	4	5	6
21. Температура обмоток катушки ЕМФ, °C	1RE10T05P1	100÷140	< 150	—"	При T=150 ⁰ C горит табло «Неисправность ША»; При T=170 °C автоматично відключається ЕМФ.
22. Електропровідність основного конденсату після ФЗД, мкСм/см	1RX32Q03P1÷Q07P1 ; ручний кондуктометр СПК-1	0,05÷0,2 0,04÷0,2	до 0,3 0,04- 0,3	МЦУ БЗУ панель 1RE10J04 експрес-лабораторія	Проба без колонки —” —
23. Напруга живлення котушки, В	Вольтметр	360÷410	300÷420	ЩТА ЕМФ	
24. Сила струму намагнічування котушки ЕМФ, А	Амперметр	180÷200	130÷210 - (коротко-часно)	МЦУ БЗУ панель 1RE10J01	Підтримується залежно від T ⁰ катушки (за нормальних умов T<150 °C)
25. Показчик положення регуляторів витрати через ВРП ФЗД, %	1RE20S19P1÷S23P1	50÷100		МЦУ БЗУ панель 1RE10J08	
26. Електропровідність живильної води перед ПГ-1, мкСм/см	1RX41Q01P2	3,0÷5,0	до 2,5	МЦУ ГАУ панель 1RV20J01	Проба без колонки
27. рН живильної води перед ПГ-2, од.	1RX41Q06P2	8,8÷9,2		—"	—"

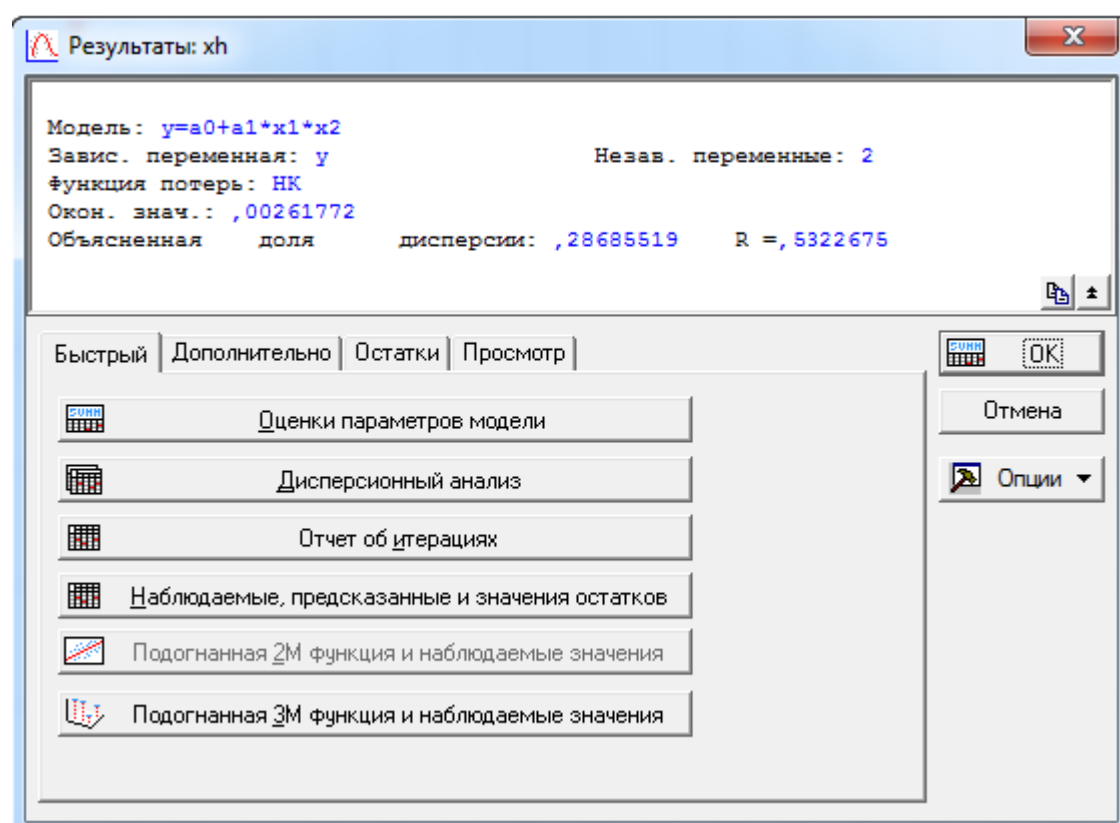
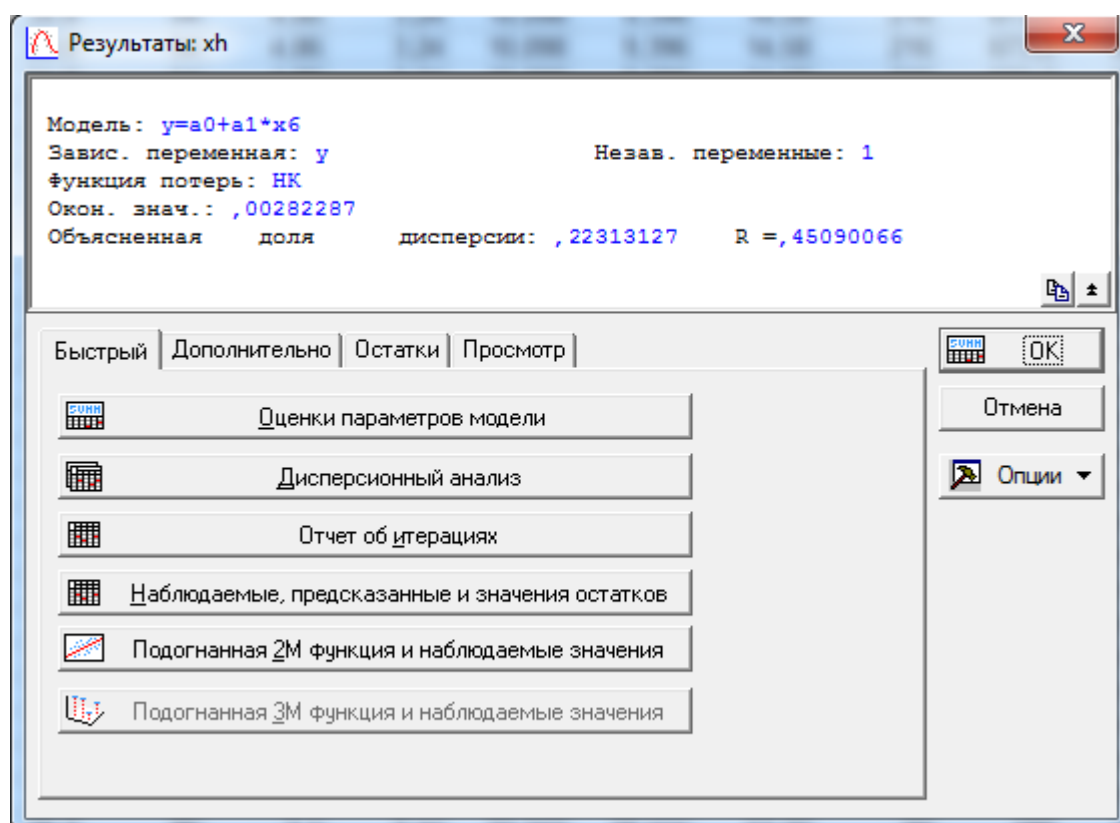
Кореляційний аналіз факторів та побудова математичних залежностей у STATISTICA

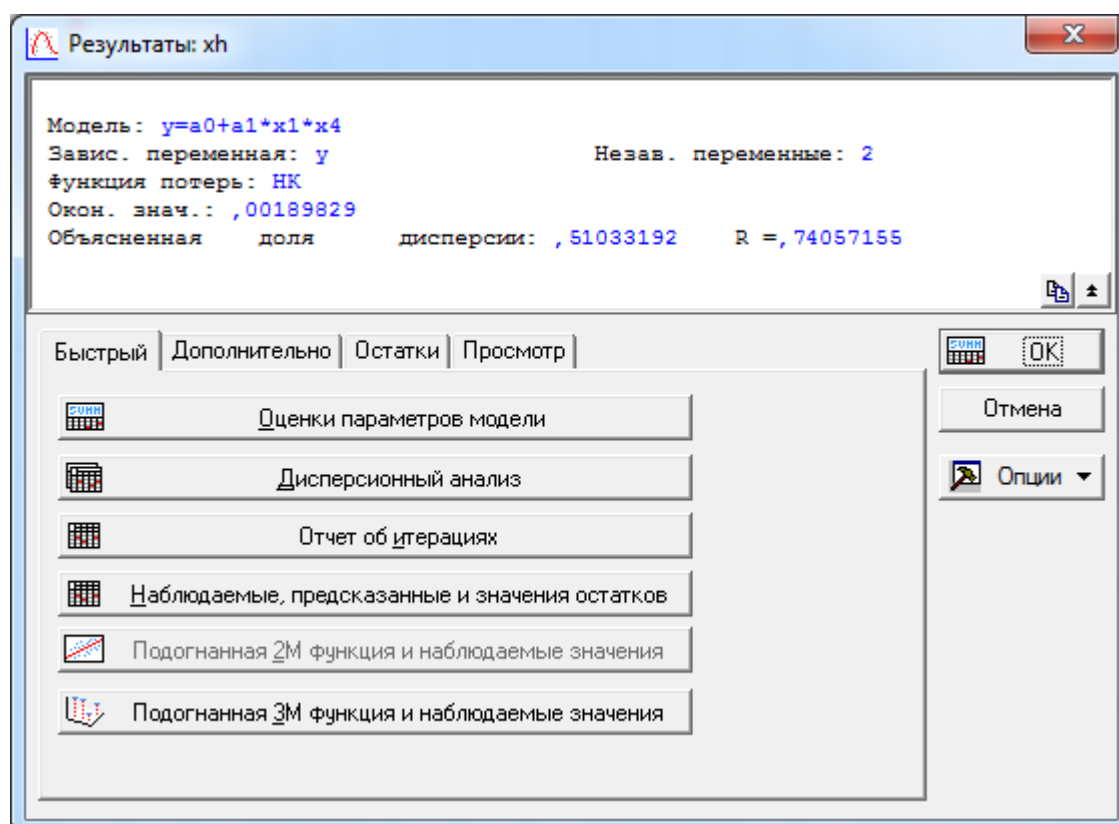
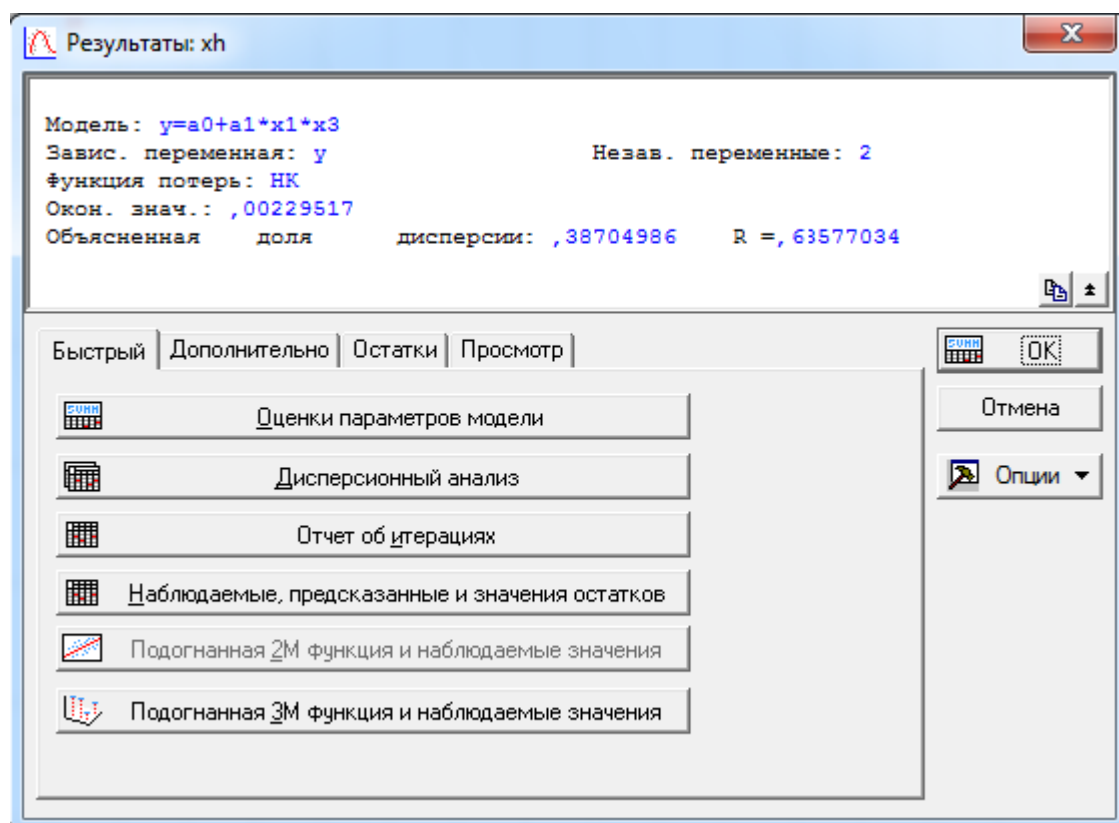
Е.1 Дослідження відносно питомої електропровідності

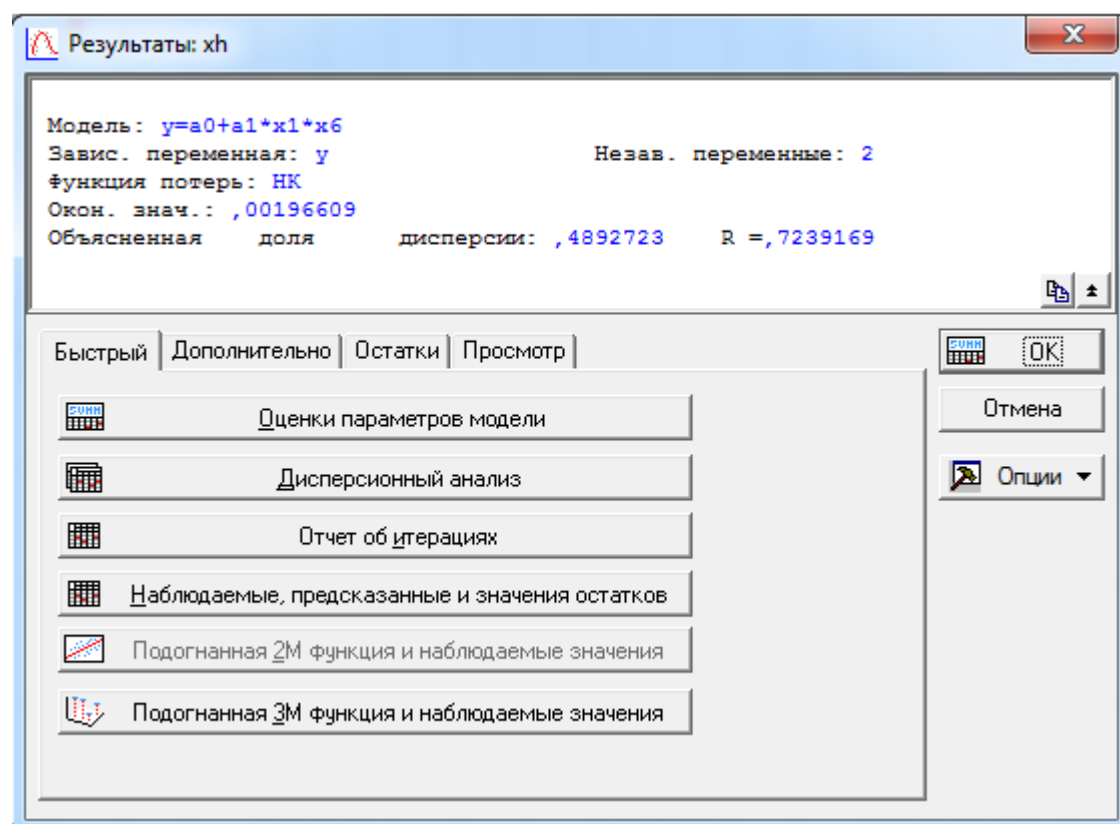
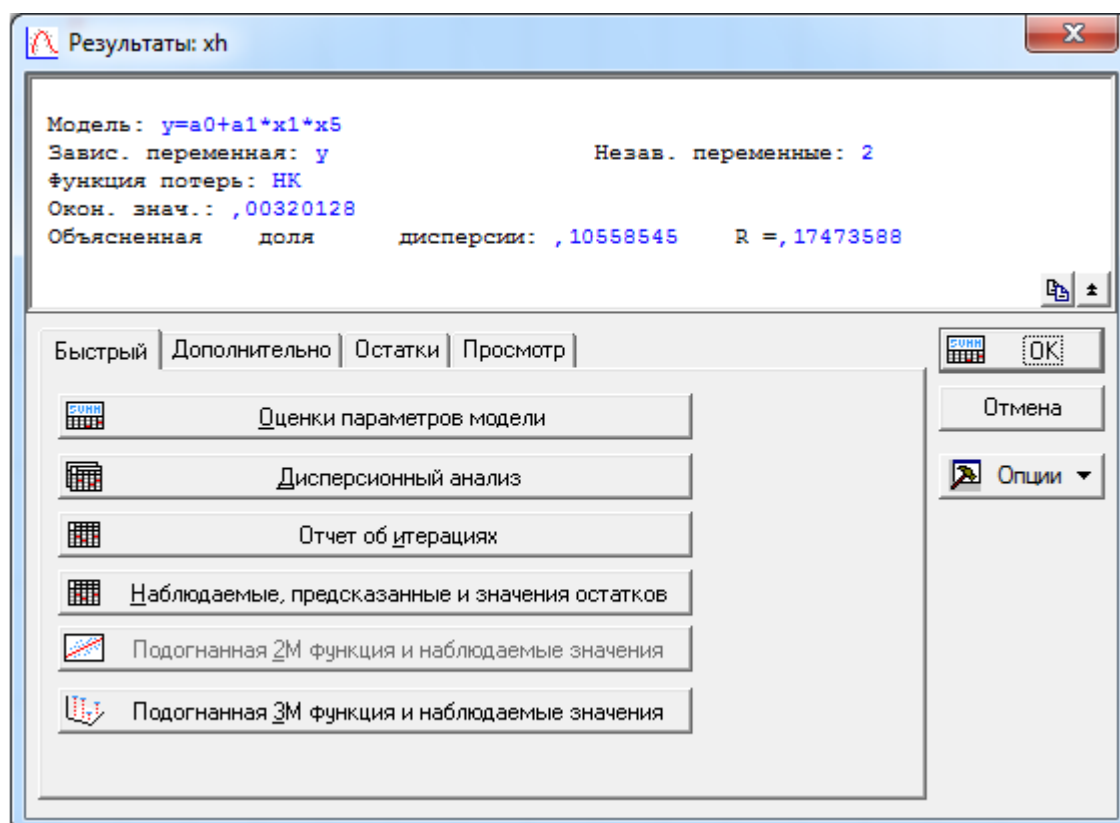


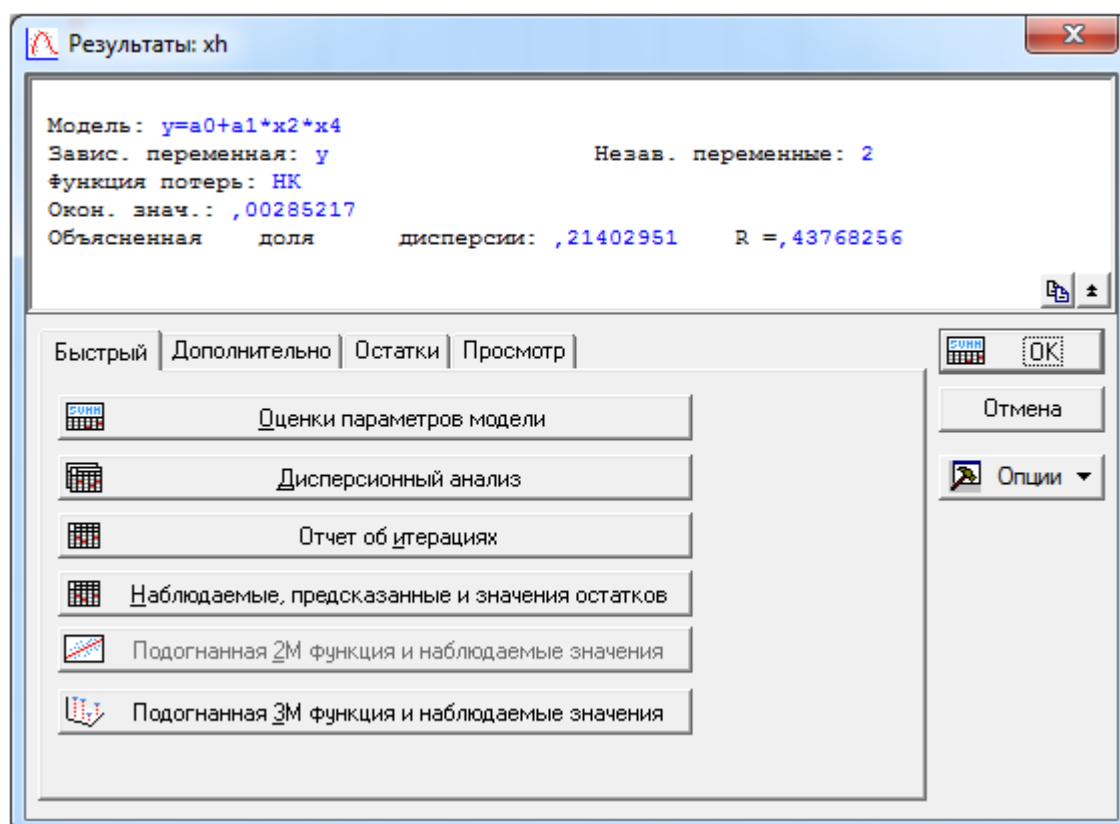
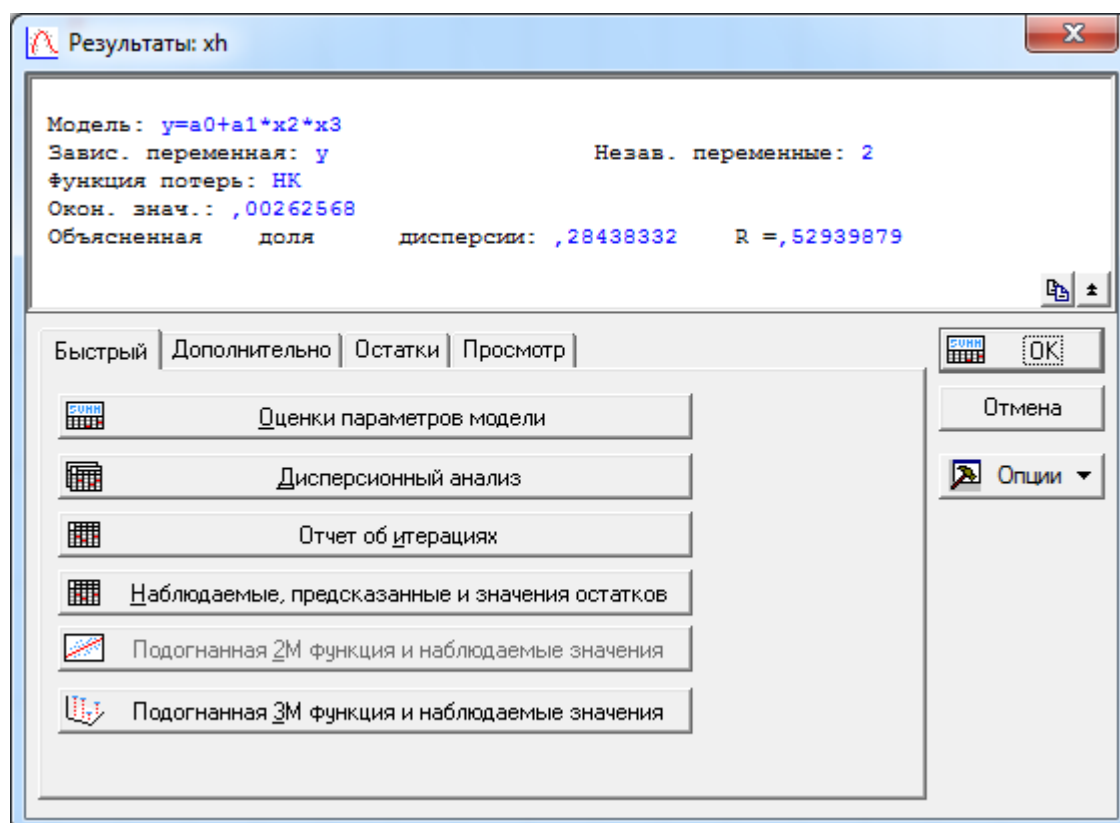


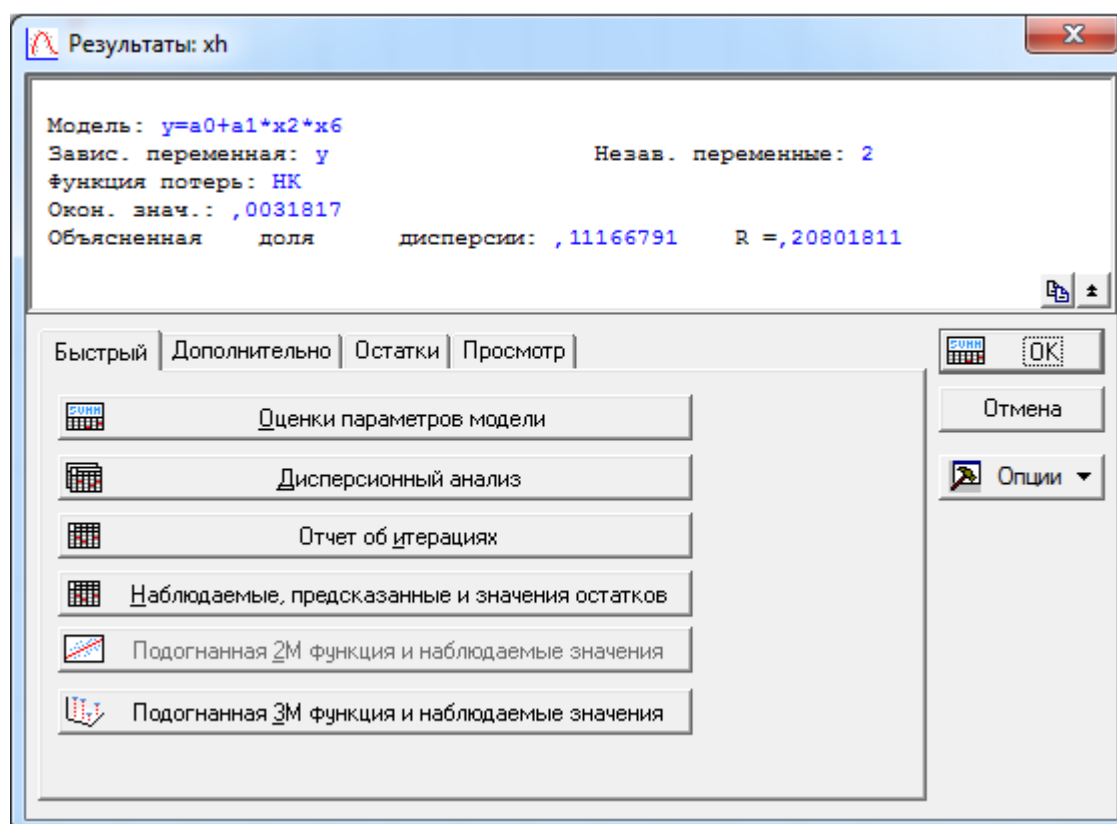
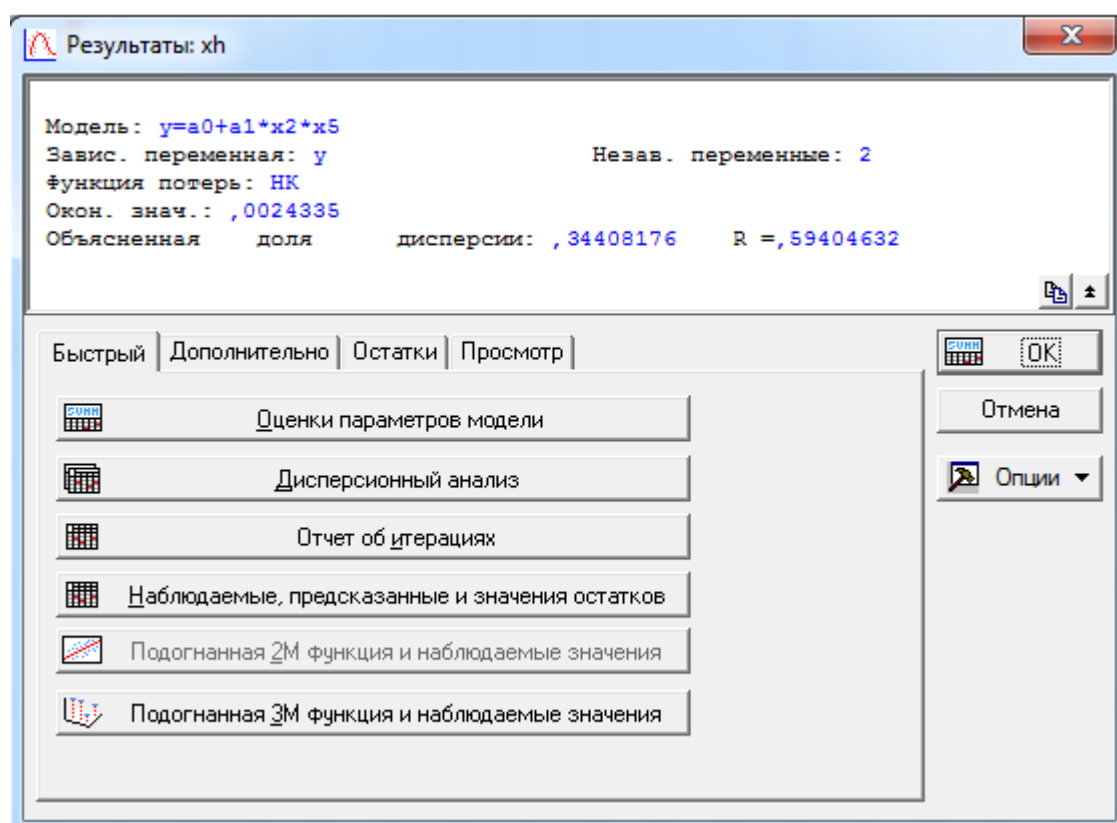


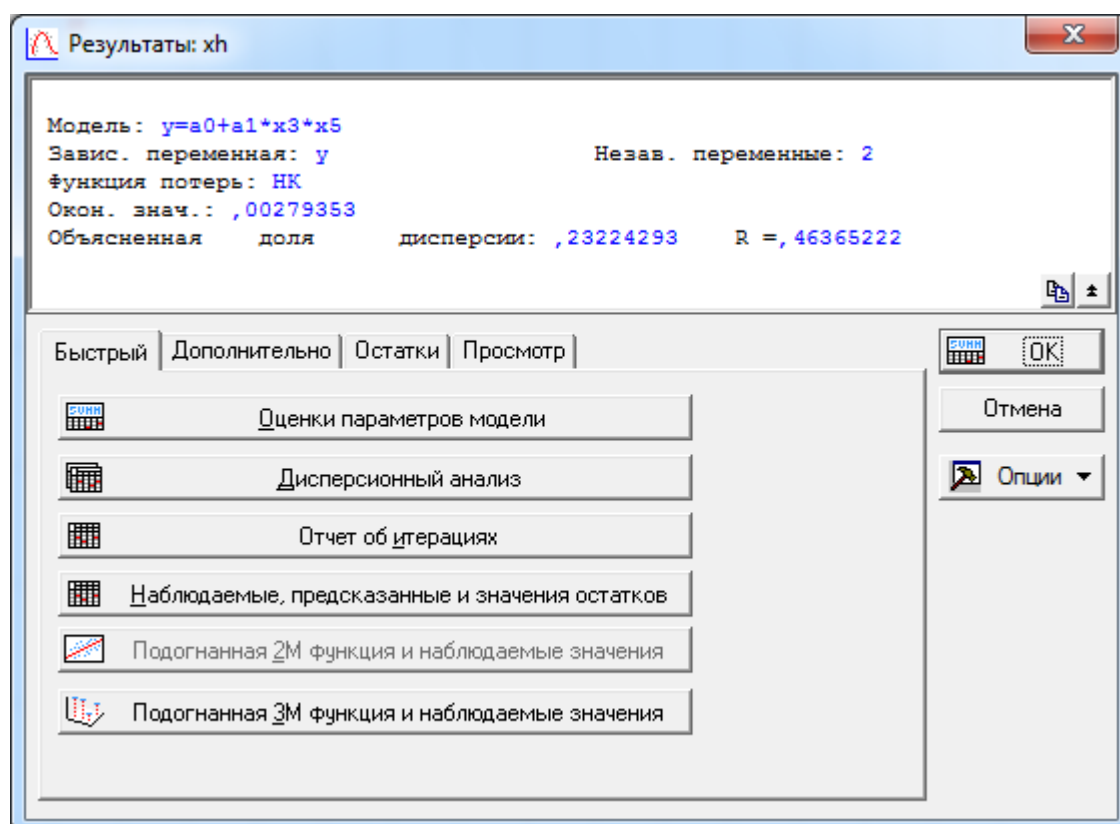
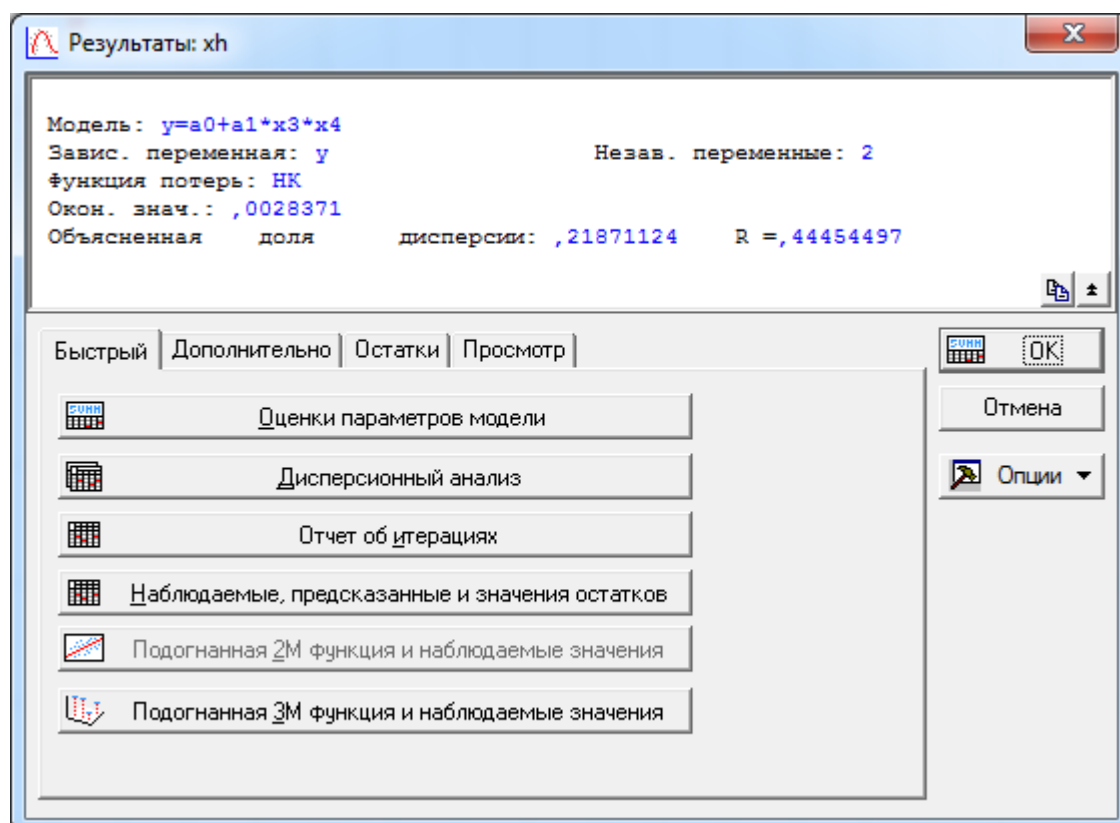


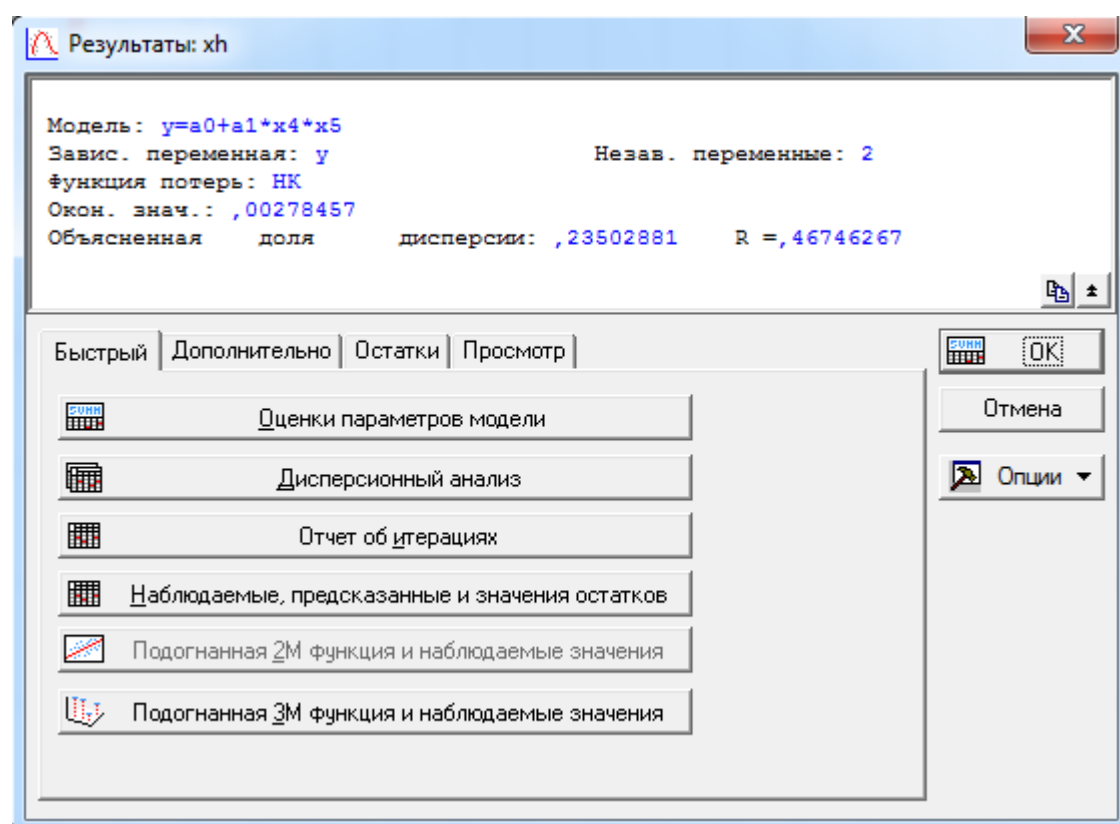
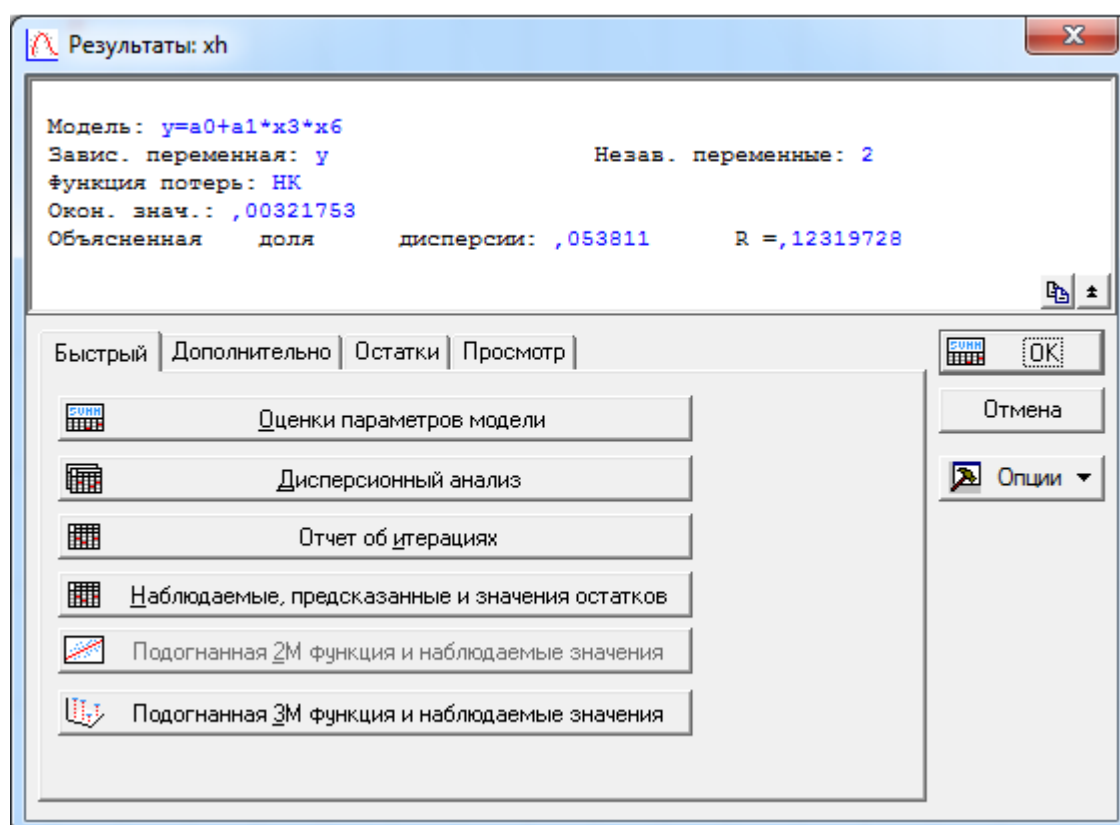


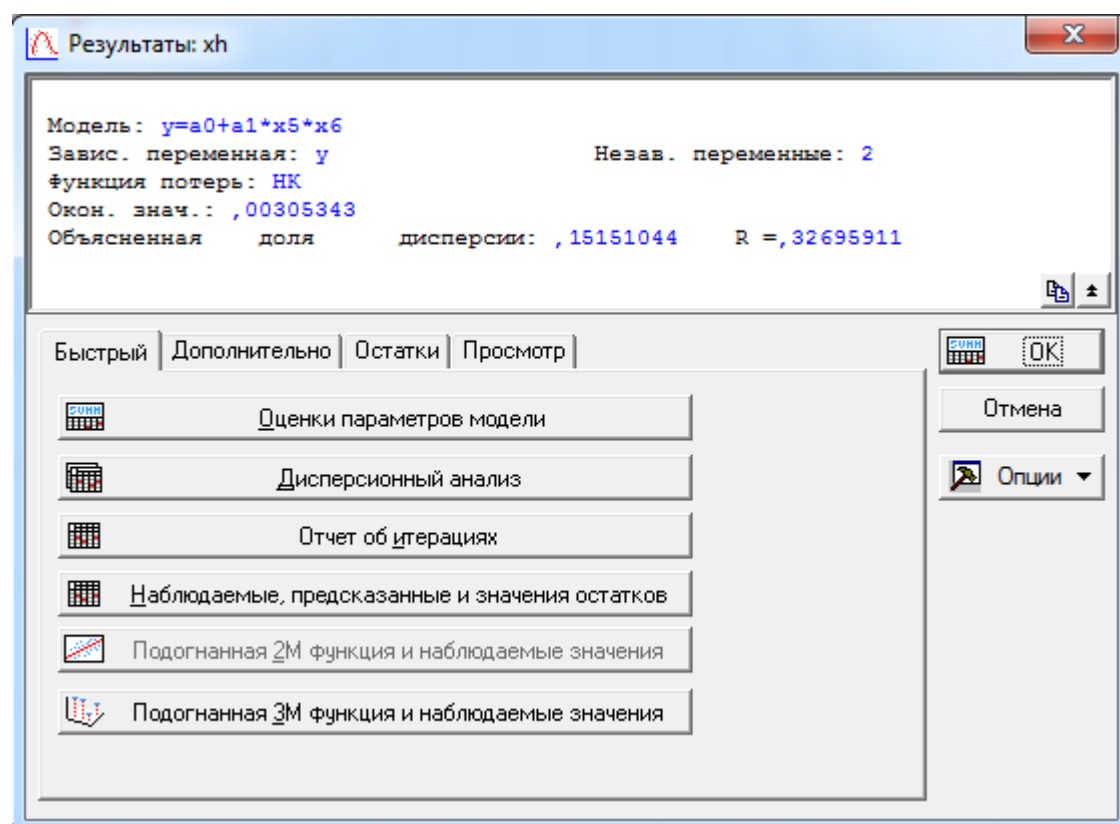
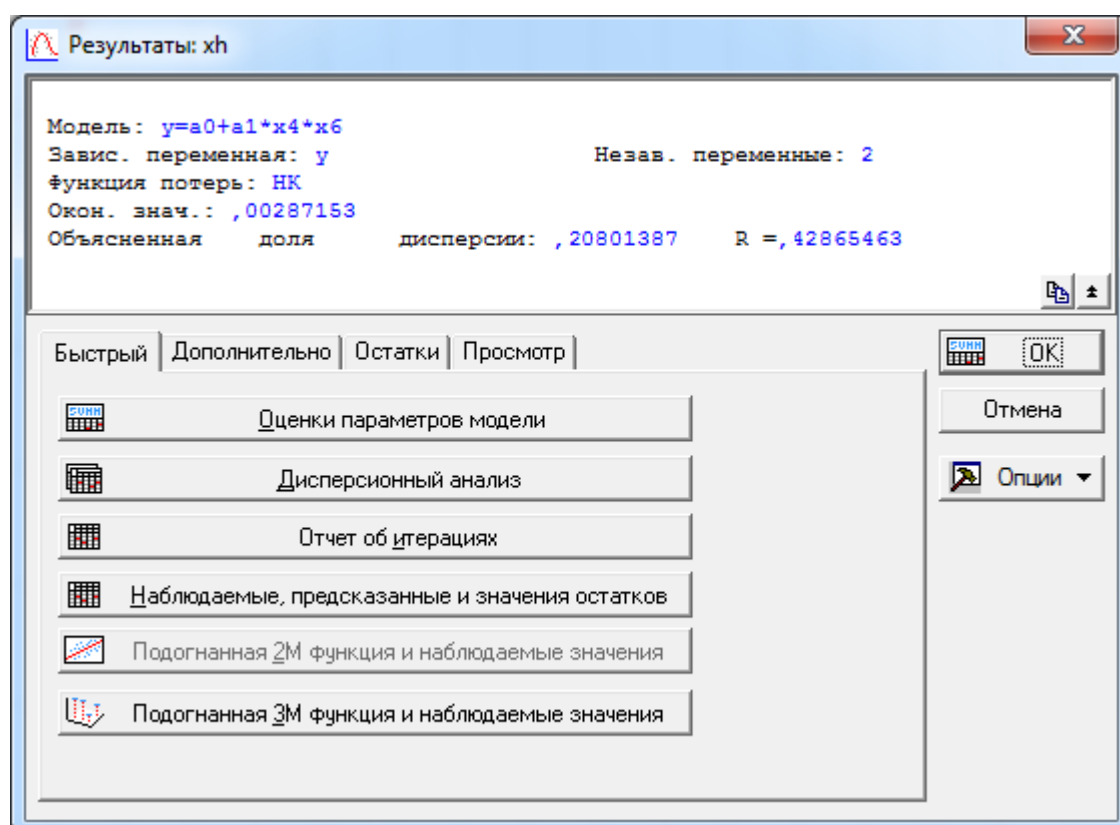


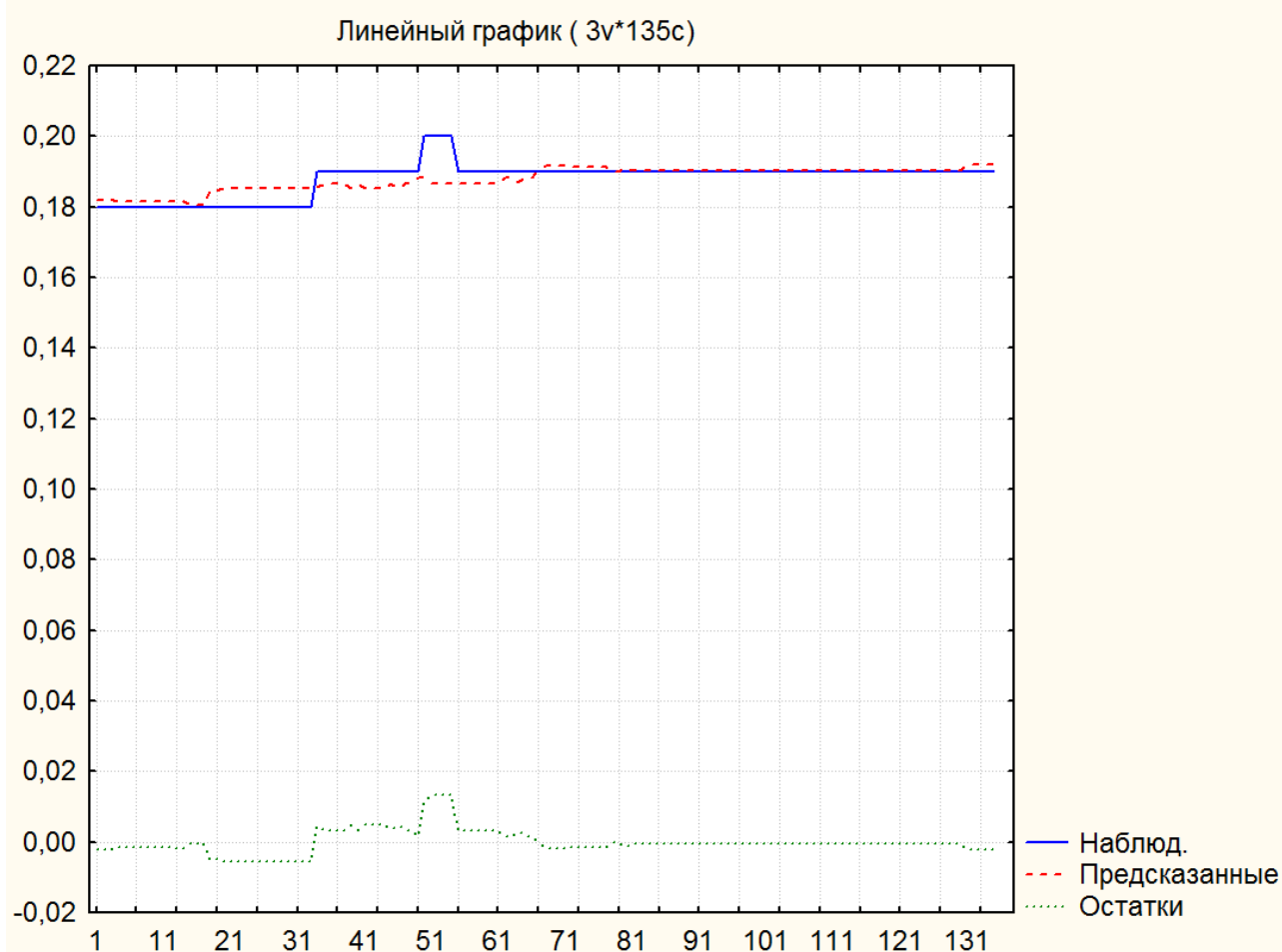
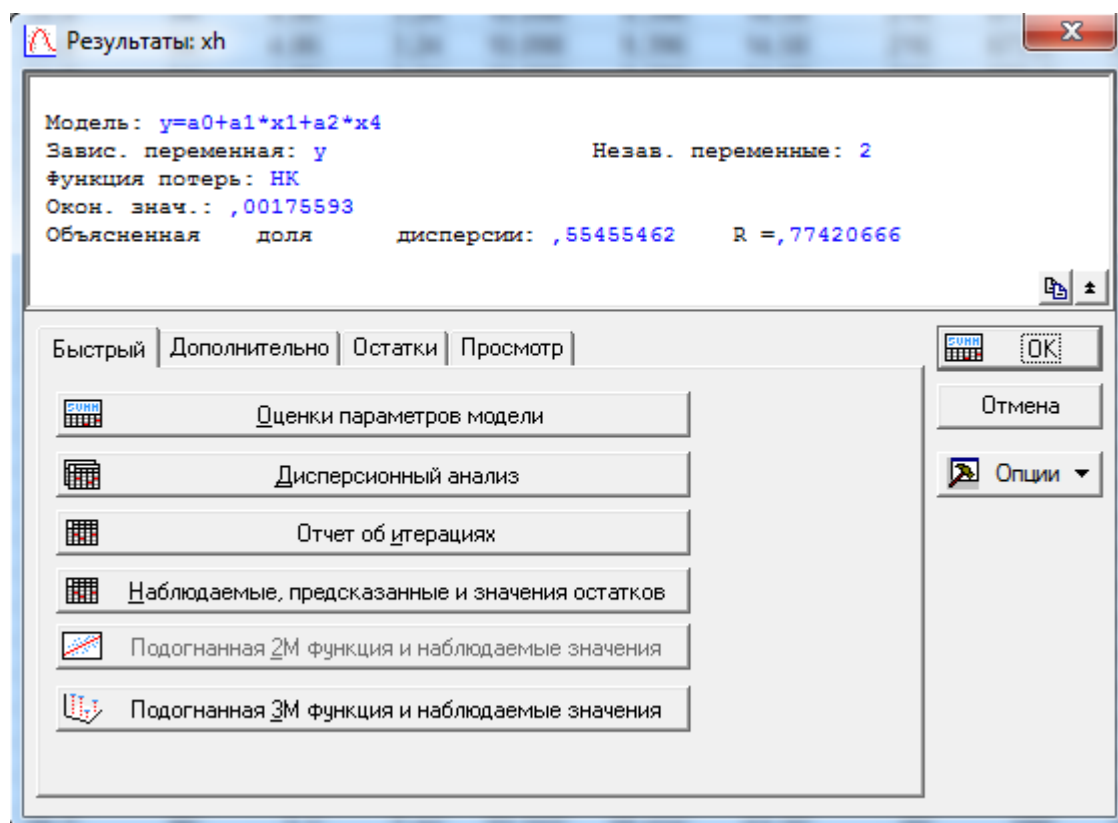


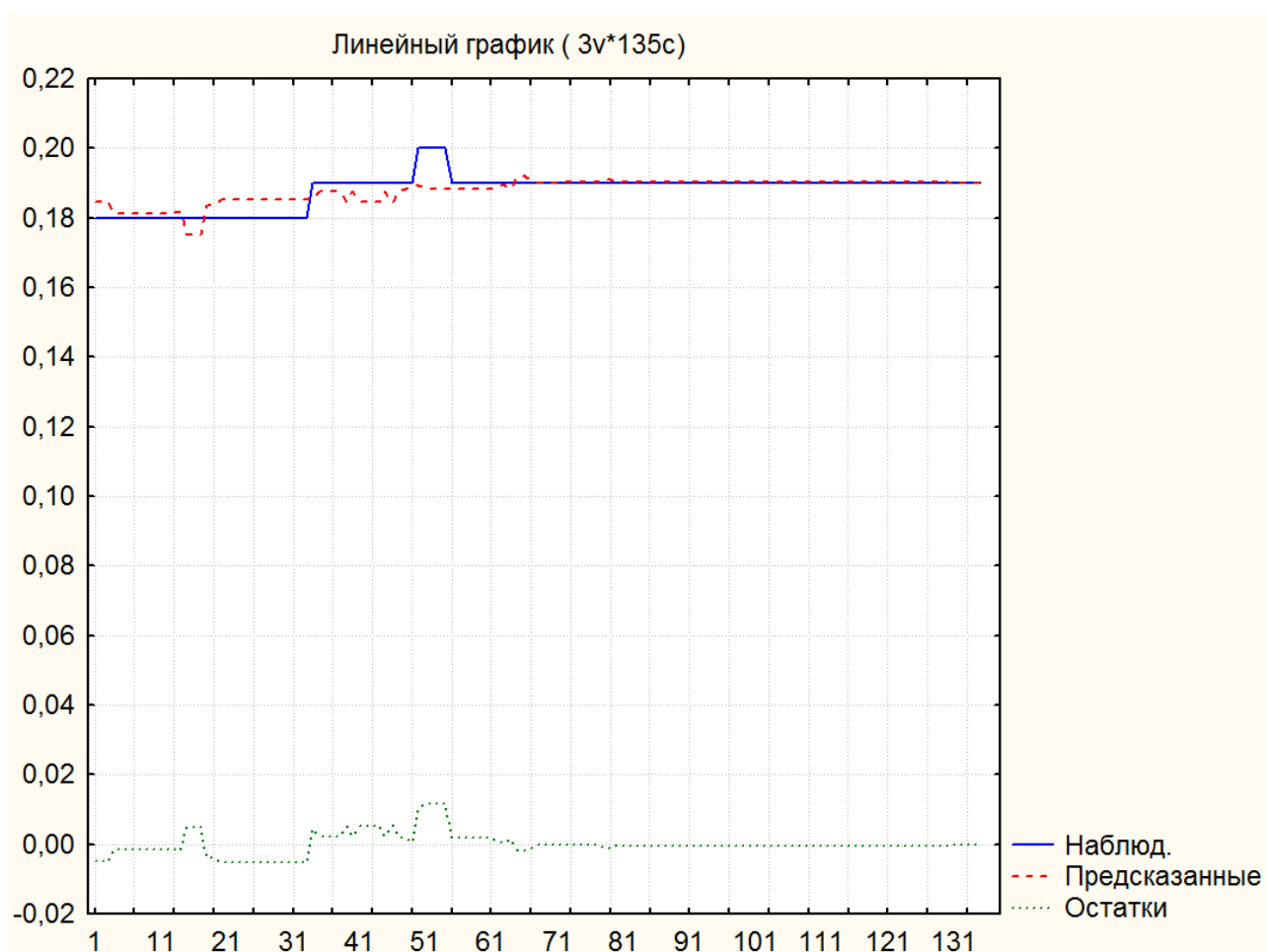
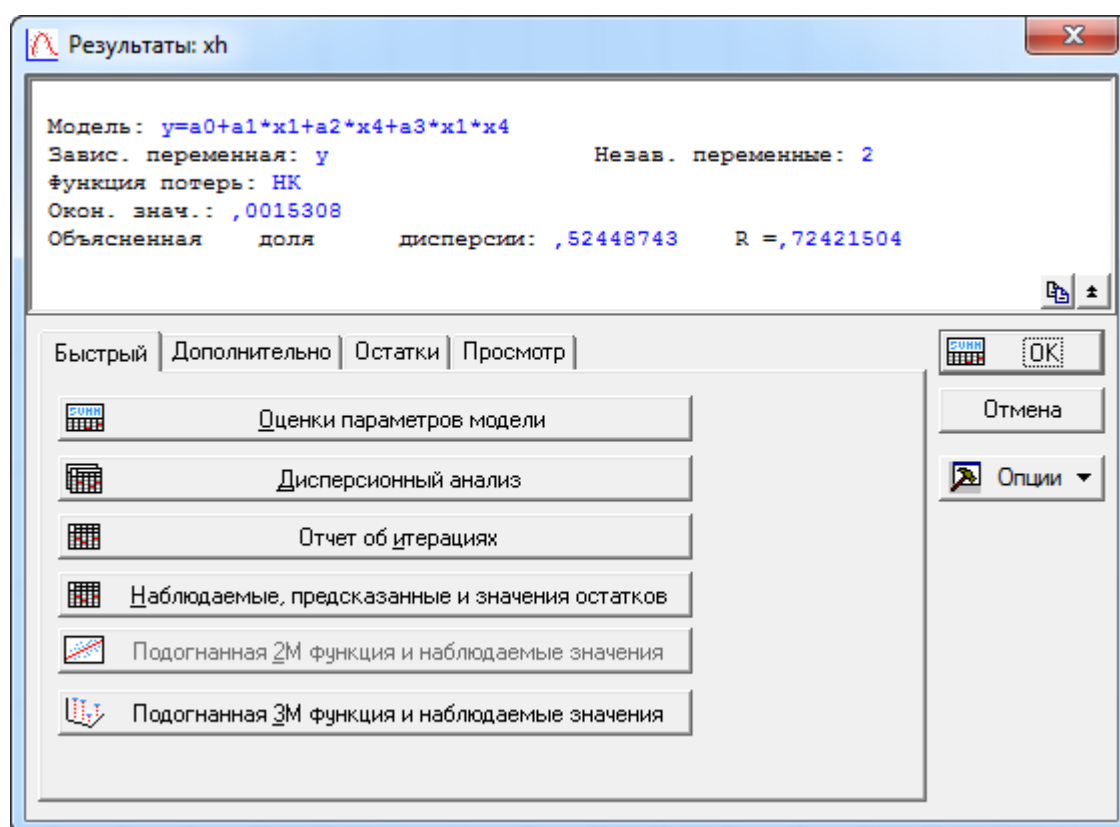


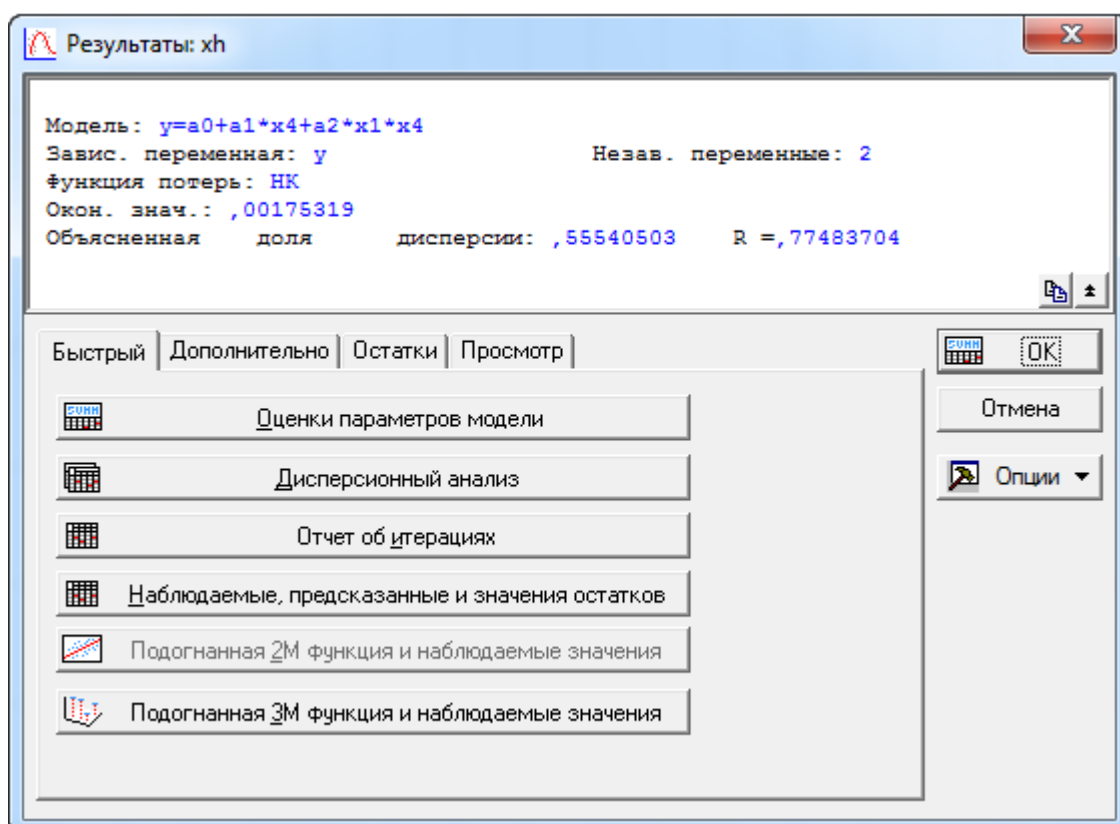
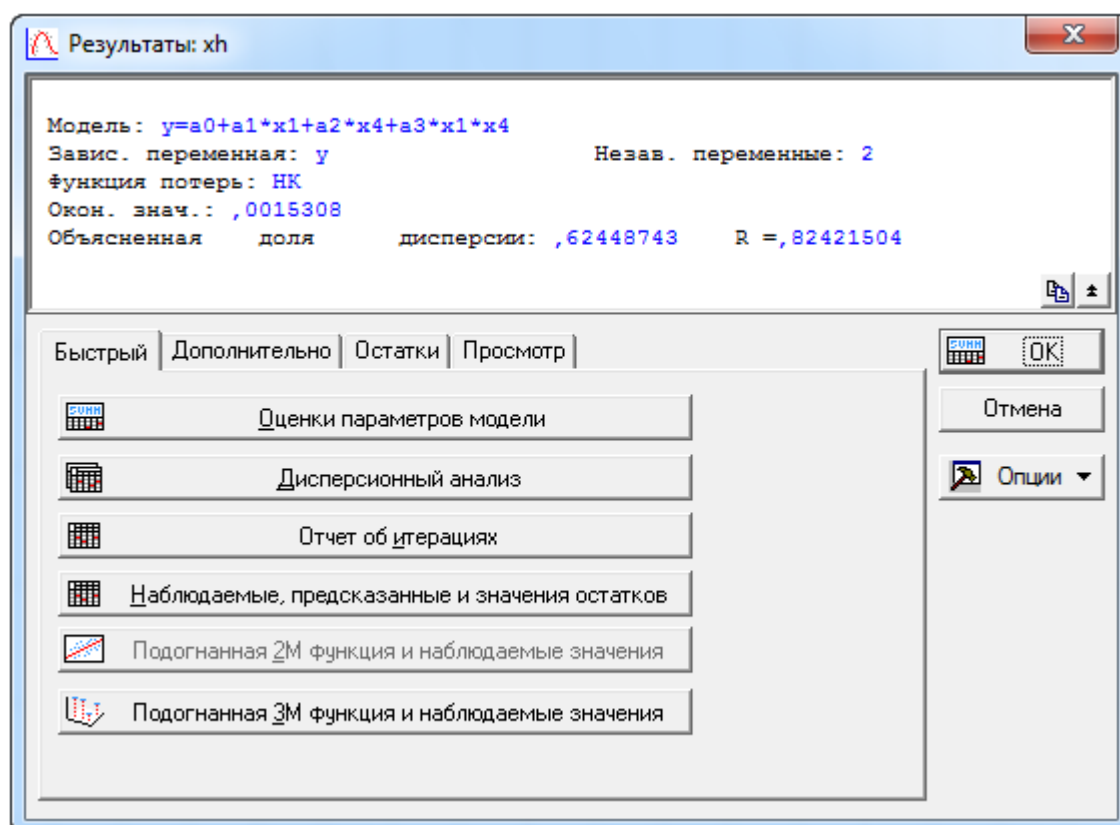


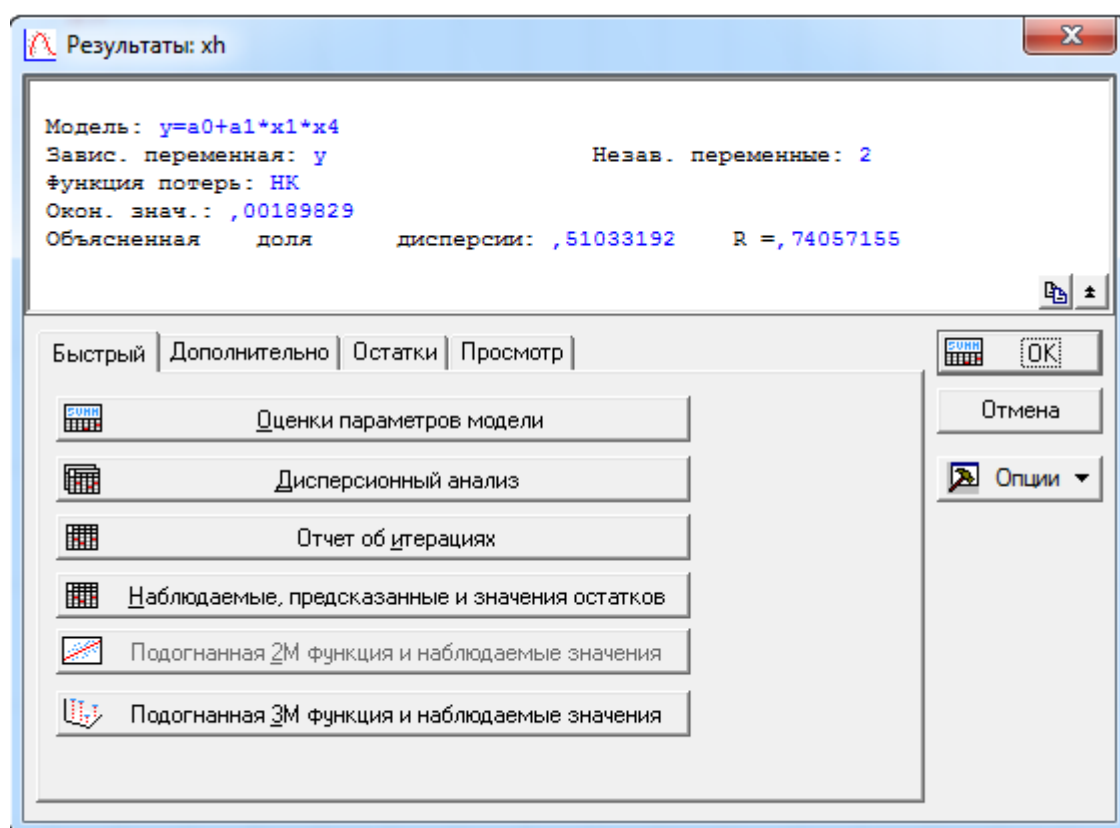
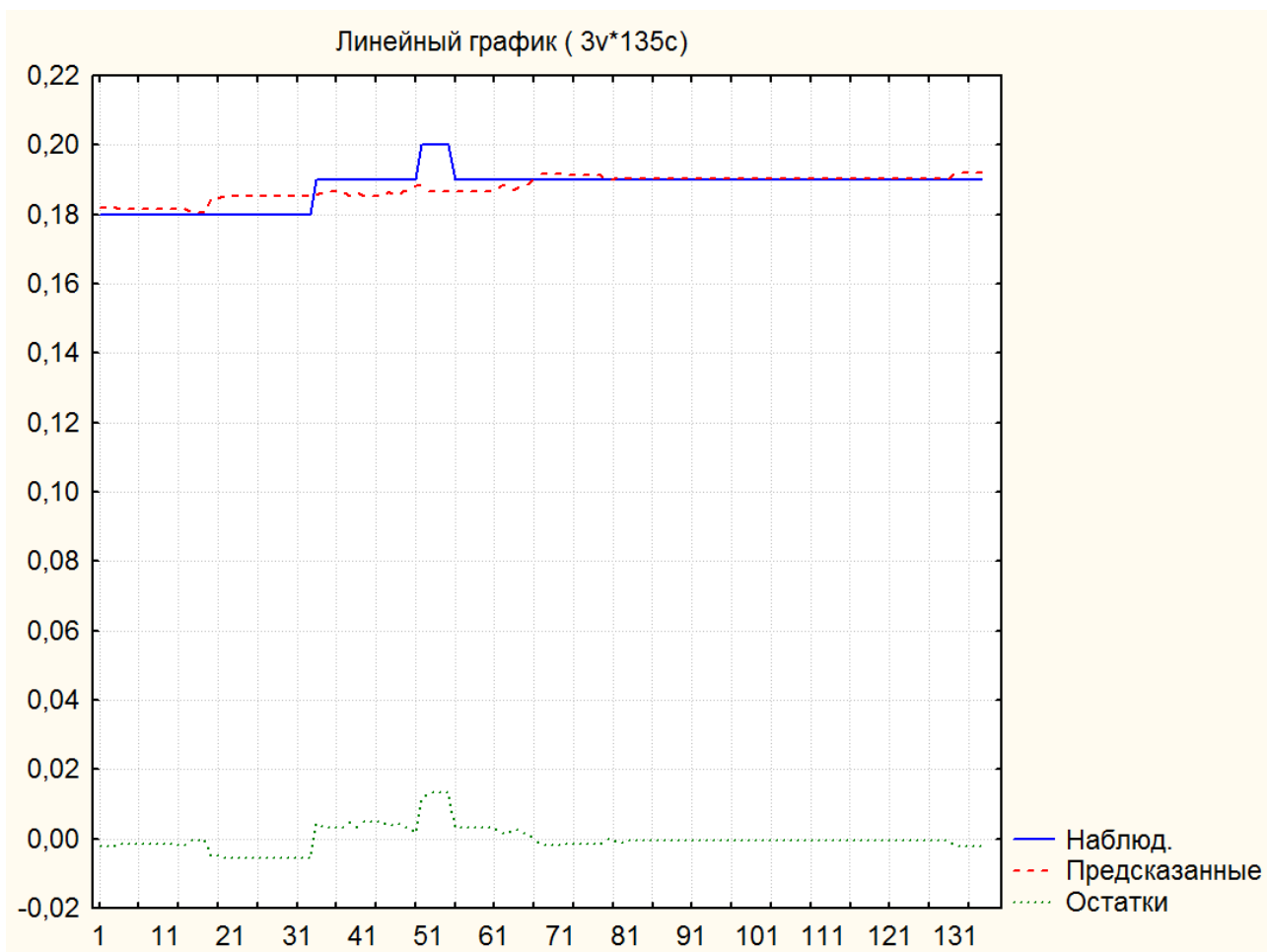


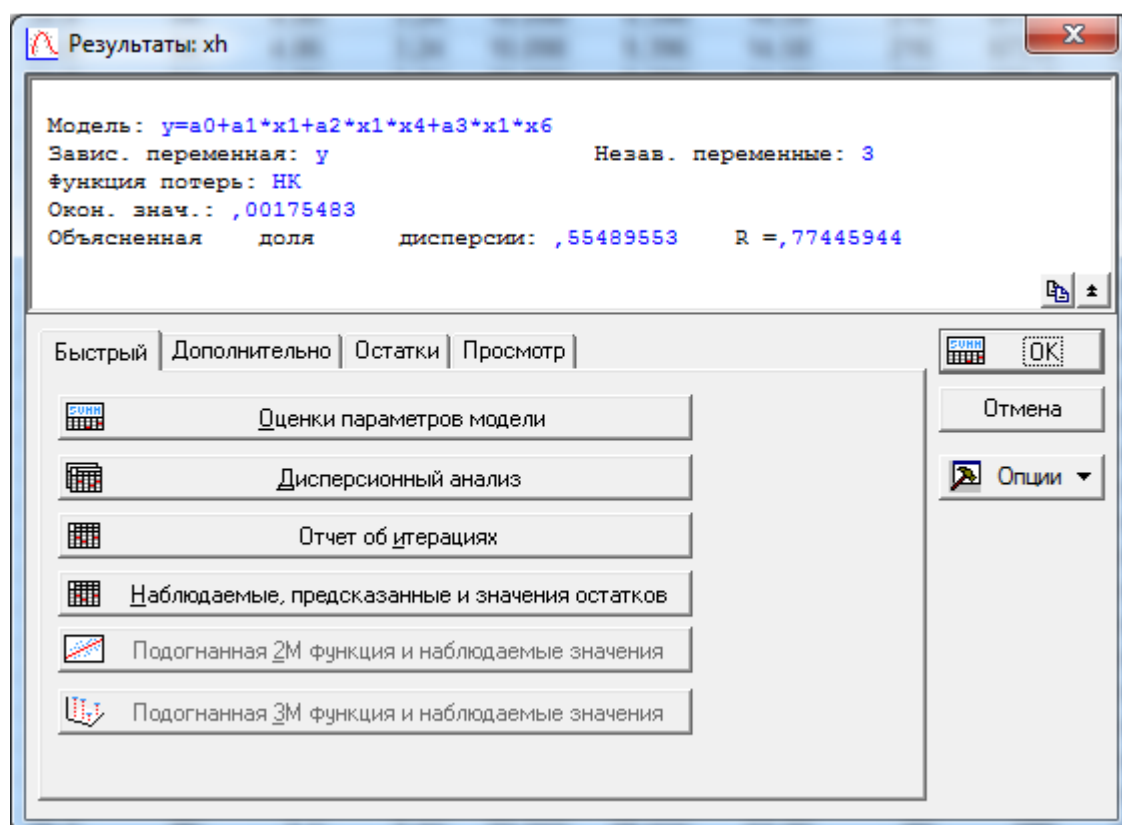
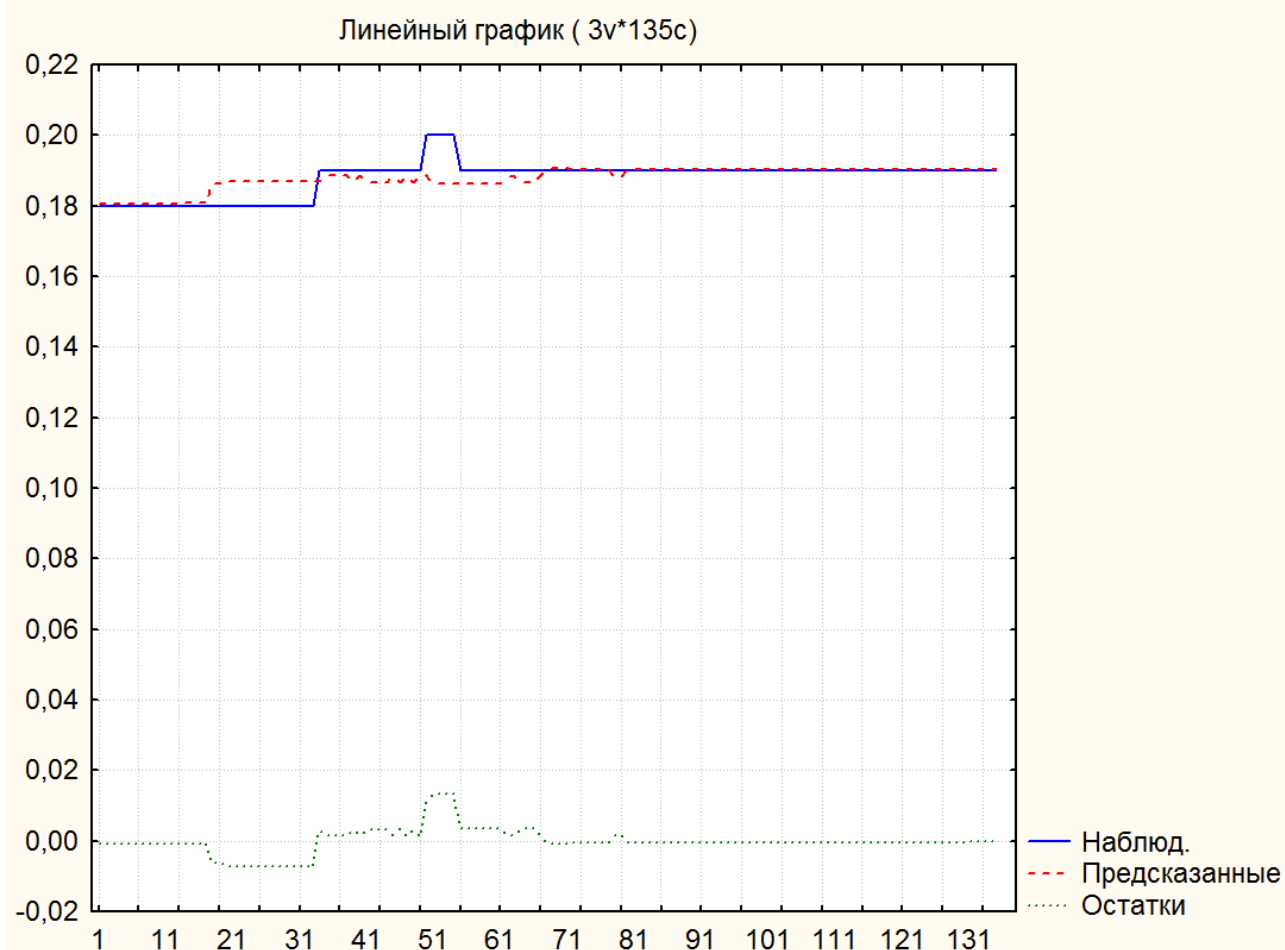


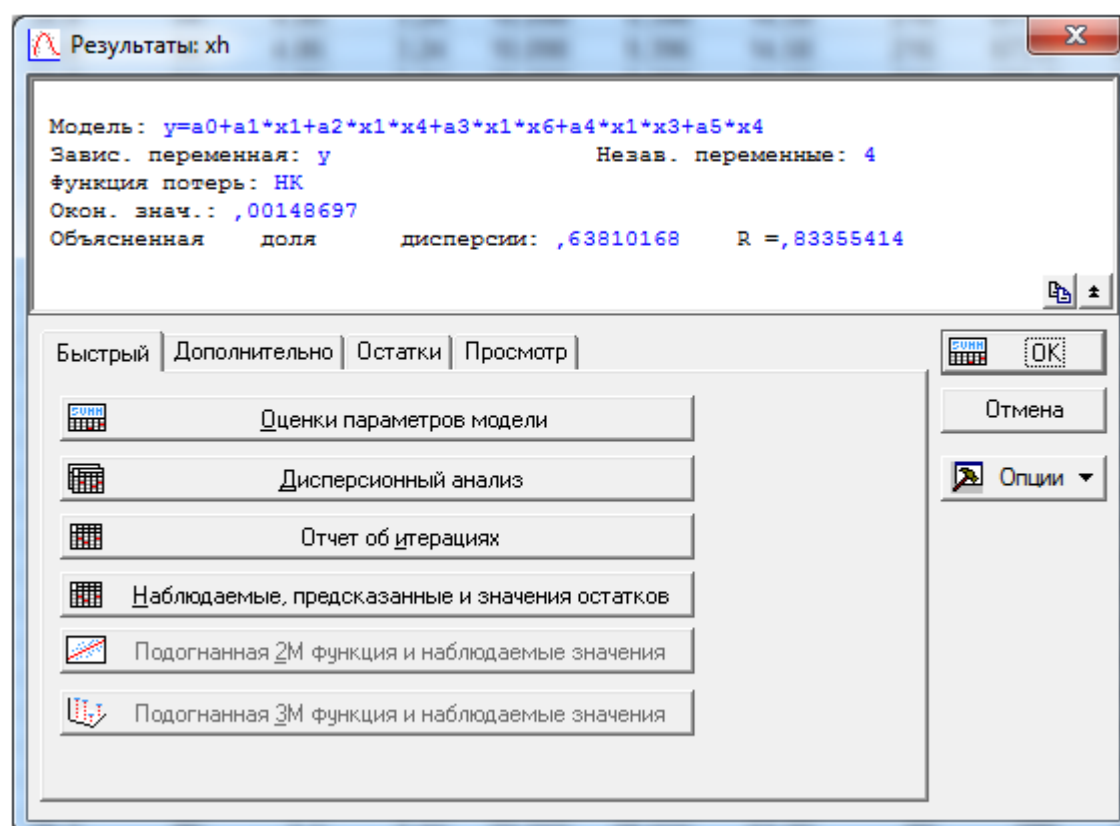
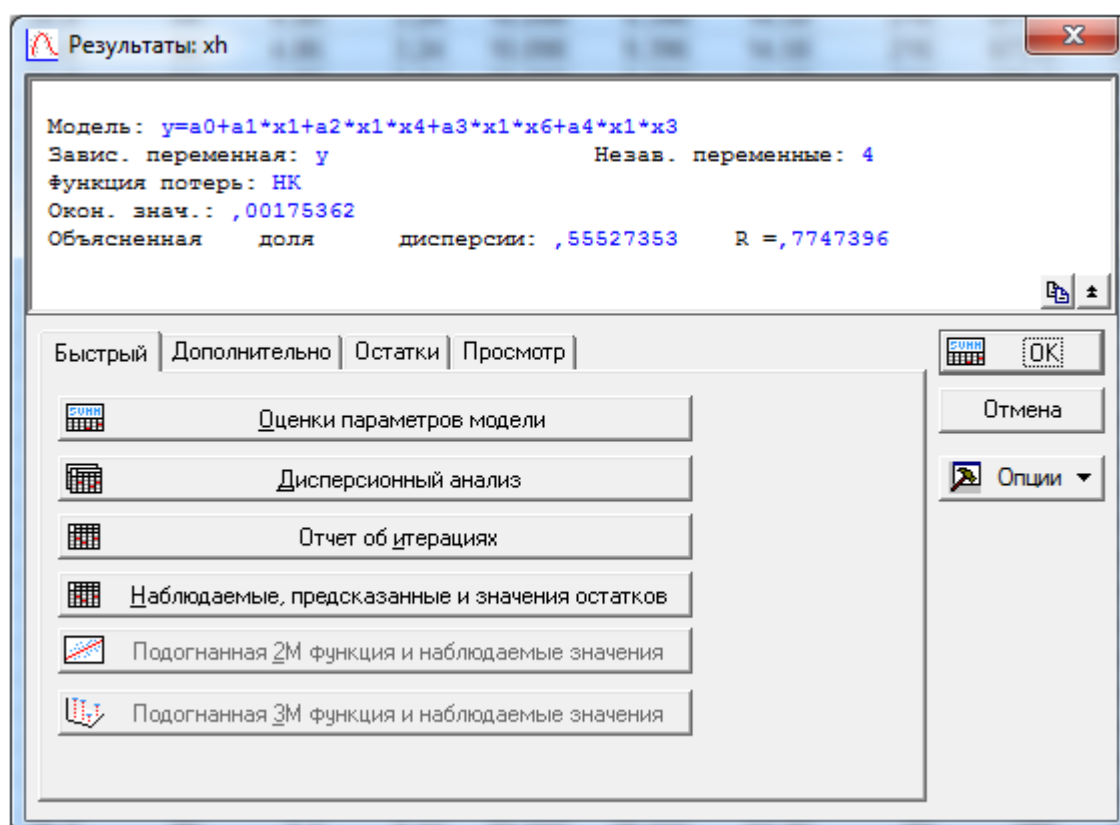


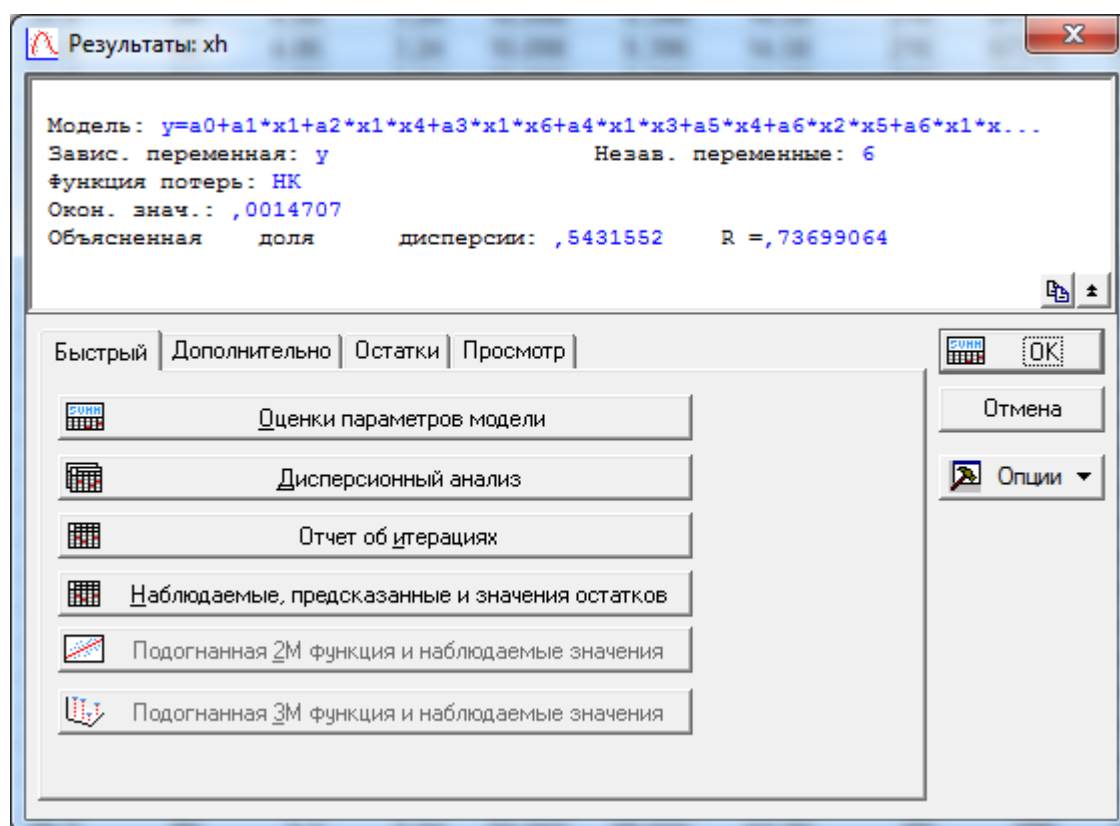
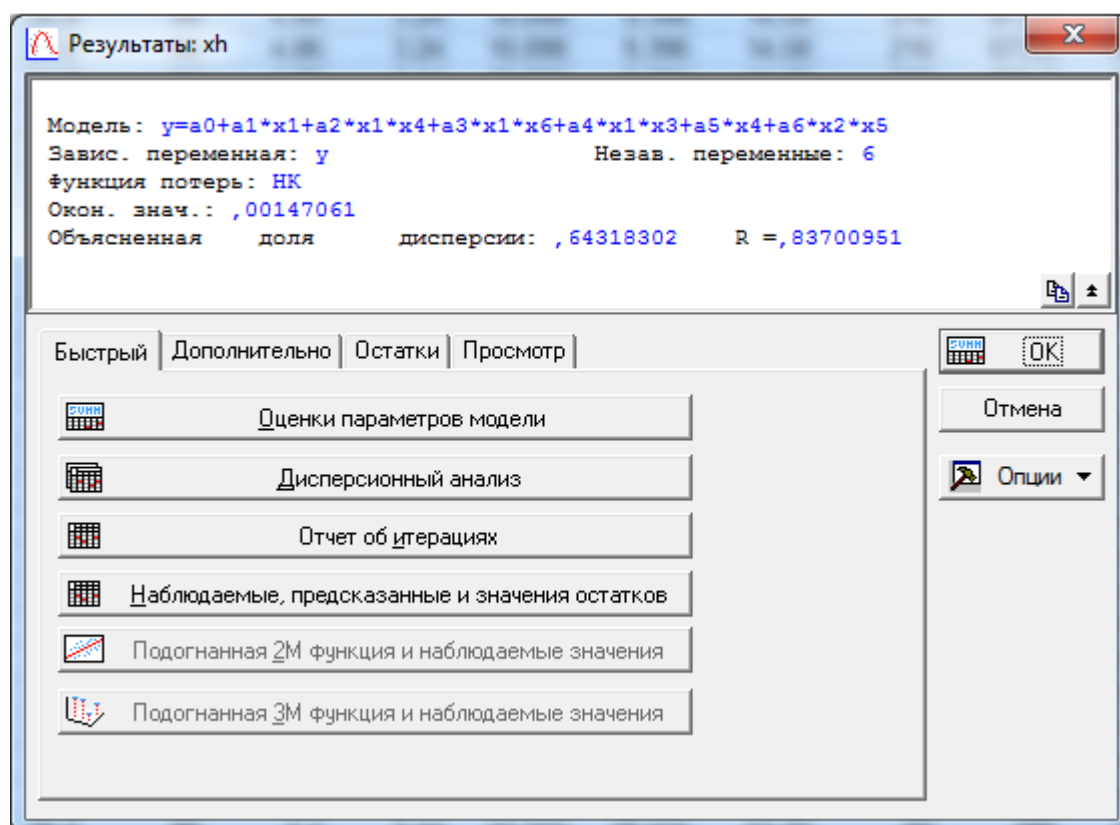


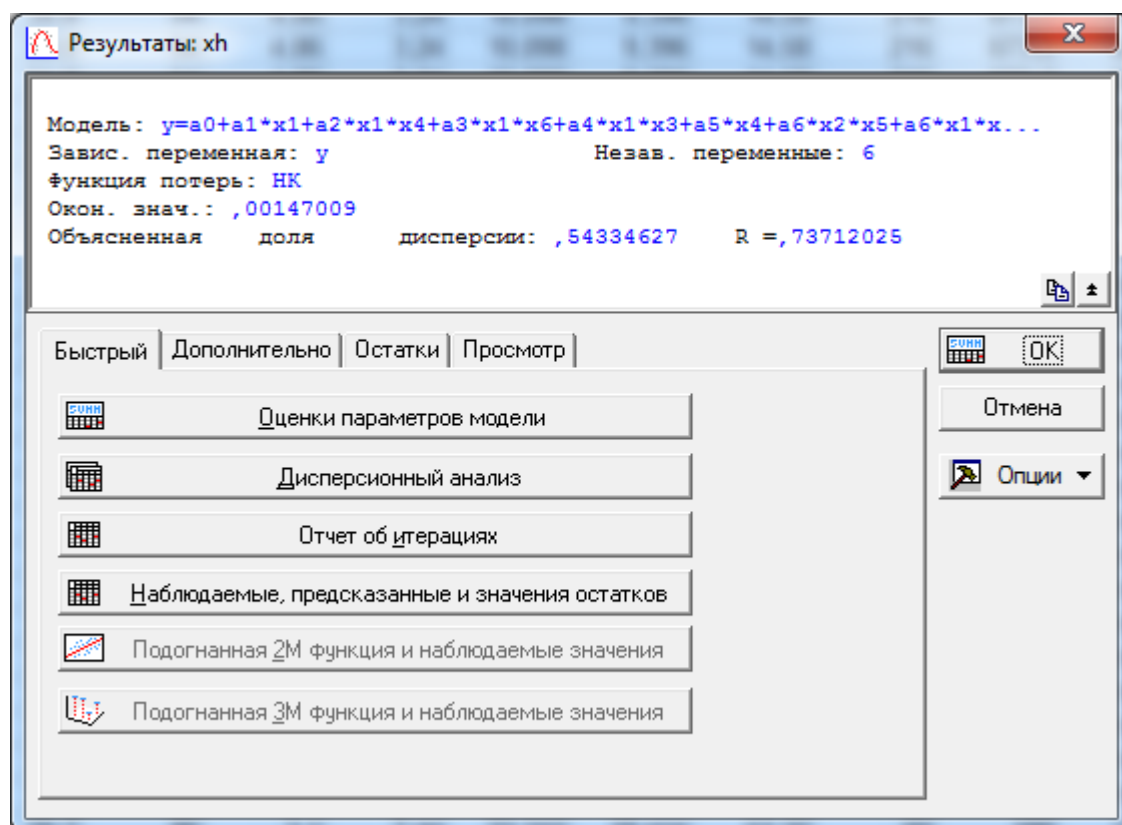




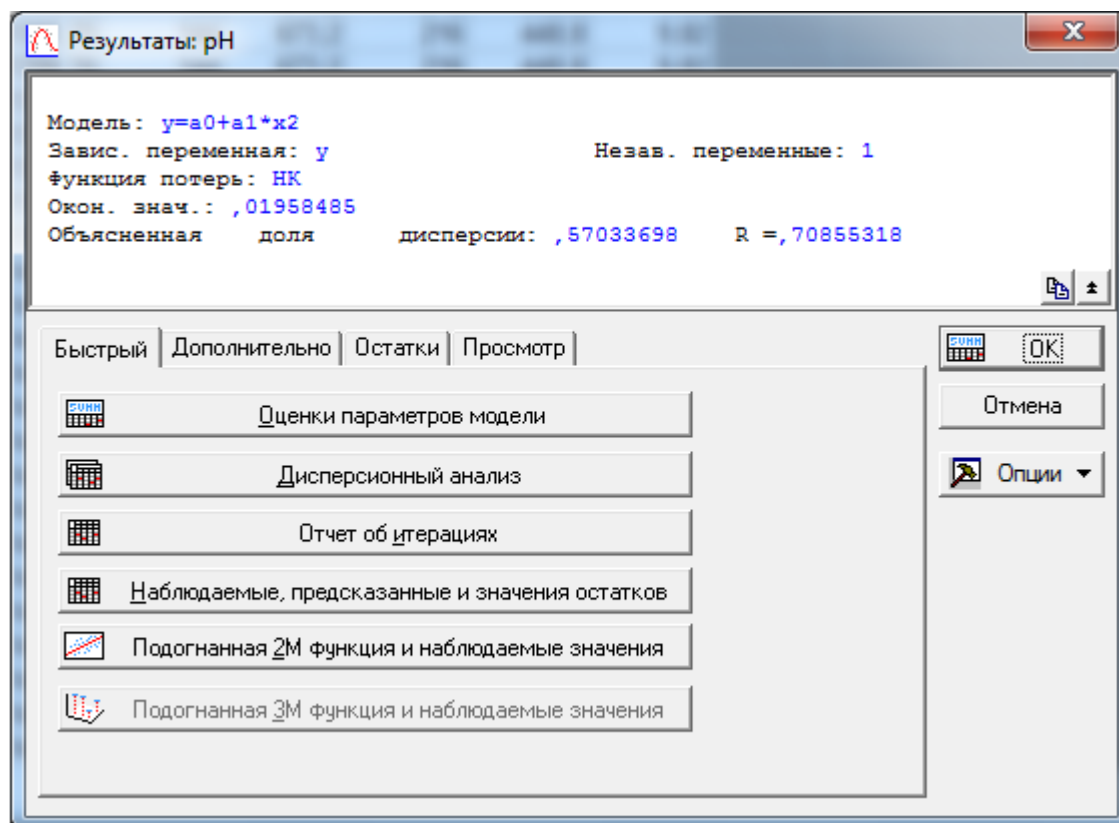
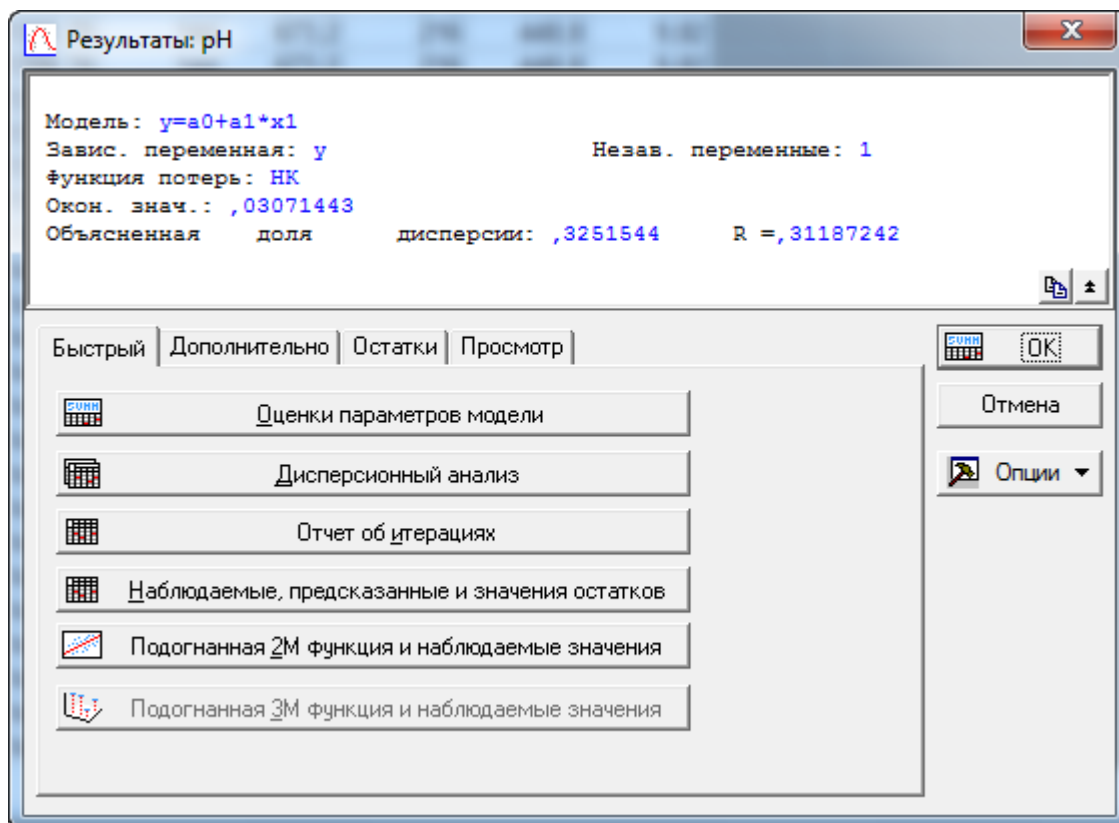


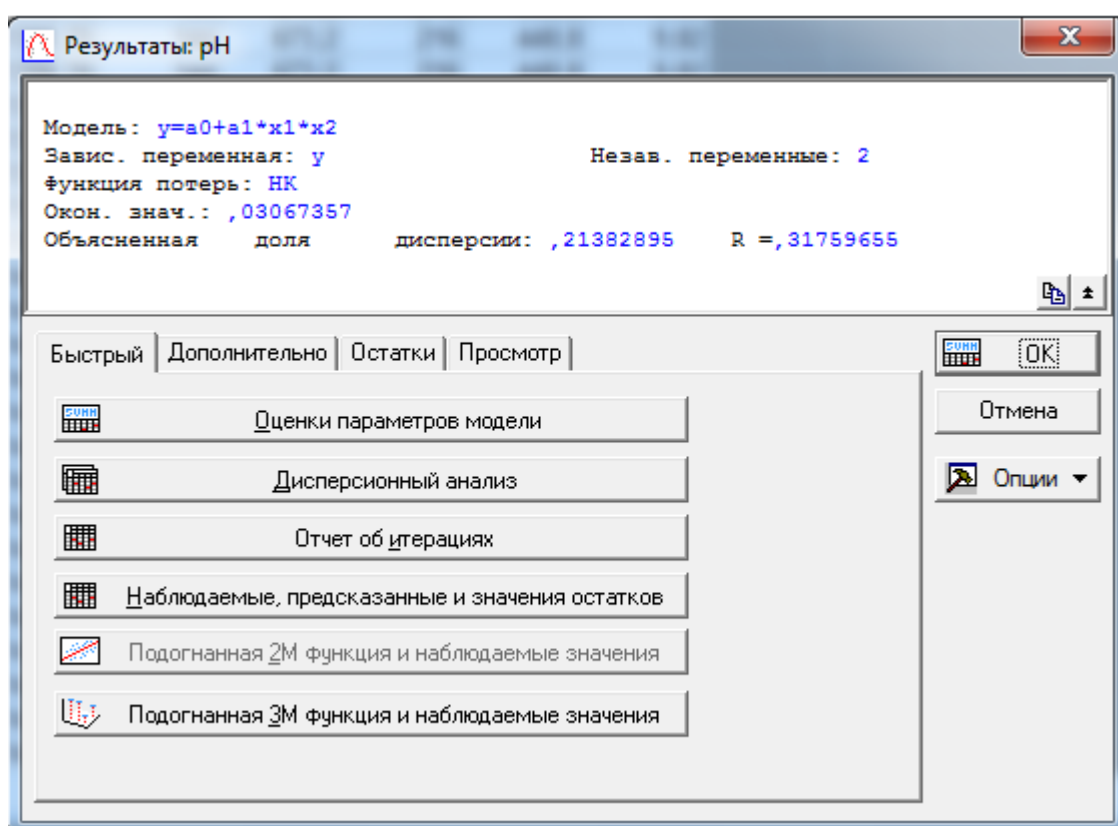
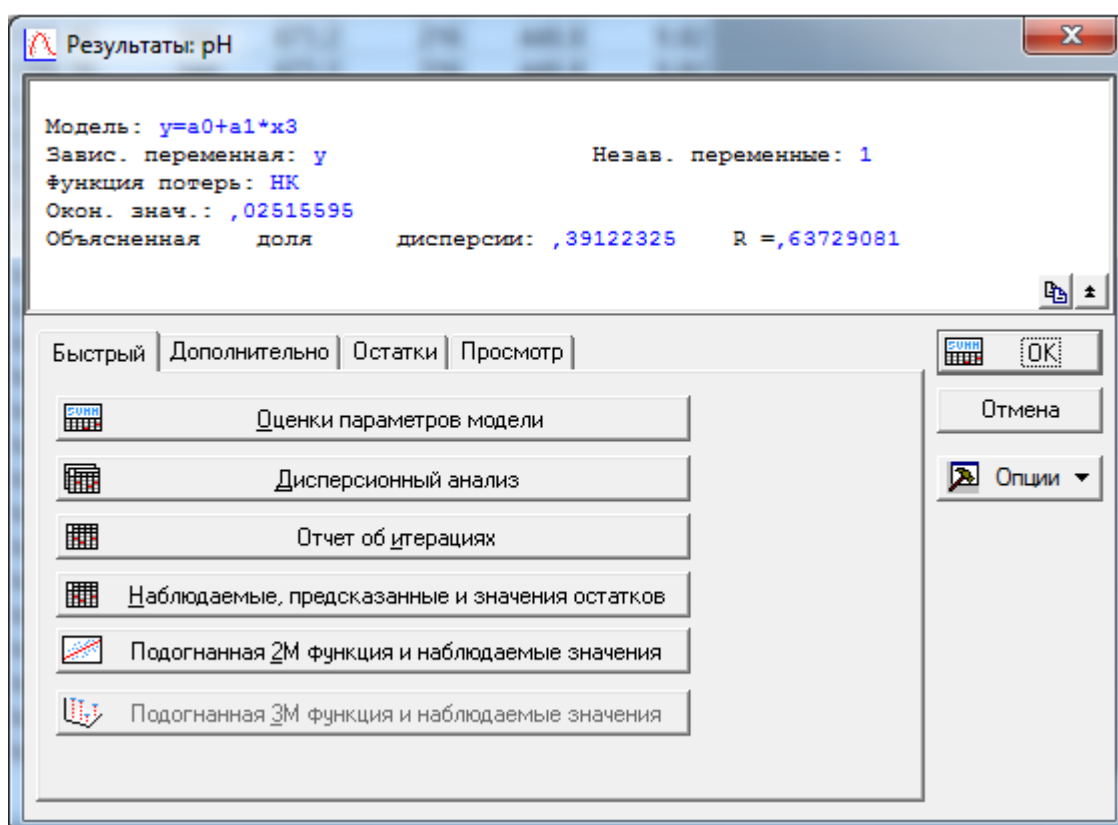


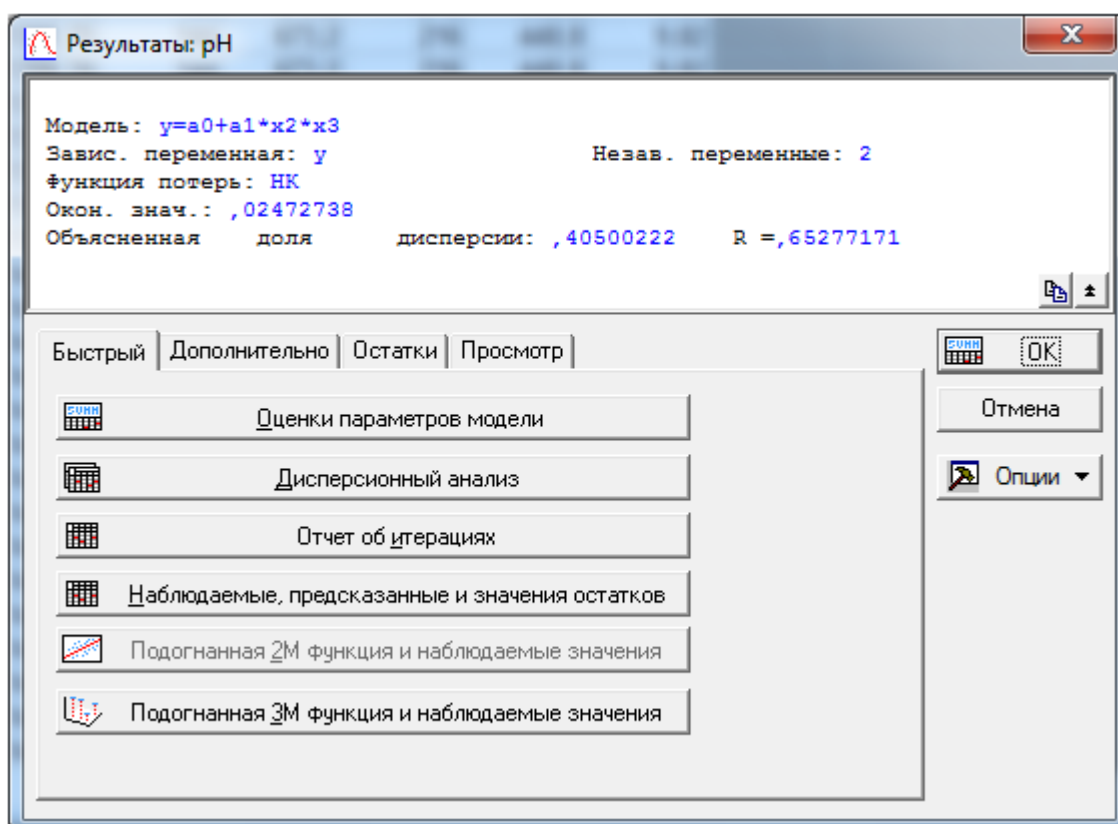
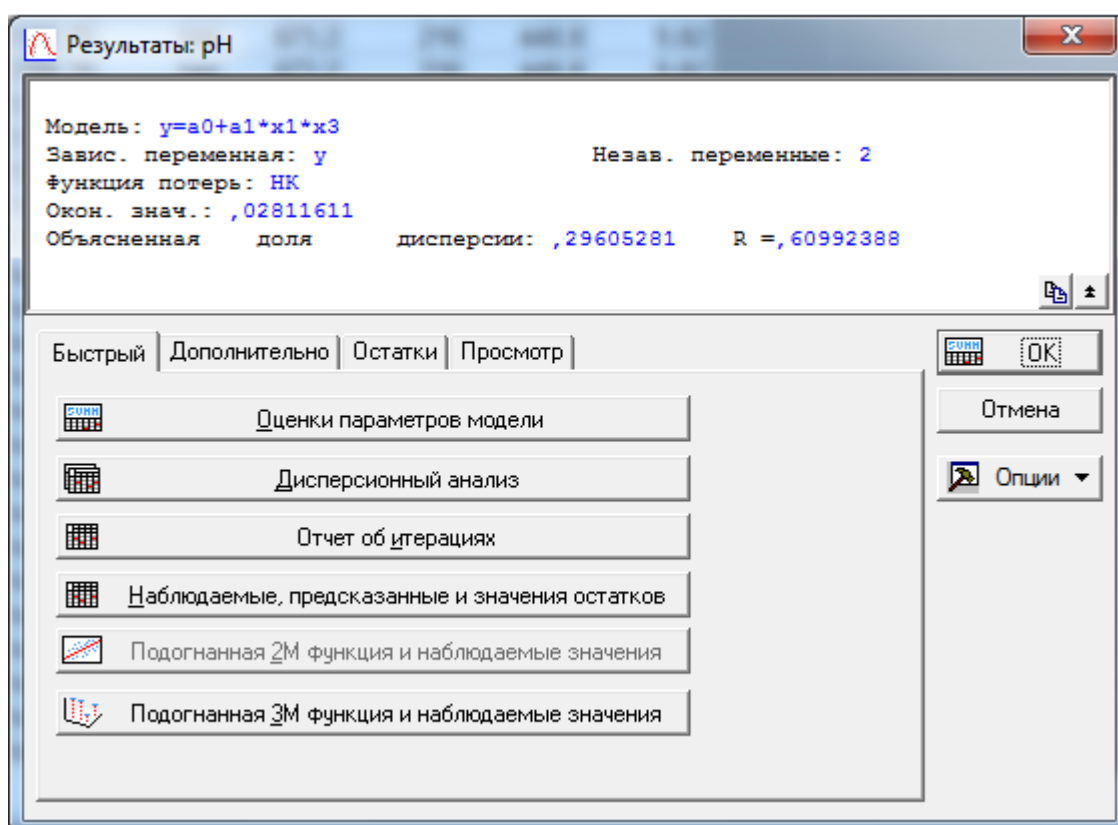


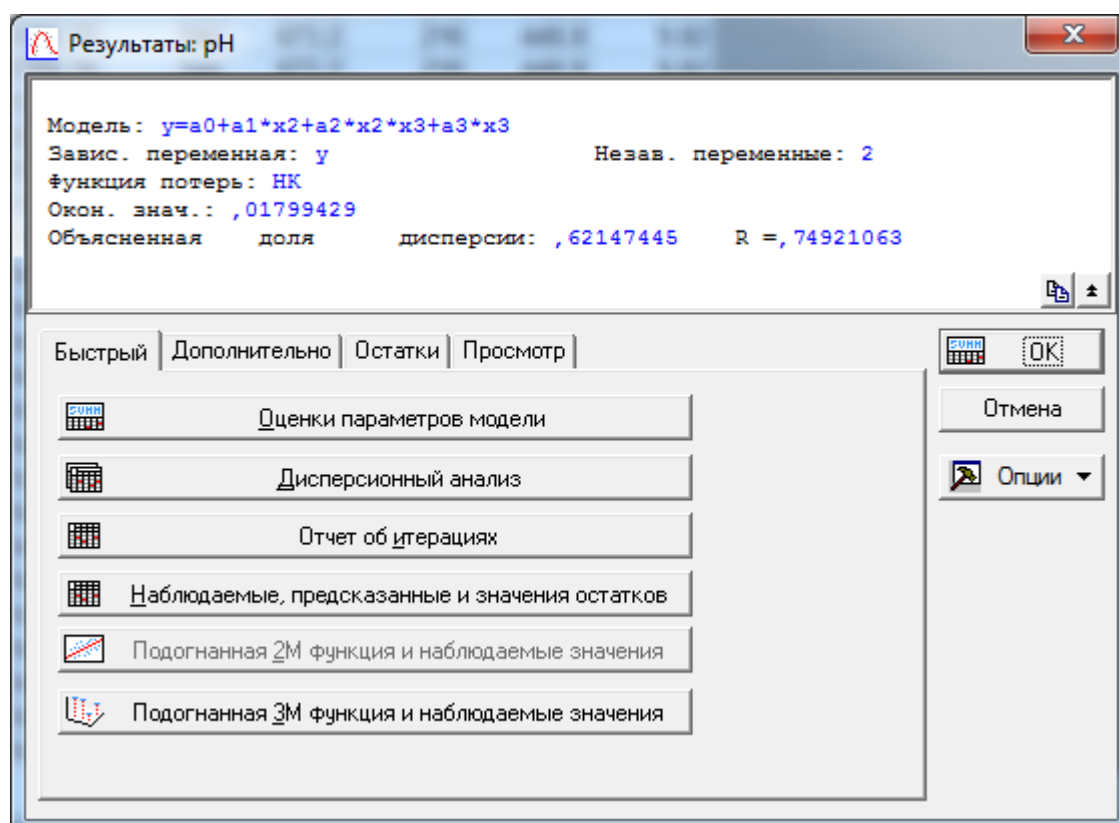
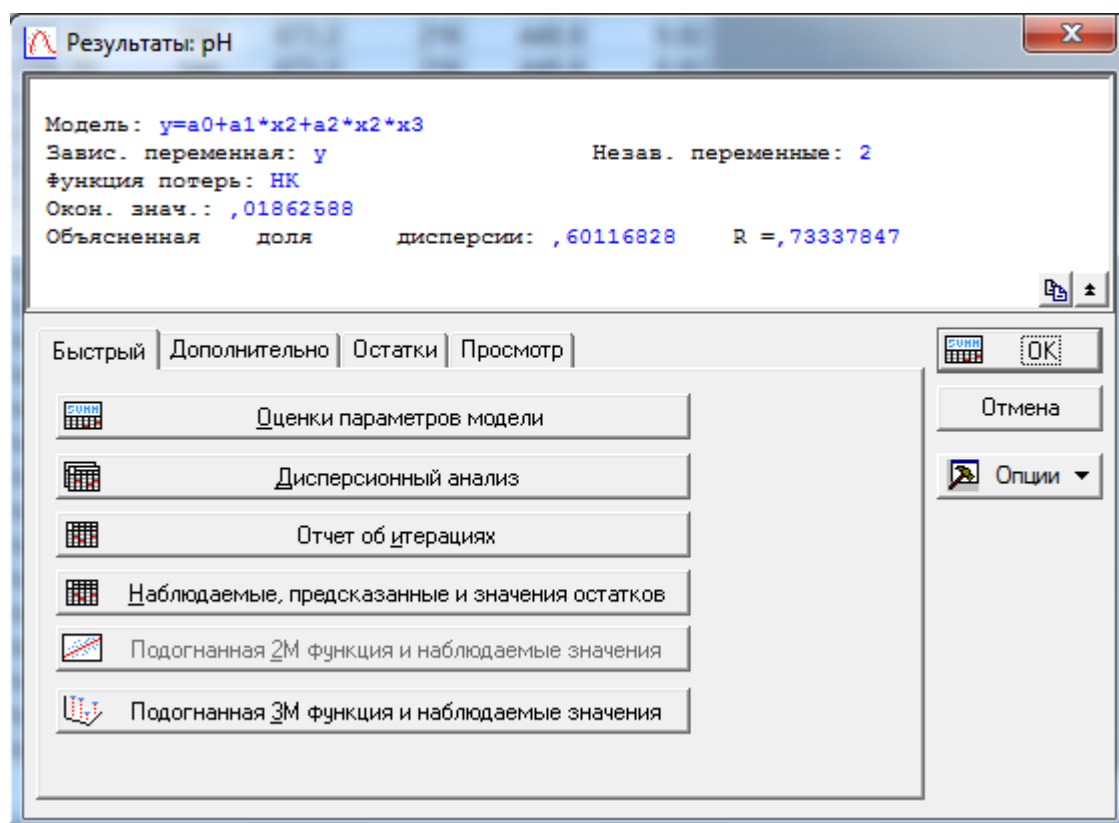


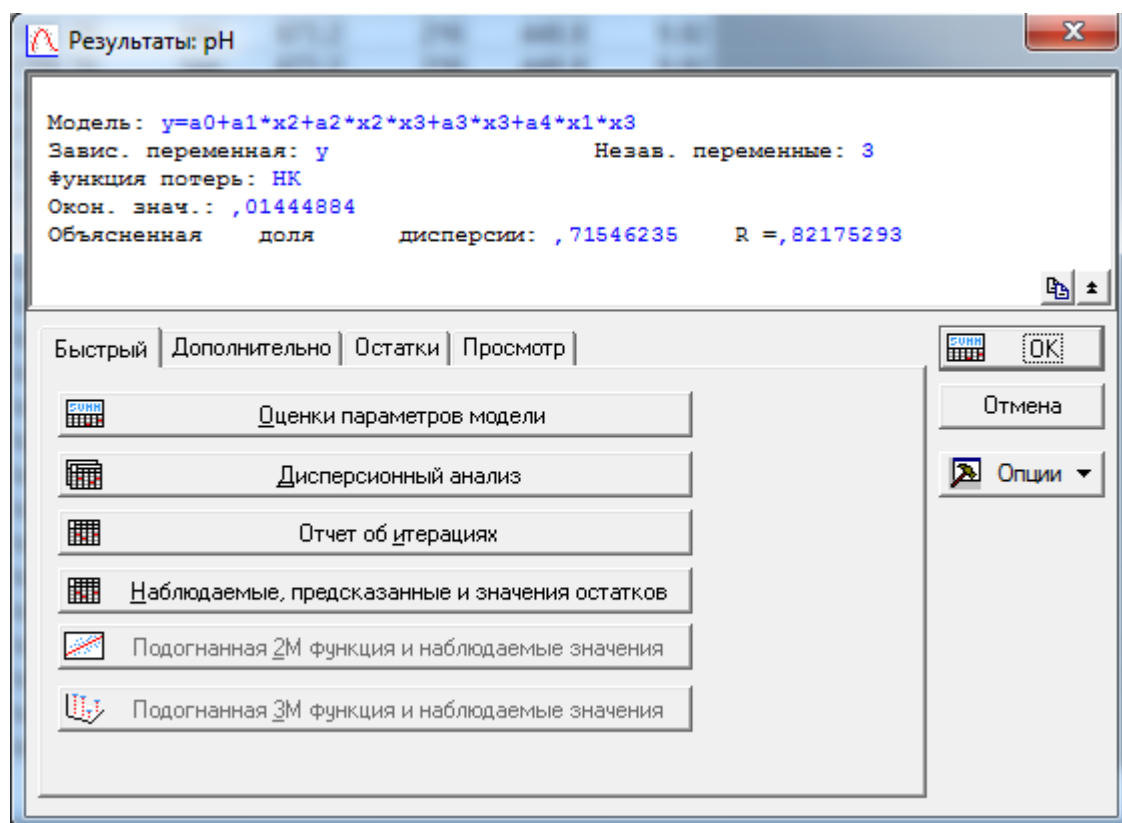
Е.2 Дослідження відносно водневого показника











Набір продукційних правил роботи фільтрів

Таблиця Ж.1 – Продукційні правила для трьох фільтрів

№ правила	Витрата м ³ /год.			Рішення
	Фільтр 1	Фільтр 2	Фільтр 3	
1	2	3	4	5
1	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Номінальний	Розпушити
2	Вище максимально допустимої	Номінальний	Нижче номінального	Розпушити
3	Нижче номінального	Номінальний	Вище максимально допустимої	Розпушити
4	Нижче номінального	Вище максимально допустимої	Номінальний	Розпушити
5	Номінальний	Нижче номінального	Вище максимально допустимої	Розпушити
6	Номінальний	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Розпушити
7	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Номінальний	Відключити
8	Нижче мінімально допустимої	Номінальний	Нижче номінального	Відключити
9	Нижче номінального	Номінальний	Нижче мінімально допустимої	Відключити
10	Нижче номінального	Нижче мінімально допустимої	Номінальний	Відключити
11	Номінальний	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Відключити
12	Номінальний	Нижче номінального	Нижче мінімально допустимої	Відключити

13	Нижче номінального	Номінальний	Номінальний	Розпушити
14	Номінальний	Номінальний	Нижче номінального	Розпушити
15	Номінальний	Нижче номінального	Номінальний	Розпушити
16	Вище максимально допустимої	Номінальний	Вище максимально допустимої	Включити
17	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	Вище Номінального	Включити
18	Номінальний	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	Включити
19	Вище максимально допустимої	Номінальний	Номінальний	Включити
20	Номінальний	Вище максимально допустимої	Номінальний	Включити
21	Номінальний	Номінальний	Вище максимально допустимої	Включити
22	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Нижче номінального	Розпушити
23	Нижче номінального	Нижче номінального	Вище максимально допустимої	Розпушити
24	Нижче номінального	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Розпушити
25	Нижче номінального	Нижче номінального	Номінальний	Розпушити
26	Нижче номінального	Номінальний	Нижче номінального	Розпушити
27	Номінальний	Нижче номінального	Нижче номінального	Розпушити
28	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Вище максимально допустимої	Включити

29	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	Нижче номінального	Включити
30	Нижче номінального	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	Включити
31	Нижче мінімально допустимої	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Відключити
32	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Нижче мінімально допустимої	Відключити
33	Нижче номінального	Нижче мінімально допустимої	Нижче мінімально допустимої	Відключити
34	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Нижче номінального	Відключити
35	Нижче номінального	Нижче мінімально допустимої	Нижче номінального	Відключити
36	Нижче номінального	Нижче номінального	Нижче мінімально допустимої	Відключити
37	Нижче мінімально допустимої	Нижче мінімально допустимої	Номінальний	Відключити
38	Нижче мінімально допустимої	Номінальний	Нижче мінімально допустимої	Відключити
39	Номінальний	Нижче мінімально допустимої	Нижче мінімально допустимої	Відключити
40	Нижче мінімально допустимої	Номінальний	Номінальний	Відключити
41	Номінальний	Нижче мінімально допустимої	Номінальний	Відключити
42	Номінальний	Номінальний	Нижче мінімально допустимої	Відключити

Закінчення таблиці Ж.1

43	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	Вище максимально допустимої	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 робити

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан хіміко-технологічного факультету
НТУУ «КПІ», д.т.н., професорІ.М. Астрелін
«01» вересня 2014 р.

АКТ

про впровадження системи інтелектуального прийняття рішень щодо
керування блочно-знесолюючою установкою АЕС в навчальний процес
кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів

Чинний акт полягає в тому, що система інтелектуального прийняття рішень щодо керування БЗУ АЕС «CONTROL_FSD», призначена для визначення стану ФЗД та встановленню необхідної кількості паралельно працюючих ланцюгів фільтрів, що входять до складу БЗУ, при визначених показниках якості конденсату турбінної установки та основного конденсату, що надходить до парогенератора енергоблоку, розроблена в рамках дисертаційного дослідження МердучС.Л. «Керування блочно-знесолюючою установкою АЕС із реактором типу ВВЕР-1000», було впроваджено в навчальний процес на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Система «CONTROL_FSD» використовується студентами старших курсів при курсовому проектуванні з дисципліни «Комп'ютерні технології проектування систем управління» та лабораторному практикумі з дисципліни «Управління технологічними процесами», що відповідає навчальному плану та навчальним програмам, рекомендованих кафедрою кібернетики ХТП (протокол № 12 від «17» вересня 2014 р.)

В.о. Зав.кафедрою
к.т.н., доцент

Т.В. Бойко

Заступник зав.кафедрою
з методичної роботи
к.т.н., доцент

Д.М. Складанний

Заступник зав.кафедрою
з наукової роботи
к.т.н., доцент

Ю.О. Безносик

Секретар кафедри
к.ф.-м.н., доцент

О.М. Фоглер

СОГЛАСОВАНО

Заместитель главного инженера
по эксплуатации

ОП «Хмельницкая АЭС»

А. В. Клепов

«22» вересня 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Декан химико-технологического
факультета
НТУУ «Киевский политехнический
институт»

И. М. Астрелин

«21» вересня 2014 г.

**СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО
ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОСТОЯНИЯ ФСД БОУ
«CONTROL_FSD»**

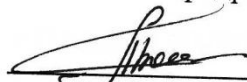
ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ
к программе и методике испытаний

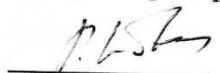
СОГЛАСОВАНО

От НТУУ
«Киевский политехнический институт»

И. о. Зав. кафедры КХТП НТУУ «КПИ»


 Т. В. Бойко
«01» вересня 2014 г.

Профессор кафедры КХТП НТУУ «КПИ»

 Р. Б. Медведев
«01» вересня 2014 г.

Разработала:

Ассистент кафедры КХТП НТУУ «КПИ»

 С. Л. Мердух
«01» вересня 2014 г.


СОГЛАСОВАНО

От ОП «Хмельницкая АЭС»

Начальник ХЦ

 Н. В. Зафираки
«22» вересня 2014 г.

Инженер ХЦ

 «22» вересня 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ	4
2 ЦЕЛЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ	4
3 ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ	4
4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ	5
5 ОТЧЕТНОСТЬ	7
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	7

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

БОУ	блочная обессоливающая установка
КЭН-I ст	Конденсатный электронасос I ступени
ОП ХАЭС	обособленное подразделение «Хмельницкая АЭС»
ПГ	парогенератор
ФСД	фильтр смешанного действия

1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний является система интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD» по определению состояния ФСД (работа, резерв, регенерация, взрыхление) и установлению необходимого количества параллельно работающих цепочек фильтров, входящих в состав БОУ, при определенных показателях качества конденсата турбинной установки.

Данная система реализована в среде приложения Fuzzy Logic программного продукта MATLAB и основана на знаниях об объекте управления инженерно-технического персонала по обслуживанию БОУ.

2. ЦЕЛЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания системы интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD» по управлению ФСД БОУ проводятся на площадке ОП «Хмельницкая АЭС» с целью проверки работоспособности и адекватности поведения системы реальному объекту, а именно системе обессоливания турбинного конденсата на энергоблоке №1 ОП ХАЭС.

3. ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

При проведении испытаний проводится проверка работоспособности модели нечеткого вывода системы «CONTROL_FSD»: функций принадлежности входных параметров, функций принадлежности выходной переменной, перечень правил нечеткого вывода.

Объем испытаний:

- Проверка функций принадлежности выбранных входных параметров (концентрация ионов Na, концентрация ионов Cl, электропроводимость H-катионированной пробы, водородный показатель).
- Проверка функций принадлежности выбранных выходных параметров (состояние ФСД).
- Проверка принятия решения по определению состояния ФСД на основе составленных правил нечеткого вывода в определенный момент времени.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания по настоящей программе проводятся на системе интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD».

Приступать к проверке по каждому следующему пункту настоящей программы разрешается только после окончания работ по предыдущему пункту.

В случае обнаружения неисправности работу прекратить до устранения дефекта.

Результат испытаний считается положительным, если система «CONTROL_FSD» проверена в полном объеме и соответствует требованиям настоящей программы, результат испытаний считается отрицательным, если обнаружено несоответствие хотя бы по одному из установленных настоящей программой требований.

После устранения обнаруженных несоответствий, система «CONTROL_FSD» может быть предъявлена на повторные испытания. При повторных испытаниях система «CONTROL_FSD» по видам испытаний, проведенным ранее с положительными результатами, испытания допускается не проводить.

Для оценки корректного функционирования системы интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD» и соответствия полученных результатов нормативным данным ОП «ХАЭС» необходимо провести испытания в следующем порядке:

- 4.1. Задать значение электропроводности основного конденсата за КЭН-I ступени по Н-катионированной пробе 0,23 мкСм/см и содержание Na^+ 0,9 мкг/дм³. Ожидаемый результат: решение отключить ФСД БОУ или подключить один ФСД.
- 4.2. Задать значение электропроводности основного конденсата за КЭН-I ступени по Н-катионированной пробе 0,25 мкСм/см и содержание Na^+ 0,9 мкг/дм³. Ожидаемый результат: решение отключить ФСД БОУ или подключить один ФСД.
- 4.3. Задать значение электропроводности основного конденсата за КЭН-I ступени по Н-катионированной пробе равным 0,24 мкСм/см. Ожидаемый результат: решение выполнить домывку резервного ФСД.
- 4.4. Задать значение электропроводности Н-катионированной пробы за КЭН-I ступени >0,28 мкСм/см. Ожидаемый результат: решение оставить в работе один-два ФСД.

- 4.5. Установить значение электропроводности основного конденсата за КЭН-I ступени по Н-катионированной пробе равным 0,3 мкСм/см. Ожидаемый результат: решение включить в работу минимум три ФСД.
- 4.6. Установить значение электропроводности Н-катионированной пробы за КЭН-Ист. 0,27 мкСм/см и концентрацию Na^+ 1,5 мкг/дм³. Ожидаемый результат: решение начать поиск присосов в конденсаторе турбины.
- 4.7. Установить значение концентрации Na^+ в постоянной продувке ПГ равным 200 мкг/дм³. Ожидаемый результат: решение отключить ФСД на регенерацию.

5. ОТЧЕТНОСТЬ

По завершению испытаний составляется акт и протокол с результатами проведения испытаний.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

1. СОУ-Н ЯЕК 1.028:2010 Водно-химический режим второго контура АЭС с реакторами типа ВВЭР. Технические требования к качеству рабочей среды второго контура.
2. 1.ХЦ.0726.ТО-09 Блочная обессоливающая установка. Система 1RE. Техническое описание.
3. 1.ХЦ.0726.ИУ-10 Блочная обессоливающая установка. Система 1RE. Инструкция по управлению.

АКТ ИСПЫТАНИЙ

системы интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD» по определению состояния ФСД БОУ

Комиссия в составе:

От НТУУ «КПИ»

Декан ХТФ НТУУ «КПИ»

Астрелин И. М.

И. о. Зав. кафедры КХТП НТУУ «КПИ»

Бойко Т. В.

Профессор кафедры КХТП НТУУ «КПИ»

Медведев Р. Б.

Ассистент кафедры КХТП НТУУ «КПИ»

Мердух С. Л.

От ОП «Хмельницкая АЭС»

Зам. главного инженера
по эксплуатации

Клепов А. В.

Начальник ХЦ

Замфираки Н. В.

провела испытания системы интеллектуального принятия решений «Control_FSD» по определению состояния ФСД БОУ, разработанной аспиранткой НТУУ «КПИ» кафедры кибернетики ХТП химико-технологического факультета Мердух С.Л.

Испытания проводились в соответствии с программой «Система интеллектуального принятия решений по определению состояния ФСД БОУ «CONTROL_FSD». Программа и методика испытаний».

1. Объект испытаний

Объектом испытаний является система интеллектуального принятия решений «Control_FSD» по определению состояния ФСД (работа, резерв, регенерация, взрывление) и установлению необходимого количества параллельно работающих цепочек фильтров, входящих в состав БОУ, при определенных показателях качества конденсата турбинной установки.

Данная система реализована в среде приложения Fuzzy Logic пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB.

2. Цель испытаний

Испытания системы интеллектуального принятия решений «Control_FSD» по управлению ФСД БОУ проводились на площадке ОП «Хмельницкая АЭС» с целью проверки работоспособности и адекватности поведения системы реальному объекту, а именно системе обессоливания турбинного конденсата.

3. Результаты испытаний

3.1. Испытания системы принятия решений проведены в соответствии с Программой и методикой испытаний. Результаты проверки оформлены Протоколом испытаний.



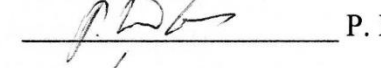
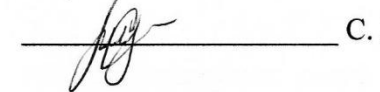
3.2. При испытаниях установлено, что разработанная интеллектуальная система принятия решений работоспособна и адекватна реальному объекту, а именно системе обессоливания турбинного конденсата.



4. Выводы комиссии

4.1. Система интеллектуального принятия решений «Control_FSD» по определению состояния ФСД БОУ прошла испытания по Программе и методике испытаний.

Приложение: Протокол испытаний.

Члены комиссии:

	И. М. Астрелин
	Т. В. Бойко
	Р. Б. Медведев
	С. Л. Мердух

	А. В. Клепов
	Н. В. Замфираки

Приложение
к Акту испытаний

ПРОТОКОЛ

**испытаний системы интеллектуального принятия решений
по определению состояния ФСД БОУ**

1 Объект испытаний

Объектом испытаний является система интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD» по определению состояния ФСД (работа, резерв, регенерация, взрывление) и установлению необходимого количества параллельно работающих цепочек фильтров, входящих в состав БОУ, при определенных показателях качества конденсата турбинной установки.

Данная система реализована в среде приложения Fuzzy Logic программного продукта MATLAB.

2 Цель испытаний

Испытания системы интеллектуального принятия решений «CONTROL_FSD» по управлению ФСД БОУ проводятся на площадке ОП «Хмельницкая АЭС» с целью проверки работоспособности и адекватности поведения системы реальному объекту, а именно системе обессоливания турбинного конденсата.

3 Критерии оценки результатов испытаний

В соответствии с Программой и методикой испытаний проводилась проверка работоспособности модели нечеткого вывода системы «CONTROL_FSD»: функций принадлежности входных параметров, функций принадлежности выходной переменной, перечень правил нечеткого вывода; проверка принятия решения по определению состояния ФСД на основе составленных правил нечеткого вывода в определенный момент времени.

4 Сроки проведения испытаний

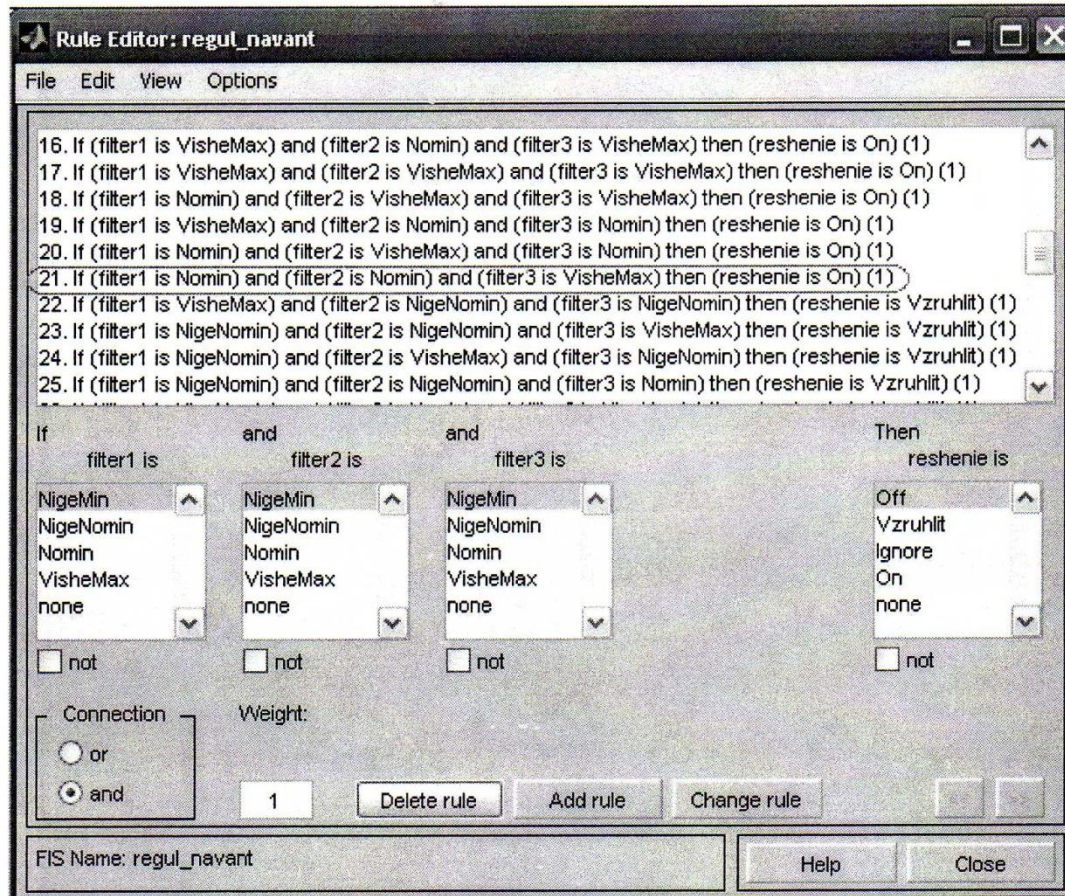
Испытания проведены с «27» августа по «29» августа 2014 г. По Программе и методике испытаний.

5 Результаты испытаний

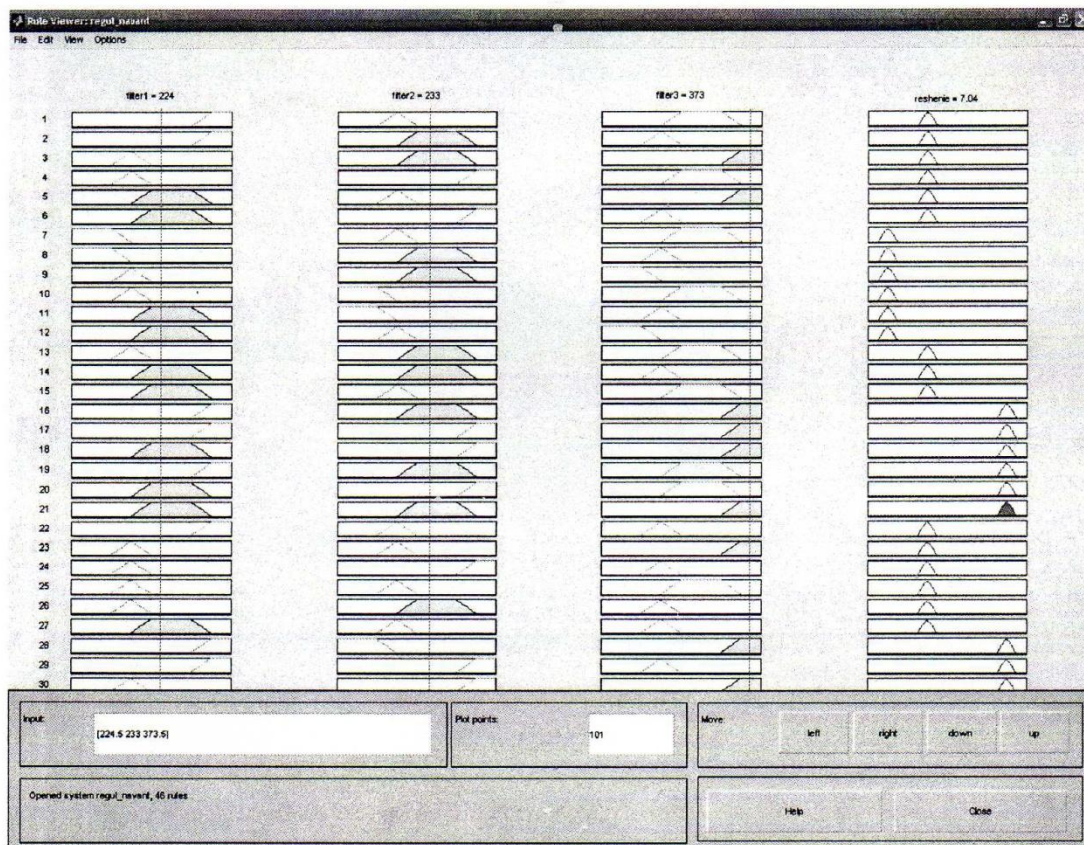
Результаты испытаний положительные.

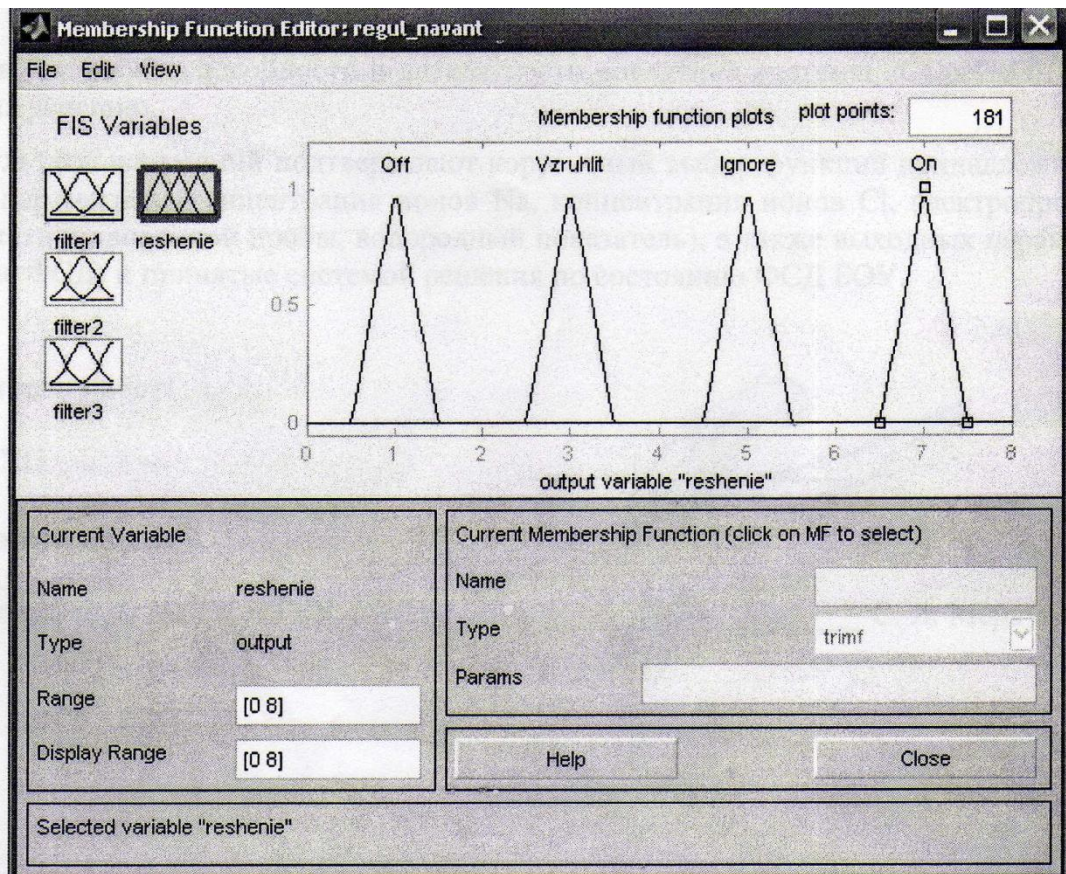
Информация на видеокадрах соответствует требованиям Программы и методики испытаний.

Видеокадр «CONTROL_FSD». Редактор правил нечеткой модели

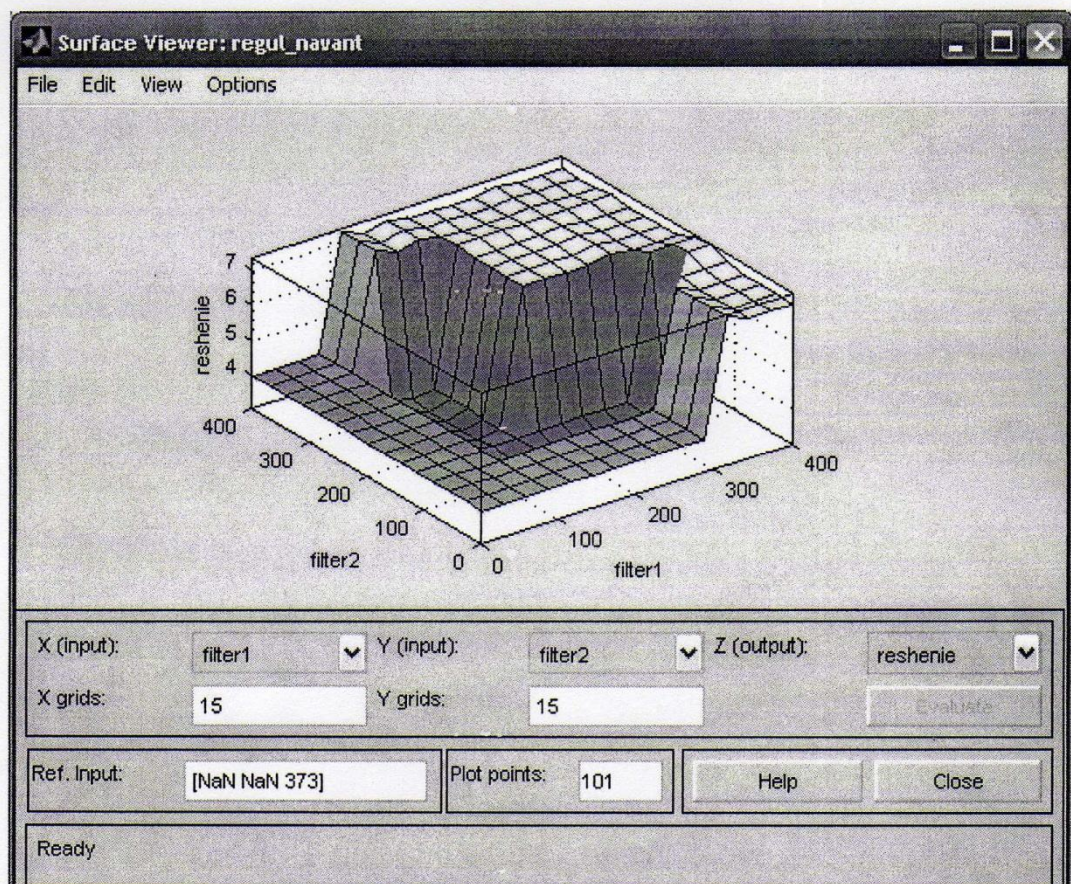


Видеокадр «CONTROL_FSD». Просмотр нечетких правил





Видеокадр «CONTROL_FSD». Поверхность решений



6 Выводы

Проверка работоспособности и адекватности поведения системы «CONTROL_FSD» выполнена успешно.

Результаты испытаний подтверждают корректный выбор функций принадлежности входных параметров (концентрация ионов Na, концентрация ионов Cl, электропроводимость Н-катионированной пробы, водородный показатель), а также выходных параметров (состояние ФСД) и принятые системой решения по состоянию ФСД БОУ.

Руководитель работ:

Инженер ХЦ

Испытания провела:

Ассистент кафедры КХТП НТУУ «КПИ»



С. Л. Мердих