

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
Олександр ДІДИК
«___» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Автоматизація прийняття рішень при керуванні
витратами електроенергії в системі транспортування
сировини»**

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу, групи АК-21
ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
_____ Черкащенко А.О.
«___» _____ 20__ р.

Керівник роботи
доцент, к.т.н.
_____ Роман ЖЕСАН
«___» _____ 20__ р.

Рецензент
к.т.н., доц.
кафедри КБПЗЦНТУ
_____ Олег КИСЛУН
«___» _____ 20__ р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр ДІДИК

«___» _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Черкашенка Андрія Олексійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація прийняття рішень при керуванні витратами електроенергії в системі транспортування сировини»

2. Керівник роботи Жесан Роман Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 27.06.2025 року

Мета та завдання кваліфікаційної роботи є розробка автоматичної системи підтримки прийняття рішень для керування гідротранспортом. Завданням є розробка блоку підтримки прийняття рішень під час управління процесом диспетчером процесу транспортування сировини та створення програмного забезпечення для реалізації алгоритмів роботи, що використовуються в системі підтримки прийняття рішень.

4. Перелік графічного матеріалу: функції належності вхідних змінних; структурна схема нечіткої моделі; схема процедури фазифікації вхідних параметрів; схема суміжної роботи струминного та відцентрового насосів; процедура нечіткого логічного висновку; структура тришарової нейронної мережі прямого розповсюдження.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних технологій транспортування сировини та існуючих методів та засобів автоматизації керування гідротранспортними системами	10.04.2025	
2	Дослідження та розробка нечітких моделей пристроїв гідротранспортної системи	25.04.2025	
3	Побудова структури нечіткого регулятора	05.05.2025	
4	Розробка системи підтримки прийняття рішень керуванням витратами електроенергії при транспортуванні сировини	16.05.2025	
5	Розробка архітектури системи нечіткого керування	23.05.2025	
6	Моделювання роботи інтелектуальної СКПР з нечітким регулятором	03.06.2025	
7	Подання чорнового варіанту пояснювальної записки	19.06.2025	
8	Кінцеве редагування та оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка презентації результатів роботи.	25.06.2025	

Дата видачі завдання

«__» _____ 2025 р.

Підпис керівника

_____ Жесан Р.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«__» _____ 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Черкащенко А.О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі розроблено математичні моделі відцентрових і струминних насосів з урахуванням експертних знань та емпіричних даних, представлених за допомогою теорії нечітких множин. Також синтезовано моделі руху полідисперсного середовища в напірному трубопроводі із застосуванням штучних нейронних мереж. Запропонований підхід сприяв підвищенню ефективності диспетчерського управління процесами гідротранспортування, зменшенню ймовірності помилкових рішень під час експлуатації, проєктування та модернізації гідротранспортного обладнання, а також створенню основ для впровадження сучасних автоматизованих систем керування в галузі.

Обґрунтовано актуальність роботи, мету і задачі дослідження.

За результатами дослідження доведено доцільність створення системи підтримки прийняття рішень для управління гідротранспортом, основою якої є інтелектуальні моделі технологічних процесів і об'єктів гідротранспортної системи, а також розроблене програмне забезпечення. Запропоновано структуру інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для керування стаціонарною системою транспортування гідросуміші, яка забезпечує ефективне планування та оперативне регулювання режимів її роботи.

ANNOTATION

In the qualification work, mathematical models of centrifugal and jet pumps were developed taking into account expert knowledge and empirical data presented using the theory of fuzzy sets. Models of the movement of a polydisperse medium in a pressure pipeline were also synthesized using artificial neural networks. The proposed approach contributed to increasing the efficiency of dispatching control of hydro transportation processes, reducing the likelihood of erroneous decisions during operation, design and modernization of hydro transportation equipment, as well as creating the basis for the implementation of modern automated control systems in the industry.

The relevance of the work, the aim and the task of the research is substantiated.

The results of the study prove the feasibility of creating a decision support system for hydro transport management, based on intelligent models of technological processes and objects of the hydro transport system, as well as developed software. The structure of an intelligent decision support system for controlling a stationary hydraulic mixture transportation system is proposed, which provides effective planning and operational regulation of its operating modes.

ЗМІСТ

ВСТУП	2
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ	4
1.1. Огляд сучасних технологій транспортування	4
1.2. Аналіз відомих методів та засобів автоматизації керування процесом транспортування сировини гідротранспортом	10
Висновки до розділу	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ	18
2.1. Побудова функцій належності	18
2.2. Синтез нечіткої моделі відцентрового насоса для гідросуміші	22
2.3. Побудова та дослідження нечіткої моделі роботи для струминного насосу	28
Висновки до розділу	34
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ СІТОК	35
3.1. Аналіз процесу транспортування сировини	35
3.2. Обґрунтування доцільності застосування штучних нейронних сіток для моделювання режимів роботи системи транспортування	39
3.3. Процес навчання нейросіткових моделей на основі методу зворотного розповсюдження помилки	47
Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 4. СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ	52
4.1. Основні функції оперативно-диспетчерського керування стаціонарною гідротранспортною системою	52
4.2. Розробка СППР	61
Висновки до розділу	77
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
ДОДАТКИ	84

ВСТУП

Актуальність теми. Гідравлічний транспорт є одним із ключових технологічних процесів у гірничодобувній промисловості, де його застосування охоплює етапи видобування, збагачення та складування корисних копалин. Його перевагами є висока продуктивність безперервного транспортування без необхідності проміжного перевантаження, технологічна простота, здатність переміщати тонкодисперсні сипучі матеріали без негативного впливу на довкілля, сумісність з процесами мокрого збагачення, а також відсутність втрат вантажу під час транспортування. Разом з тим, у випадку нераціонального вибору режимів експлуатації гідравлічні системи транспортування демонструють певні недоліки, серед яких найбільш суттєвими є підвищене енергоспоживання, інтенсивне абразивне зношення трубопроводів і насосного обладнання.

У більшості випадків керування гідротранспортними системами здійснюється операторським персоналом на основі професійного досвіду та за допомогою обмеженого набору вимірювального обладнання.

У зв'язку з цим актуальним науково-технічним завданням є розробка й впровадження сучасних автоматизованих систем управління, здатних забезпечити надійне функціонування гідравлічних транспортних установок і оптимізацію їх експлуатаційних режимів.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розроблення програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизованого керування процесами гідравлічного транспорту з метою зменшення витрат на електроенергію. Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких технічних завдань:

- розробити блоку підтримки прийняття рішень при керуванні процесом транспортування сировини (пульпоприготуванням);

- створення програмного забезпечення для реалізації розроблених алгоритмів побудови математичних моделей, що використовуються в системі підтримки прийняття рішень при керуванні гідравлічним транспортом.

Об'єкт дослідження – процес транспортування гідросумішей у напірній трубопроводній системі.

Предмет дослідження – математичний опис функціонування напірних пристроїв і трубопроводних систем становить основу для розроблення системи підтримки прийняття рішень.

Методи дослідження. В бакалаврській роботі проведені дослідження, які базуються на методах: статистичної обробки та аналізу даних, теорії імовірності. Створення блоку підтримки прийняття рішень під час управління процесом пульпоприготування та розробка структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень здійснювалася із залученням методів теорії прийняття рішень та системного аналізу. Розрахункова частина та моделювання процесів дослідження було виконано за допомогою персонального комп'ютера та різних пакетів прикладних програм.

Практичне значення одержаних результатів. Математичний апарат, алгоритми та програмне забезпечення для моделювання і ідентифікації гідротранспортних систем застосовуються в процесах експлуатації, проектування та модернізації (реконструкції) трубопроводних систем гідравлічного транспорту.

Апробація результатів досліджень. Основні результати кваліфікаційної роботи були представлені на LIX наукова конференція здобувачів вищої освіти ЦНТУ, присвячена Дню Науки-2025 (м. Кропивницький, ЦНТУ, 24 квітня 2025 р.).

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Бакалаврська робота складається із завдання, анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 107 сторінок (додатки на 20 сторінках).

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ

1.1. Огляд сучасних технологій транспортування

На сьогоднішній день гідравлічний транспорт широко застосовується в гірничодобувній промисловості [7]. Його ключова перевага полягає у здатності транспортувати сипкі матеріали різної фракції — від грубозернистих до диспергованих і тонкоподрібнених. Гідротранспорт дозволяє ефективно поєднувати різноманітні технологічні процеси, зокрема гідровидобуток, мокре збагачення, складування хвостів тощо. За умови раціональної експлуатації такі системи забезпечують високу продуктивність, безперервність вантажопотоку, низьку трудомісткість і мінімальну кількість технологічних операцій. Практичний досвід експлуатації гідравлічних транспортних систем підтверджує їхню доцільність і ефективність у виконанні широкого спектру завдань, пов'язаних із видобутком, транспортуванням, переробкою корисних копалин, утилізацією відходів і складуванням сировини [3, 7].

Під час видобутку та транспортування корисних копалин застосовуються різноманітні технологічні схеми, серед яких основними є стаціонарні гідротранспортні системи та плавучі землесосні установки [7, 12]. Останні представляють собою автономні технологічні комплекси, що забезпечують повний цикл робіт — від розробки родовища до транспортування й складування добутих матеріалів. Ключовим критерієм ефективності роботи землесосної установки є максимальний обсяг ґрунту, видобутого за одиницю часу.

Стаціонарні гідротранспортні системи, у свою чергу, виконують роль проміжної ланки в загальному технологічному процесі гірничого підприємства. До таких систем висуваються суворі вимоги [3, 7, 9, 12-14]: вони мають забезпечувати транспортування заданої маси твердого матеріалу з мінімальними економічними витратами. Водночас необхідною умовою є висока

надійність функціонування, адже порушення стабільного режиму роботи стаціонарної установки може призвести до зупинки всього виробничого процесу.

Підвищення ефективності гідравлічного транспортування та гідромеханізованих процесів здійснюється у двох основних напрямках [7, 9, 12]:

1. модернізація технологічного обладнання;
2. розробка систем контролю та автоматизованого управління процесами гідротранспорту.

У процесі створення систем автоматизації гідравлічного транспорту необхідно проводити всебічний аналіз режимів його функціонування, а також фізичних процесів, що супроводжують рух багатофазного середовища в трубопровідних мережах.

Гідравлічне транспортування полягає в переміщенні твердих сипких матеріалів у потоці рідини, при цьому передача енергії від несучого середовища забезпечує рух твердих частинок. Залежно від умов реалізації процесу розрізняють два типи гідротранспорту: безнапірний і напірний. У безнапірних системах переміщення пульпи здійснюється самопливом через трубопроводи або жолоби, завдяки різниці геодезичних рівнів уздовж траси. Для напірного транспорту характерним є створення надлишкового тиску, необхідного для подолання гідравлічного та гідростатичного опору, що досягається шляхом використання спеціальних напірних установок.

У гірничих підприємствах стаціонарні гідротранспортні установки застосовуються як при підземному, так і при відкритому способах розробки родовищ, а також на збагачувальних фабриках.

Технологічне обладнання таких установок класифікується на основні та допоміжні технічні засоби [7]. До основного обладнання належать: блок пульпоприготування (гідромонітори, зумпфи, змішувачі, живильники); насосне обладнання (основні та допоміжні насоси, будівлі насосних станцій); а також транспортна магістраль (трубопроводи, запірна арматура, опори

трубопроводів). Допоміжні засоби включають: систему регулювання щільності гідросуміші, систему керування гранулометричним складом, систему контролю технологічних параметрів, систему забезпечення надійності функціонування, засоби запобігання замулюванню трубопроводів та систему захисту від гідравлічних ударів.

До складу силового обладнання напірної гідротранспортної системи входять спеціалізовані насоси, призначені для перекачування багатофазних середовищ; допоміжні насоси, які подають робочу рідину (зазвичай це чиста оборотна вода) на вхід гідротранспортної системи; а також електродвигуни, що забезпечують привід насосів. У роботі [7] зазначено, що конфігурація взаємного розташування насосів і зумпфу суттєво впливає на режими експлуатації гідротранспортної установки.

Виділяють три основні схеми розміщення насосного обладнання відносно зумпфу:

- насос розташований вище зумпфу;
- насос і зумпф знаходяться на одному рівні;
- насос розміщений нижче дна зумпфу або між дном і верхом зумпфу.

Геометричні та гідравлічні параметри трубопроводної мережі безпосередньо впливають на робочі характеристики насосного обладнання та ефективність функціонування блоку пульпоприготування.

Розглянемо основні різновиди технологічних схем гідросистем.

На рис. 1.1 представлено технологічну схему гідравлічного транспорту при підземній розробці в умовах гідрошахти.

Відбій гірської маси здійснюється за допомогою гідромонітора (1), після чого утворена гідросуміш самопливом спрямовується в камеру гідропідйому по похило встановлених жолобах (2). Перед надходженням у вуглесосну установку необхідне подрібнення великої фракції. З цією метою гідросуміш у камері гідропідйому проходить через гуркити (3), де великі частинки скеровуються до дробарки (4).

Дрібна фракція та подрібнений матеріал надходять до зумпфа (5), звідки за допомогою вуглесоса (6) гідросуміш перекачується по трубопроводу (7) на поверхню.

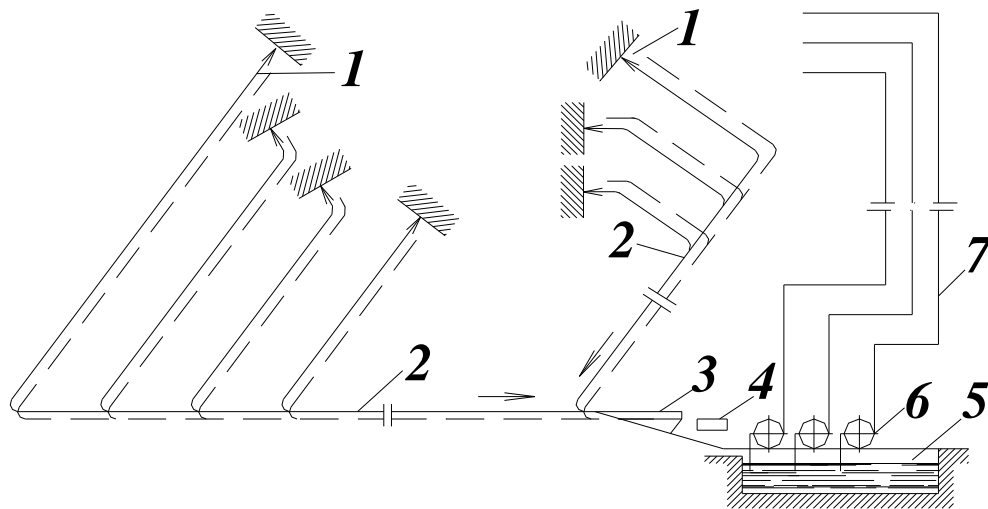


Рисунок 1.1 – Технологічна схема гідротранспорту:

*1 – гідромонітор; 2 – жолоби; 3 – гуркіт; 4 – дробарка; 5 – зумпф;
6 – вуглесос; 7 - трубопровід*

Для відкритих гірничих розробок використовуються різноманітні схеми гідравлічного транспортування. У випадку розробки пухких порід застосовується гідравлічне руйнування, після чого утворена гідросуміш самопливом спрямовується до зумпфа, звідки за допомогою напірного гідротранспорту транспортується на збагачувальну фабрику [3, 7, 9, 12-14].

Якщо ж об'єктом розробки є щільні породи, які складно піддаються гідророзмиванню, їх відбій виконується механічними засобами. В результаті порода, що містить корисні копалини, розпушується та накопичується у конусоподібних насипах. Надалі ці конуси розмиваються гідромоніторами, а отримана гідросуміш надходить до акумулюючих ємностей. Звідти суміш насосами перекачується трубопровідною системою на збагачувальний комплекс (комбінат).

Використання складування розпушеної породи у технологічному процесі відкритих гірничих робіт дає змогу вирівнювати нерівномірність вантажопотоку, що надходить у гідротранспортну систему [3, 7, 9, 12-14].

Від діючих кар'єрів до збагачувальної фабрики транспортування рудних пісків здійснюється виключно гідротранспортом. Процеси гідромоніторного розмиву та подачі рудної пульпи на фабрику реалізуються по чергово за допомогою двох незалежних гідротранспортних систем. Гідросуміш подається з кар'єрів до збагачувальної фабрики центробіжними насосами. Кожна з гідротранспортних систем обладнана трьома насосами, що працюють за схемою «насос за насосом», без використання проміжних ємностей для пульпи (рис. 1.2).

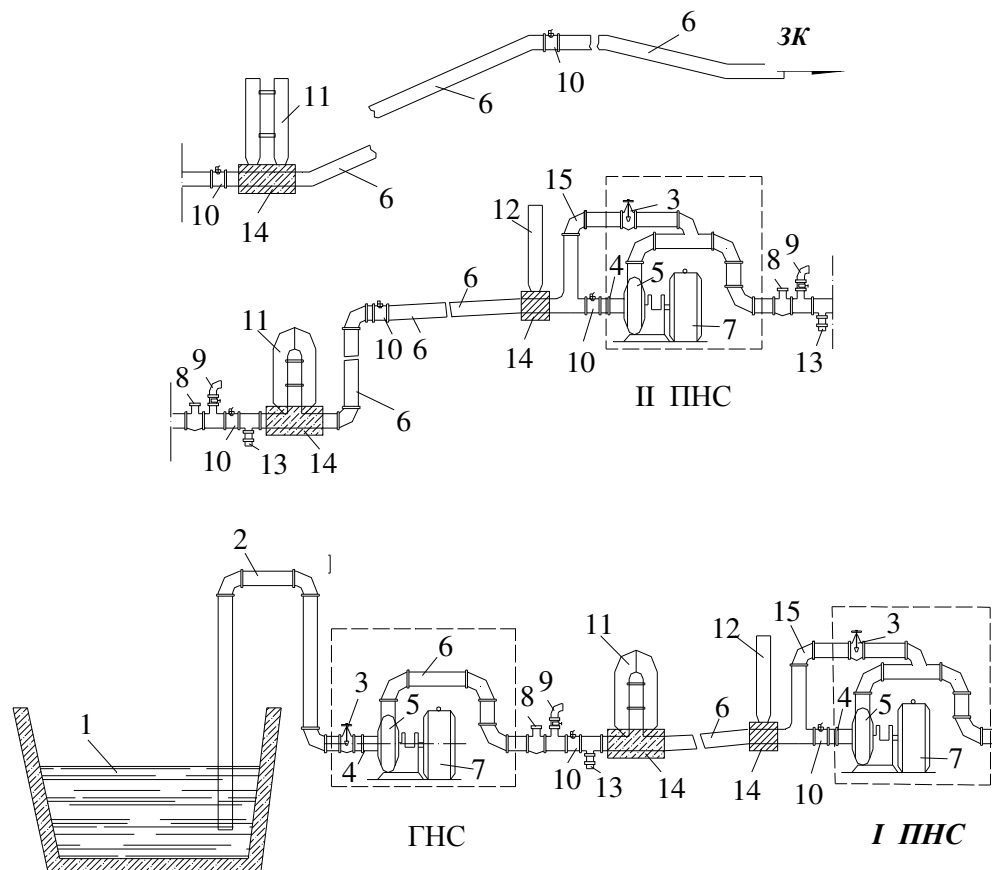


Рисунок 1.2 – Багатоступенева гідротранспортна система з каскадним увімкненням насосів

Система має у своєму складі:

ГНС – головна насосна станція

ПНС – проміжна насосна станція

ЗК – збагачувальний комплекс (комбінат)

1 – накопичувальний зумпф

2 – всмоктувальна труба

3 – електрифікований затвор (засувка)

4 – компенсатор температурного розширення трубопроводів

5 – центробіжний насос

6 – нагнітальний трубопровід

7 – електродвигун

8 – зворотний клапан

9 – запобіжний клапан із розривним робочим органом

10 – впускно-випускний клапан (вантуз)

11 – подвійна повітряно-гідравлічна колонна

12 – повітряно-гідравлічна колонна

13 – патрубок із засувкою для випуску гідросуміші

14 – бетонна опора

15 – обвідна труба

Гідросуміші, що складаються з кількох фракцій, відносять до полідисперсних систем. Динаміка руху таких полідисперсних гідросумішей визначається домінуванням певних фракцій за їхнім складом. Особливу увагу необхідно приділяти присутності тонких і найтонших фракцій, оскільки їхній вплив на характер руху, за інших рівних умов, є більш вагомим порівняно з впливом крупних фракцій [3, 7]. Тверді частинки, за рахунок зіткнень із внутрішніми стінками трубопроводу та взаємодії між собою, спричиняють збільшення гідравлічних втрат напору в процесі руху гідросуміші у порівнянні з течією чистої води.

Присутність у пульпі тонких та найтонших глинистих фракцій призводить до зменшення втрат напору, оскільки їхня взаємодія з водним середовищем сприяє формуванню більш щільного та в'язкого носія з підвищеною несучою здатністю [7]. Окрім води та твердих частинок, у кар'єрних трубопроводах може бути присутня також фаза повітря [9]. Наявність повітря істотно ускладнює математичне моделювання фізичних процесів напірного транспортування, оскільки в таких умовах необхідно враховувати трифазний склад гідросуміші, що транспортується, замість традиційного двофазного.

У межах збагачувальних комбінатів гідравлічний вид транспорту є одним із найпоширеніших методів переміщення промислової продукції. Він застосовується для транспортування матеріалів між послідовними стадіями збагачення, зокрема між апаратами гравітаційного збагачення, гідроциклонами, згущувачами, змішувачами, а також у процесах флотації та видаленні хвостів у відвали [3, 7, 9, 12-14]. Режими функціонування гідротранспортних систем у межах збагачувальних комбінатів визначаються специфікою технологічного процесу збагачення. Варто відзначити, що режими роботи гідротранспортних установок у таких умовах, як правило, характеризуються високою стабільністю: коливання технологічних параметрів, як правило, відсутні, за винятком аварійних ситуацій, або мають періодичний і легко прогнозований характер.

2.2. Аналіз відомих методів та засобів автоматизації керування процесом транспортування сировини гідротранспортом

При аналізі роботи стаціонарної гідротранспортної системи як об'єкта автоматичного управління слід відзначити її тісний взаємозв'язок із суміжними ланками технологічного процесу. Наприклад, в умовах шахти зупинка будь-якого забійного механізму за відсутності роботи рейкового або конвеєрного

транспорту призводить до зменшення завантаження транспорту, але не спричиняє суттєвих втрат. У разі гідрошахти, де транспортування сировини здійснюється гідравлічним способом, подібна зупинка призводить до зростання витрати води при одночасному зниженні завантаження гідротранспортної системи.

Особливо критичною є ситуація у випадку розгалужених гідротранспортних систем, які застосовуються на багатьох гірничих підприємствах. Тут зупинка навіть однієї ділянки системи, попри повну зупинку відповідних вибійних механізмів, може спричинити порушення ритмічної роботи всієї транспортної мережі. Таким чином, в умовах експлуатації гідросистем необхідно забезпечувати їхню безперебійну роботу, оскільки кожне зупинення або повторне вмикання призводить до значних втрат енергії та ресурсів.

Автоматизація гідротранспортних систем здійснюється поетапно, з урахуванням технічної складності об'єкта, вимог до керованості та забезпечення безперебійної роботи всього комплексу. У загальному випадку можна виділити три основні етапи [3, 7, 9, 12-14]:

1. Локальна автоматизація об'єктів управління та окремих технологічних операцій. На цьому етапі впроваджуються місцеві засоби автоматизації, які забезпечують контроль, вимірювання параметрів та керування агрегатами безпосередньо на місці їх розташування. Основні функції:

- автоматичне вмикання/вимикання обладнання,
- регулювання робочих режимів,
- зменшення участі оператора у ручному управлінні.

Метою локальної автоматизації є перехід від ручного режиму керування до напівавтоматичного, за допомогою локальних пультів або щитів управління.

2. *Дистанційний диспетчерський контроль та управління.* Після створення мережі локальних автоматизованих вузлів наступним кроком є централізація функцій управління. Для цього:

- реалізується передача інформації від локальних об'єктів на диспетчерський пункт,
- здійснюється централізоване керування агрегатами,
- формується повна картина технологічного процесу у реальному часі.

Цей етап дозволяє диспетчеру здійснювати оперативне втручання, підвищуючи ефективність керування і швидкість реагування на зміни умов експлуатації.

3. *Автоматизовані та автоматичні системи телеуправління.* Завершальний етап передбачає створення інтегрованої автоматизованої системи управління всім гідротранспортним комплексом. Основні завдання [7, 9, 12-14]:

- забезпечення оптимальних режимів функціонування всіх ланок системи,
- підвищення надійності та безперервності роботи,
- зниження втрат енергії, води, матеріалів,
- впровадження засобів математичного моделювання, прогнозування та адаптивного управління.

На цьому рівні виникають високі вимоги не лише до технічного забезпечення, а й до програмного комплексу, який повинен реалізовувати складні алгоритми оптимізації, діагностики та адаптації.

Для складних, розгалужених гідротранспортних систем, що функціонують у шахтах і кар'єрах, доцільним і економічно обґрунтованим підходом є централізація процесу управління, при якому робота всіх окремих ланок підпорядковується досягненню єдиної глобальної мети системи. Такий підхід дозволяє підвищити узгодженість функціонування окремих елементів, зменшити енергетичні витрати та покращити стабільність технологічного процесу.

Зокрема, як зазначено у [7], при автоматизованому керуванні гідротранспортною системою шахти доцільно реалізувати систему пріоритетів для виконавчих регулюючих засобів. У межах цієї концепції вибір виконавчого механізму для регулювання здійснюється з урахуванням певного глобального критерію управління, наприклад, мінімізації сумарних втрат тиску, витрат енергії або забезпечення максимального транспортування сировини за заданий проміжок часу.

Особливістю такого підходу є те, що пріоритети визначаються динамічно — залежно від поточного стану системи, характеру навантаження та умов роботи насосних (напірних) установок. Це дозволяє адаптувати управління до змінного середовища та забезпечувати полірежимне функціонування системи в реальному часі, що є критично важливим у гірничодобувній промисловості. Загальна структура АСУТП, яка включає ланку автоматизації гідротранспорту пульпи, показана на рис. 1.3 [9].

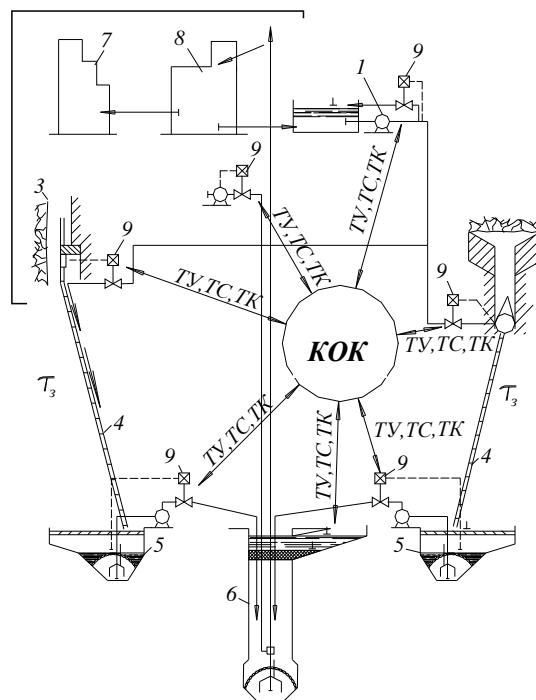


Рисунок 1.3 – Схема дистанційного телеуправління процесом гідрошахти

На рисунку використані такі позначення: КОК-керувальний обчислювальний комплекс; 1 – насосна станція технологічного водопостачання; 2, 3 – забої шахти; 4 – безнапірний гідротранспорт; 5 – дільничні вуглесосні станції; 6 – ерліфтний гідропідйом ; 7 - хвостосховища ; 8 – збагачувальний комбінат; 9 – керовані виконавчі механізми; ТУ, ТС, ТК - відповідно системи телеуправління, телесигналізації, телеконтролю .

Зазначена автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) спрямована на вирішення комплексу завдань, пов'язаних з ефективною та безпечною експлуатацією гідротранспортної системи. Зокрема, система забезпечує: безперебійне функціонування всіх технологічних об'єктів, експлуатацію обладнання в межах допустимих технологічних режимів, захист системи від небезпечних гідродинамічних явищ, таких як: гідроудари, закупорки трубопроводів, кавітаційні процеси у насосах, регулювання подачі гідросуміші в окремі ділянки трубопровідної мережі, раціональне використання технологічної води та електроенергії.

Система має тріступеневу (триярусну) архітектуру, яка передбачає розподіл завдань за рівнями управління [3, 7, 9, 12-14]:

- Нижній ярус – локальні системи автоматичного керування, що включають: апаратуру управління водопостачанням окремих ділянок, обладнання керування вуглесосними станціями, локальні контролери з виконавчими пристроями.
- Середній (другий) ярус – керування при нерозрахункових або нестандартних режимах роботи. Тут реалізуються функції адаптації, корекції та переведення системи у стійкий режим.
- Верхній (третій) ярус – керування в аварійних або критичних режимах, включаючи функції оптимізації, швидкого реагування, аварійного зупинення та запуску резервних систем.

Основним функціональним завданням системи є забезпечення водопостачання вибоїв, що є першою і найважливішою ланкою технологічного

процесу гідровидобутку. Ефективність та стабільність цього етапу безпосередньо визначає режими роботи наступних ланок, включаючи гідротранспортну мережу.

На більшості підприємств гірничодобувної галузі функції управління гідротранспортними системами покладено на диспетчерську службу. Основною метою диспетчерського управління є забезпечення скоординованої роботи всіх технологічних підрозділів підприємства або об'єднання підприємств, а також досягнення високих техніко-економічних показників виробництва. До обов'язків диспетчера входить контроль та централізоване управління технологічними процесами та обладнанням, підтримання надійних і стабільних режимів функціонування гідротранспортних систем, здійснення оперативного планування, встановлення та контроль параметрів роботи окремих транспортних ланок, а також своєчасне реагування на аварійні ситуації з метою їх попередження та ліквідації.

У контексті автоматизації гідротранспортних систем вирішальне значення мають вибір та впровадження ефективних локальних засобів вимірювання, контролю та автоматизації. Зокрема, під час керування напірними гідротранспортними установками шахт, кар'єрів і збагачувальних фабрик виникає об'єктивна потреба в автоматизації процесів керування напірними агрегатами. На сьогодні розроблено низку схем автоматизованого керування роботою відцентрових насосів для перекачування гідросуміші, які реалізують ключові функції: автоматичне вмикання та вимикання електроприводів насосів, дистанційний моніторинг стану обладнання, а також регулювання основних технологічних параметрів процесу транспортування [3, 7, 9, 12-14].

В умовах функціонування збагачувальних комплексів автоматизація насосних установок є складовою частиною комплексної автоматизації виробництва та покликана вирішувати низку важливих завдань. До основних з них належать: забезпечення безперервного транспортування сировини між окремими стадіями збагачення; стабілізація рівня матеріалу в технологічних

ємностях; централізоване управління послідовністю виконання технологічних операцій; а також контроль та захист технологічного обладнання від експлуатації в недопустимих або аварійних режимах. Обрані способи регулювання повинні відповідати специфіці збагачувального процесу та забезпечувати стабільну й безперебійну роботу всієї технологічної системи в заданому режимі.

Аналіз існуючих гідротранспортних систем свідчить про наявність низки стримувальних факторів, що ускладнюють впровадження ефективних автоматизованих рішень у галузі транспортування пульпи. До основних з них слід віднести відсутність універсальних методик розрахунку та адекватного математичного опису процесів, що відбуваються у гідротранспортних системах, які могли б бути застосовані в умовах реального виробництва. Крім того, розвиток автоматизації стримується через нестачу ефективних виконавчих механізмів, сучасних локальних засобів автоматизації та контрольно-вимірювальної апаратури, здатних працювати в складних умовах гірничовидобувного виробництва.

Аналіз сучасного досвіду експлуатації нафто- та газопровідних систем свідчить про активне впровадження інтелектуальних систем управління в процеси автоматизації об'єктів даної галузі [2, 7, 9, 10]. Практика підтверджує, що такі системи здатні ефективно забезпечувати високий рівень надійності контролю та управління технологічними процесами гідротранспорту, що зумовлює доцільність їх застосування й в інших сферах транспортування пульпи та рідин у промислових умовах.

Для ефективного керування складними технологічними процесами, а також з метою забезпечення контролю та діагностики технічних систем доцільним є поєднане використання методів штучного інтелекту з математичним моделюванням об'єктів. Застосування інтегрованого нейро-нечіткого (нейро-фаззі) підходу до задач управління гідротранспортними системами, моделювання та підтримки прийняття рішень забезпечує

можливість обробки великих обсягів різномірної та неповної інформації. Такий підхід дозволяє враховувати досвід кваліфікованих фахівців, використовувати експертні оцінки та переваги, здійснювати класифікацію неповної інформації, а також реалізовувати механізми самонавчання системи на основі емпіричних даних і прикладів.

Висновки до розділу

1. Більшість складних технологічних процесів, зокрема напірне гідравлічне транспортування багатофазних середовищ, характеризуються суттєвою нелінійністю та багатопараметричністю. Управління такими системами ускладнюється необхідністю залучення великого обсягу вхідної інформації про об'єкт керування, а також потребує значних обчислювальних ресурсів для адекватного моделювання та прийняття рішень. У зв'язку з цим у реальних умовах промислової експлуатації керування подібними об'єктами, як правило, здійснюється висококваліфікованим персоналом на основі професійного досвіду та емпіричних знань, що не завжди гарантує оптимальність управлінських рішень.

2. На сучасному етапі прийняття рішень щодо управління гідротранспортними системами здебільшого здійснюється диспетчерами на основі оперативних даних, отриманих від вимірювальної апаратури, а також із використанням накопиченого досвіду. У зв'язку з цим проектування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, спрямованих на оперативне диспетчерське керування гідротранспортом, є надзвичайно актуальним завданням сучасної науки і техніки.

2 РОЗРОБКА НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ

2.1. Побудова функцій належності

У гідротранспортних системах як напірні пристрої використовують спеціально сконструйовані відцентрові насоси, призначені для перекачування багатофазних середовищ. Основними характеристиками відцентрового насоса для гідросуміші є: натиск; подача; потужність [3, 7, 13].

Напір, що створюється насосом, відображає приріст механічної енергії, яку отримує одиниця маси рідини під час її переміщення через насос. подача або продуктивність насоса визначається як об'єм рідини, що перекачується за одиницю часу. Під час розрахунку характеристик насоса розрізняють корисну потужність і споживану потужність [3, 7, 13].

Потік пульпи, що проходить через насос, отримує механічну енергію від двигуна, який приводить в обертання робоче колесо відцентрового насоса. Передача енергії відбувається під час руху гідросуміші через обертові канали, сформовані лопатями колеса. Рух гідросуміші в цих каналах є складним і включає два компоненти — відносний та переносний рух [3, 7, 13].

Відцентрові насоси, призначені для перекачування гідросумішей, мають конструктивні відмінності порівняно з насосами, що працюють з чистою рідиною. У сучасних моделях відцентрових насосів для чистої води гідравлічний коефіцієнт корисної дії (що враховує втрати в робочому колесі та корпусі насоса) досить високий і досягає приблизно 0,95. Натомість у насосів, призначених для гідросумішей, цей показник значно нижчий — у межах 0,7–0,75 [7, 12, 13, 19].

Зменшення гідравлічного ККД зумовлене, по-перше, меншою кількістю лопаток у робочому колесі та недосконалою гідравлічною формою відвідного каналу в корпусі. По-друге, самі гідросуміші зазвичай мають високу абразивність, що призводить до гідроабразивного зносу робочого колеса та

інших елементів насоса в процесі експлуатації, а це, своєю чергою, спричиняє подальше зниження гідравлічного ККД.

Для формалізації експертних знань було використано математичний апарат теорії нечітких множин. Використання нечіткої логіки дає змогу безпосередньо формулювати стратегії управління складними об'єктами. Навіть при побудові нечітких математичних моделей або фаззі-контролерів складні системи залишаються інтуїтивно зрозумілими та прозорими для сприйняття людиною [1, 2].

У моделі відцентрового насоса як вхідні параметри використовуються лінгвістичні змінні «витрата гідросуміші» та «щільність гідросуміші», а вихідним параметром виступає змінна «напір». На основі експертних знань визначаються відповідні нечіткі змінні (терми), які необхідні для опису об'єкта, і будуються відповідні функції належності.

Для побудови нечіткої моделі відцентрового насоса було використано сім термів:

«дуже мале» (ДМ)

«мале» (М)

«нижче середнього» (НС)

«середнє» (С)

«вище середнього» (ВС)

«велике» (В)

«дуже велике» (ДВ).

Відповідно до підходу, запропонованого в [7], нечітка змінна може бути представлена трійкою (y, U, R) , де y — це назва нечіткої змінної, U — універсальна множина визначення, а R — нечітка підмножина множини U .

Вважається, що під час формалізації експертних оцінок фахівець здатен без значних зусиль визначити три характерні точки на універсальній шкалі значень: aaa , bbb , ccc . При цьому значення aaa і ccc відповідають нижній та

верхній межам належності, тобто таким значенням, для яких ступінь належності до нечіткої множини дорівнює нулю. Значення x_m , у свою чергу, відповідає максимуму функції належності, тобто має повну належність (ступінь належності дорівнює одиниці).

Побудова функцій належності графічним параметричним методом передбачає виконання низки послідовних дій: а) визначається вершина функції належності — точка перетину горизонтальної прямої $z=1$, що відповідає максимальному значенню функції, з перпендикуляром до осі абсцис у точці x_m ; б) на осі абсцис відмічаються дві точки, розташовані по обидва боки від точки x_m , які чітко не належать відповідному нечіткому терму; в) отримані точки з'єднуються між собою відрізками прямих, утворюючи трикутну або трапецієподібну форму функції належності.

Зазначимо, що одна з меж — ліва x_n або права x_e — може набувати значення нескінченності. У такому випадку функція належності набуває асиметричного вигляду, приклад якого зображено на рис. 2.1 (праворуч).

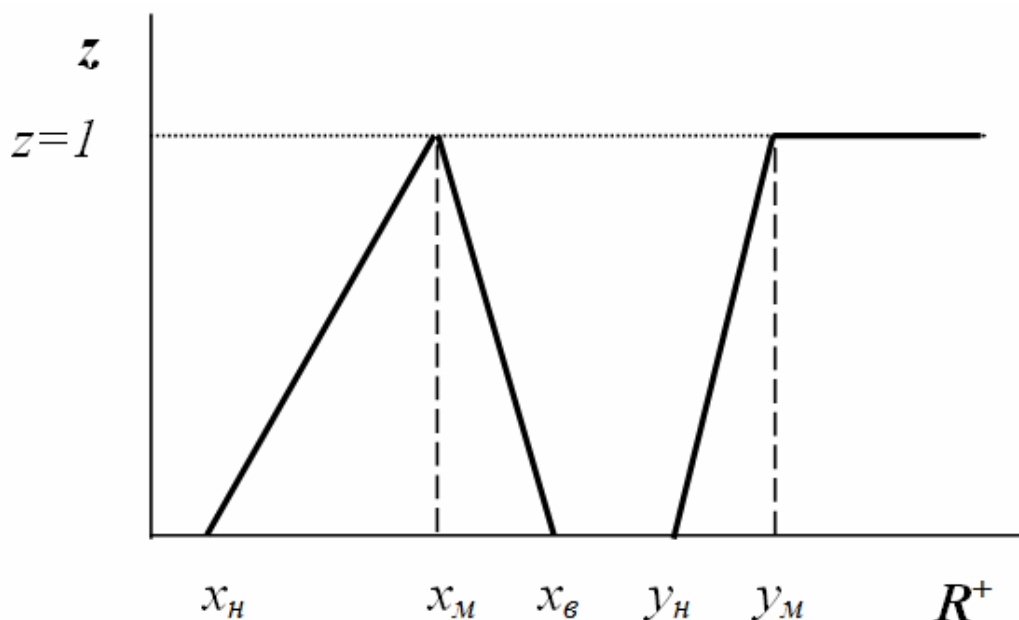


Рисунок 2.1 – Схема побудови функцій належності

Таким чином, на основі експертних знань та результатів аналізу емпіричних даних [2, 7, 9, 12-14] для вхідних і вихідних лінгвістичних змінних були побудовані функції належності відповідних нечітких термів. Всі функції мають трикутну форму, що наочно представлено на рис. 2.2- 2.4.

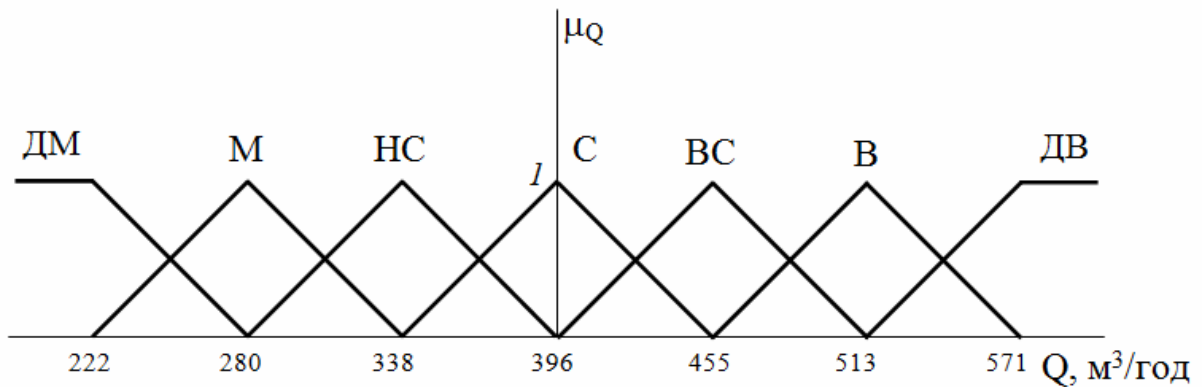


Рисунок 2.2 – Функція приналежності вхідної змінної «витрата» нечіткої моделі відцентрового насоса

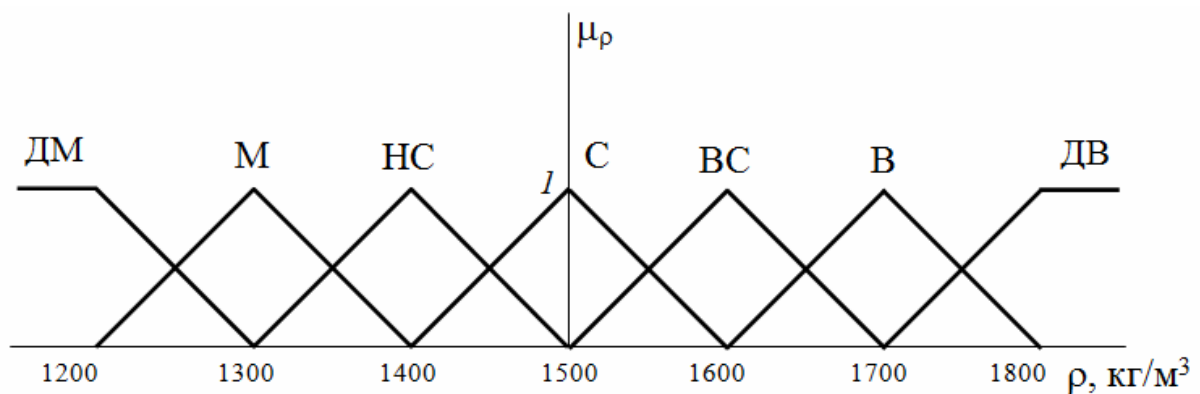


Рисунок 2.3 – Функція приналежності вхідної змінної «щільність» нечіткої моделі відцентрового насоса

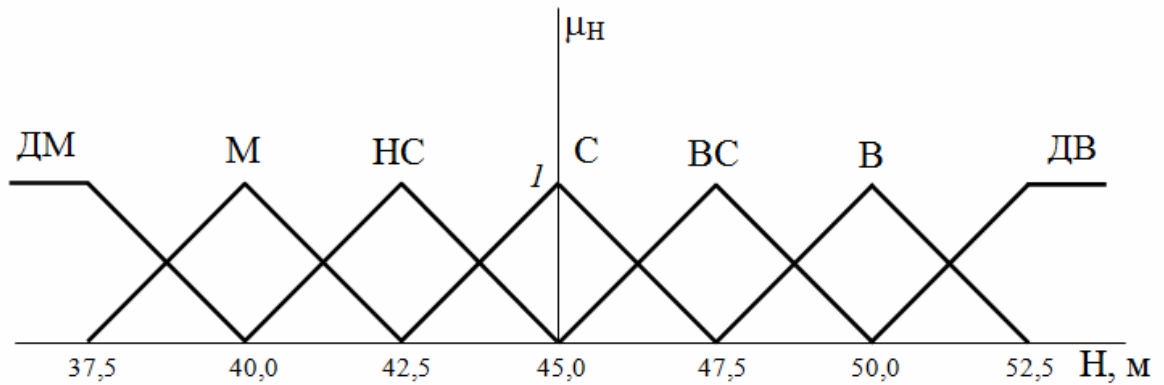


Рисунок 2.4 – Функція приналежності вхідної змінної «напір» нечіткої моделі відцентрового насоса

Аналітично функції належності трикутної форми описуються так:

$$\mu(p) = 0, \text{ якщо } p \geq r, \mu(p) = 0, \text{ якщо } p \leq l,$$

$$\mu(p) = (pl)/(cl), \text{ якщо } l < p < c, \mu(p) = (rp)/(rc), \text{ якщо } c < p < r,$$

де p - значення нечіткої змінної,

l, r – відповідно ліва та права межі трикутника на осі абсцис,

c – абсцис висоти трикутника.

2.2. Синтез нечіткої моделі відцентрового насоса для гідросуміші

При створенні нечіткої математичної моделі відцентрового насоса використовується інформація про функціонування турбомашин, отримана від кваліфікованих фахівців, та дані експериментальних досліджень різних авторів. На її основі будується база знань з урахуванням запроваджених лінгвістичних змінних. Нині є кілька методів побудови експертної бази знань [57]. Для побудови бази знань моделі насоса використовувався спосіб продукції: експерт самостійно формує ланцюжки своїх логічних міркувань за схемою «від

причини – до слідства». Продукція є правилом, що складається з двох частин: у першій описується конкретна ситуація або набір ситуацій, об'єднаних деякими логічними зв'язками (наприклад, «І», «АБО», «НЕ»); у другій частині вказується певний для цієї ситуації результат або набір дій, що рекомендуються [58].

Математично база знань – це нечітке (або лінгвістичне) відношення, яке на якісному рівні встановлює залежність вхідних та вихідних змінних.

Наприклад, логічне висловлювання «якщо щільність гідросуміші велика і при цьому витрата гідросуміші дуже великий, то насос повинен розвивати на виході середній напір» може бути записано наступним чином:

якщо "щільність гідросуміші" = В і "витрата" = ПРО, то "натиск" = С.

Набір логічних висловлювань, сформульованих експертом, прийнято представляти як таблиці. Нечітка база знань для відцентрового насоса, що працює на гідросуміші, наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – База знань нечіткої моделі

$\begin{matrix} Q \\ \rho \end{matrix}$	ДМ	М	НС	С	ВС	В	ДВ
ДМ	ВС	ВС	С	НС	НС	М	ДМ
М	В	В	ВС	С	НС	НС	М
НС	ДВ	ДВ	В	ВС	С	НС	НС
С	ДВ	ДВ	В	В	ВС	С	НС
ВС	ДВ	ДВ	ДВ	В	ВС	С	С
В	ДВ	ДВ	ДВ	ДВ	В	ВС	С
ДВ	ДВ	ДВ	ДВ	ДВ	ДВ	В	ВС

Структурна схема нечіткої моделі відцентрового насоса представлена на рис. 2.5. Стрілки з хвилястою штрихуванням показаний обмін нечіткою

інформацією між блоками моделі. Більш детальна схема, що зображує вміст блоків моделі, показано на рис.2.6 де демонструється виконання конкретного прикладу функціонування моделі.

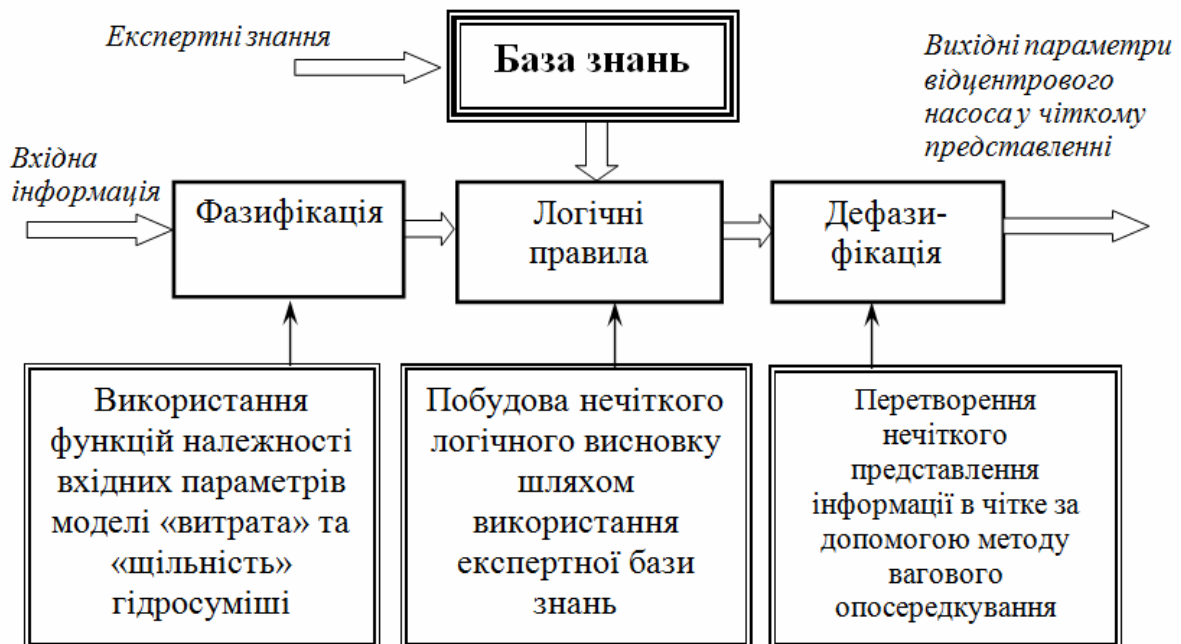


Рисунок 2.5 – Структурна схема нечіткої моделі

У блоці фазифікації, тобто. введення нечіткості, фізичні змінні, що є вхідними параметрами моделі відцентрового насоса, перетворюються на нечіткі терміни на підставі обраних функцій приналежності (наприклад, на рис.2.7).

Необхідно відзначити, що значення вхідної змінної об'єкта може одночасно належати кільком нечітким множинам. Це визначає нечіткість вхідної експертної інформації.

З експертної бази знань формуються логічні правила опису роботи відцентрового насоса. З використанням правил будується процедура логічного укладання, у ході якої визначаються значення вихідного фази-параметра об'єкта моделювання. Посилки нечітких логічних правил, що у описі роботи насоса, активізуються паралельно.

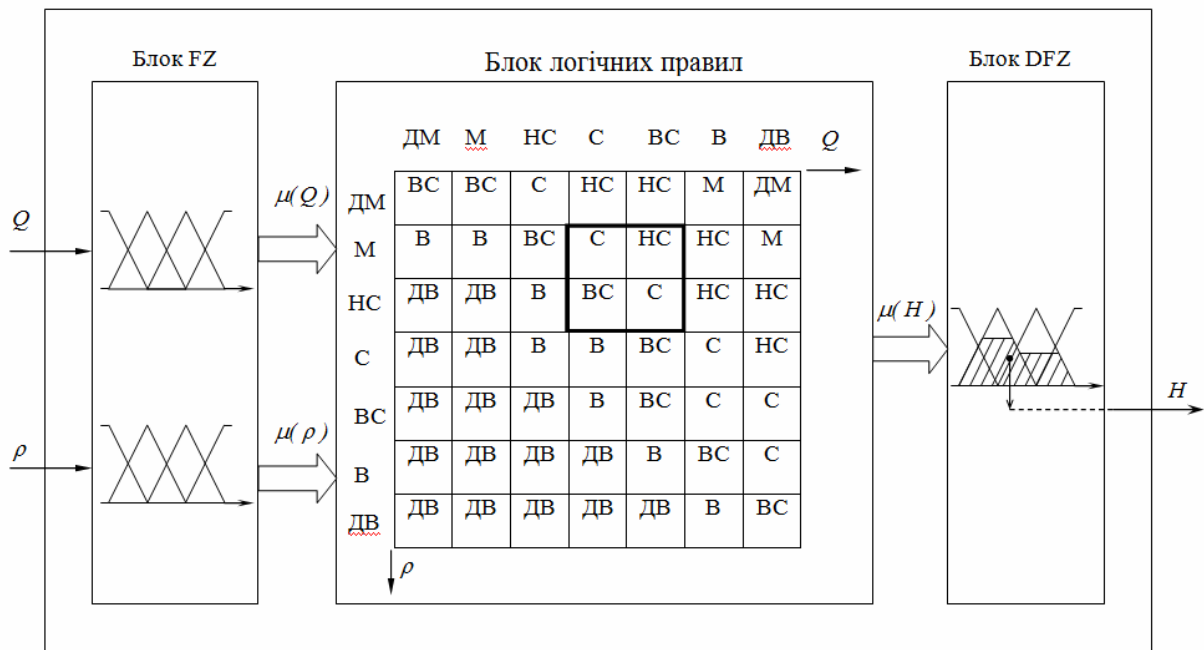


Рисунок 2.6 – Функціональний склад нечіткої моделі відцентрового насоса

Синтезована нечітка модель відцентрового насоса для гідросуміші з сімома рівнями нечітких параметрів включає 49 локальних правил моделі, які виражені як кон'юнкції вхідних фаз-параметрів. У блоці логічних правил на підставі локальних правил бази знань з використанням операції диз'юнкції формується набір узагальнених правил, кількість яких відповідає кількості обраних рівнів вихідної лінгвістичної змінної об'єкта моделювання.

Розглянемо для наочності графічне зображення процедури отримання значень функцій приналежності вихідної змінної «натиск» і операцію дефазифікації (рис.2.8).

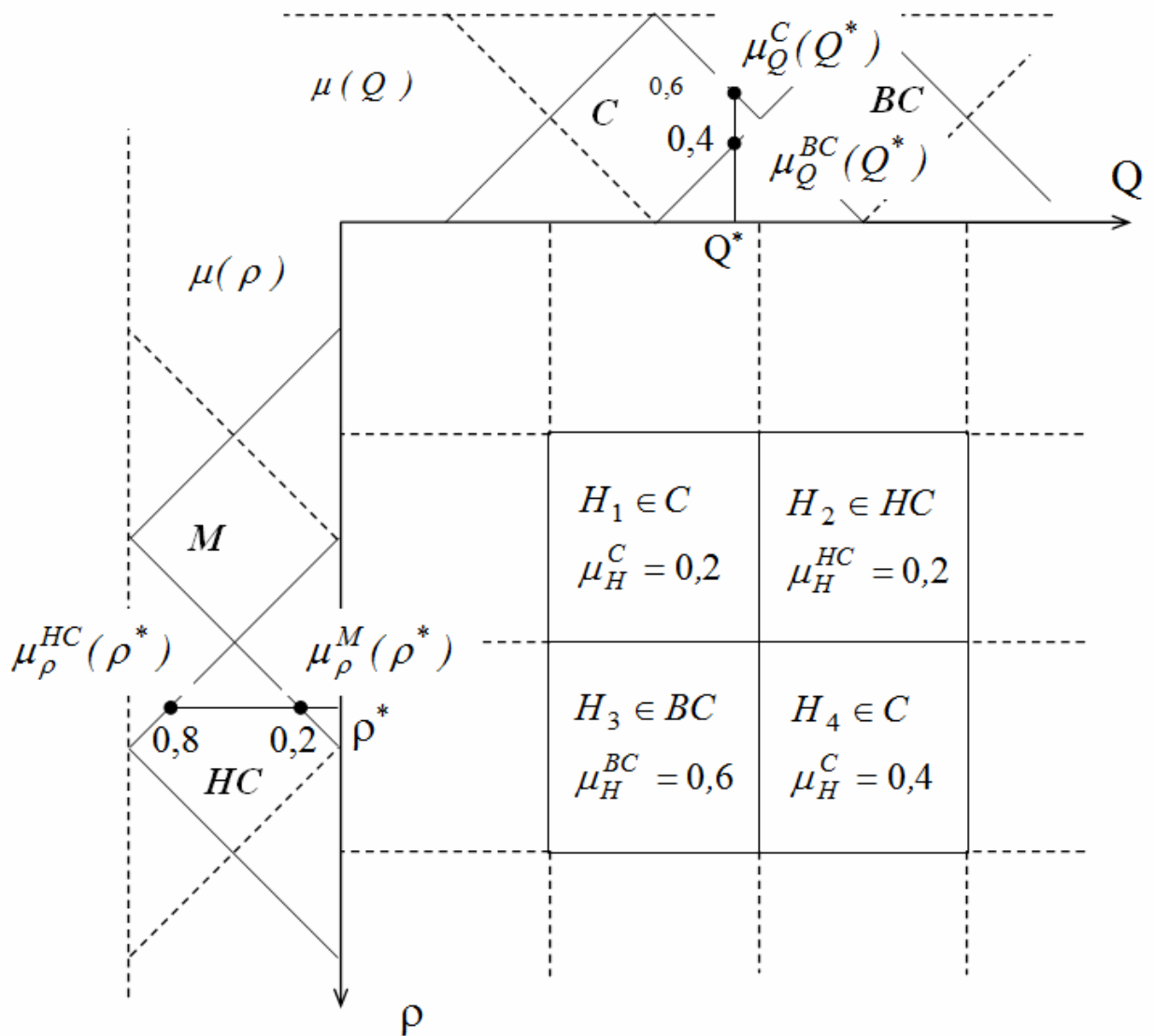


Рисунок 2.7 – Приклад процедури фазифікації вхідних параметрів нечіткої моделі відцентрового насосу

У дефазифікаторі здійснюється зворотний перехід від лінгвістичної інформації до чіткого представлення параметрів. При цьому значення вихідної змінної може одночасно належати кільком нечітким множинам. Наприклад, "напір насоса на нагнітанні = середній" з функцією приналежності 0,4 і "напір на нагнітанні = вище середнього" з функцією приналежності 0,6. На виході моделі потрібно отримати чітке значення реального фізичного параметра. Для цього використовується блок дефазифікація .

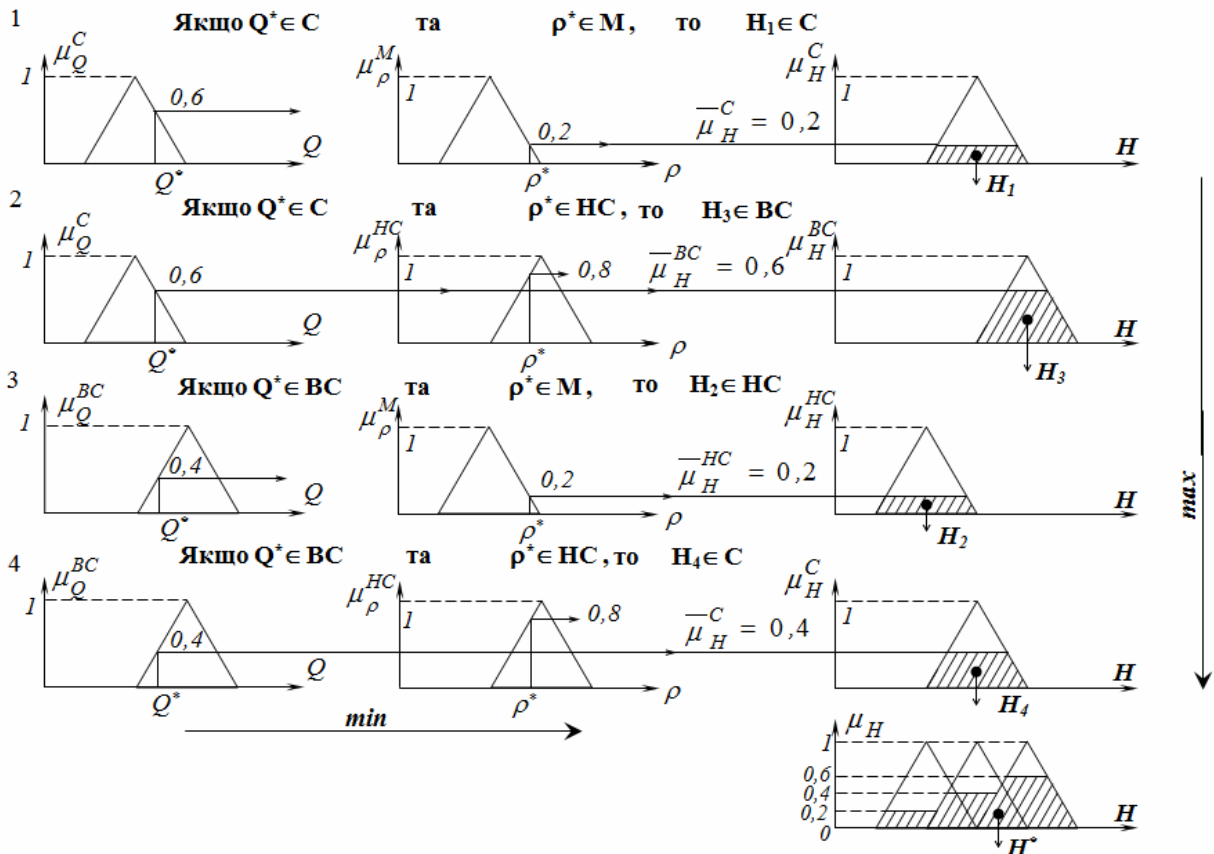


Рисунок 2.8 – Процедура нечіткого логічного висновку

В даний час розроблено велику кількість методів дефазифікації [1, 15, 18]: повна інтерпретація, імовірнісна, min/max, комбінована, по максимуму функції приналежності.

Найбільш поширеним для практичного використання є метод вагового опосередкування (центру тяжкості), який передбачає повну інтерпретацію нечіткої відповідності.

Нечітка модель дозволяє реалізувати нелінійну характеристику вхід-вихід об'єкта на підставі експертної інформації з використанням неповних емпіричних даних. Перевагою нечіткого підходу до моделювання є простота та якісний, прозорий для сприйняття фахівців характер опису функціонування об'єкта.

Значення підставлялися в еталонну модель і як вхідні дані для нечіткого моделювання. При підстановці модель числові дані попередньо було фазифіковано. Результат моделювання представлено у числовому вигляді та порівнювався з відповідним еталонним значенням. Після чого було обчислено абсолютну похибку. Програма, що реалізує нечітку модель відцентрового насоса для гідросуміші, наведена у додатку А.

2.3. Побудова та дослідження нечіткої моделі роботи для струминного насоса

З метою зниження знос відцентрового насоса та економії електроенергії пропонується удосконалення схеми напірного вузла, яка показана на рис. 2.9. Дана схема буде послідовно включати відцентровий та струминний насоси.

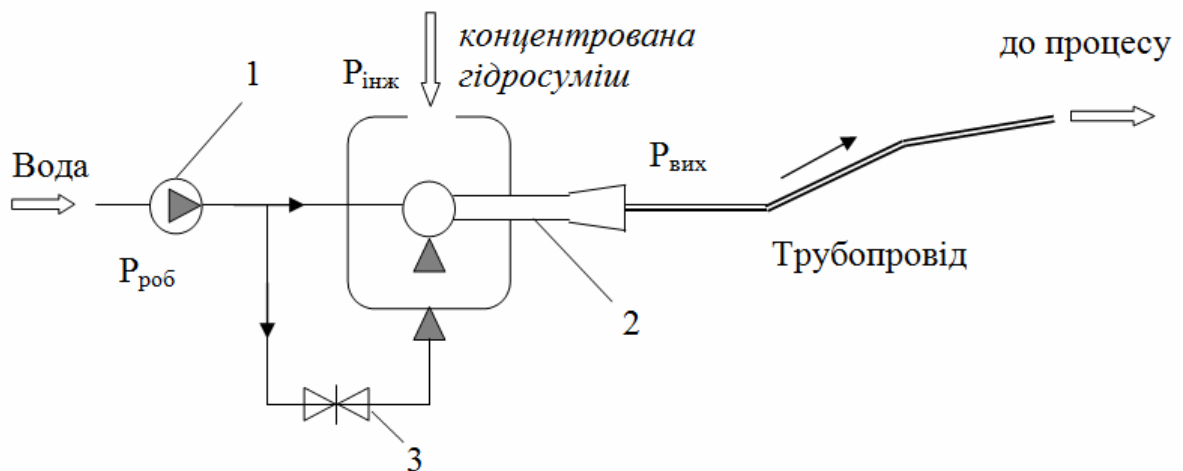


Рисунок 2.9 – Кінематична схема роботи насосів:

1 – відцентровий насос; 2 – струминний насос; 3 - дросель

Відцентровий насос 1 створює надлишковий тиск $P_{роб}$ робочої рідини (вода) на вході струминного насоса 2. У соплі струминного насоса відбувається

перетворення потенційної енергії робочої рідини в кінетичну енергію, в результаті чого робоче середовище рухається з великою швидкістю і створює розрідження, яке потрібне для змішування струминного насоса. У камері змішування відбувається передача енергії, і на виході струменевого насоса виникає певний результуючий тиск $P_{вих}$. За допомогою дроселя 3 регулюється подача робочої рідини струменевий насос.

Потім було перевірено вплив нечіткого завдання емпіричних коефіцієнтів швидкості на значення коефіцієнтів $\tilde{a}_i (i = \overline{1,3})$ моделі струминного насоса. Було задано значення коефіцієнтів швидкості:

Варіант 1.

$$\tilde{\varphi}_1 = (0,097; 0,05; 0,04)_{LR};$$

$$\tilde{\varphi}_2 = (0,855; 0,04; 0,05)_{LR};$$

$$\tilde{\varphi}_3 = (0,88; 0,06; 0,04)_{LR}$$

Маємо результат:

$$\tilde{a}_1 = (0,24; 0,08; 0,09)_{LR};$$

$$\tilde{a}_2 = (0,16; 0,032; 0,02)_{LR};$$

$$\tilde{a}_3 = (0,2; 0,05; 0,04)_{LR}.$$

Варіант 2

$$\tilde{\varphi}_1 = (0,09; 0,15; 0,155)_{LR};$$

$$\tilde{\varphi}_2 = (0,85; 0,078; 0,08)_{LR};$$

$$\tilde{\varphi}_3 = (0,83; 0,08; 0,085)_{LR}$$

Маємо результат:

$$\tilde{a}_1 = (0,26; 0,21; 0,21)_{LR};$$

$$\tilde{a}_2 = (0,20; 0,07; 0,072)_{LR};$$

$$\tilde{a}_3 = (0,23; 0,095; 0,095)_{LR}.$$

Варіант 3 .

$$\tilde{\varphi}_1 = (0,097; 0,075; 0,05)_{LR};$$

$$\tilde{\varphi}_2 = (0,875; 0,05; 0,07)_{LR};$$

$$\tilde{\varphi}_3 = (0,88; 0,015; 0,045)_{LR};$$

Маємо результат::

$$\tilde{a}_1 = (0,26; 0,21; 0,21)_{LR};$$

$$\tilde{a}_2 = (0,20; 0,07; 0,072)_{LR};$$

$$\tilde{a}_3 = (0,23; 0,095; 0,095)_{LR}.$$

За допомогою цих результатів можна оцінити похибки математичної моделі струминного насоса. Програмне забезпечення, необхідне розрахунку нечітких параметрів моделі струминного насоса та підпрограми для розрахунку нечітких параметрів моделі струминного насоса, наведено нижче.

```
#ifndef JETPUMP_H
#define JETPUMP_H

typedef struct {
    double m; // центр
    double l; // ліва ширина
    double r; // права ширина
} fuzzyvar;

typedef struct {
    // Вхідні дані
    double dPp, dPc, alfa, Gt, Vp, Vcb, Vnb, Vt;
    fuzzyvar fi1, fi2, fi3, fi4;

    // Проміжні результати
    fuzzyvar opt, opt_inv, n;
    fuzzyvar a, b, c, sqrt_disc;
    fuzzyvar au, bu, cu;
```

```

    fuzzyvar fp1, f3;
    double d1, d3, lc1, lc2;
} JetPumpModel;

#endif

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "jetpump.h"

// Базові операції
void sum(fuzzyvar a, fuzzyvar b, fuzzyvar *res) {
    res->m = a.m + b.m;
    res->l = a.l + b.l;
    res->r = a.r + b.r;
}

void ras(fuzzyvar a, fuzzyvar b, fuzzyvar *res) {
    res->m = a.m - b.m;
    res->l = a.l + b.r;
    res->r = a.r + b.l;
}

void umn(fuzzyvar a, fuzzyvar b, fuzzyvar *res) {
    res->m = a.m * b.m;
    res->l = fabs(a.m * b.l + b.m * a.l);
    res->r = fabs(a.m * b.r + b.m * a.r);
}

void del(fuzzyvar a, fuzzyvar b, fuzzyvar *res) {
    res->m = a.m / b.m;
    res->l = fabs((a.l * b.m + a.m * b.l) / (b.m * b.m));
    res->r = fabs((a.r * b.m + a.m * b.r) / (b.m * b.m));
}

// Ініціалізація даних
void Init(JetPumpModel *m) {
    m->dPp = 25000;
    m->dPc = 5000;
    m->alfa = 1.5;
    m->Gt = 18;
    m->Vp = 0.0016;
    m->Vcb = 0.0002;
    m->Vnb = 0.0002;
    m->Vt = 0.0001;

    m->fi1 = (fuzzyvar){0.88, 0.04, 0.04};
    m->fi2 = (fuzzyvar){0.7, 0.06, 0.06};
    m->fi3 = (fuzzyvar){0.88, 0.04, 0.04};
    m->fi4 = (fuzzyvar){0.97, 0.03, 0.03};
}

```

```

// Основний розрахунок
void Calculate(JetPumpModel *m) {
    fuzzyvar fi1_2, fi2_2, fi3_2, fi4_2, tmp1, tmp2;
    fuzzyvar one = {1.0, 0, 0}, two = {2.0, 0, 0}, four = {4.0, 0, 0};
    fuzzyvar A1, A2, B1, expr1, expr2, expr3;

    umn(m->fi1, m->fi1, &fi1_2);
    umn(m->fi2, m->fi2, &fi2_2);
    umn(m->fi3, m->fi3, &fi3_2);
    umn(m->fi4, m->fi4, &fi4_2);

    fuzzyvar dPp_f = {m->dPp, 0, 0}, dPc_f = {m->dPc, 0, 0};
    umn(fi1_2, fi2_2, &tmp1);
    umn(tmp1, dPp_f, &tmp2);
    del(tmp2, dPc_f, &m->opt);

    del(one, m->opt, &tmp1);
    del(m->opt, tmp1, &m->n);

    del(one, fi4_2, &tmp1);    // 1 / fi4^2
    ras((fuzzyvar){2 * m->fi2.m, 2 * m->fi2.l, 2 * m->fi2.r}, tmp1, &expr3);
    ras(two, fi3_2, &expr1);    // (2 - fi3^2)

    A1 = (fuzzyvar){(m->Vcb / m->Vp * m->alfa + m->Vt / m->Vp), 0, 0};
    A2 = (fuzzyvar){(m->Vnb / m->Vp * m->alfa + m->Vt / m->Vp), 0, 0};

    umn(expr1, A1, &tmp1);
    umn(expr3, A2, &tmp2);
    umn(tmp2, m->n, &tmp2);
    ras(tmp1, tmp2, &tmp1);
    umn((fuzzyvar){1 + m->alfa, 0, 0}, tmp1, &m->a);

    B1 = (fuzzyvar){(m->Vcb / m->Vp * (1 + 2 * m->alfa) + m->Vt / m->Vp), 0, 0};
    umn(expr1, B1, &m->b);

    fuzzyvar fi2comp = {2 - m->fi2.m, m->fi2.l, m->fi2.r};
    umn(m->opt, fi2comp, &tmp1);
    umn(expr1, (fuzzyvar){m->Vcb / m->Vp, 0, 0}, &tmp2);
    ras(tmp1, tmp2, &m->c);

    umn(m->b, m->b, &tmp1);
    umn(m->a, m->c, &tmp2);
    umn(four, tmp2, &tmp2);
    ras(tmp1, tmp2, &m->sqrt_disc);
    m->sqrt_disc.m = sqrt(m->sqrt_disc.m); // лише центр

    fuzzyvar minus_b = {-m->b.m, m->b.l, m->b.r};
    sum(minus_b, m->sqrt_disc, &tmp1);
    umn(m->a, two, &tmp2);
    del(tmp1, tmp2, &m->au);
}

```

```

fuzzyvar Gt_f = {m->Gt, 0, 0};
del(Gt_f, m->au, &tmp1);
double SQ = sqrt(m->Vp / (2 * m->dPp));
umn(tmp1, (fuzzyvar){SQ, 0, 0}, &m->fp1);
m->bu = m->fp1;

umn(m->opt, m->fp1, &m->f3);
m->cu = m->f3;

m->d1 = sqrt((4.0 / M_PI) * m->bu.m);
m->d3 = sqrt((4.0 / M_PI) * m->cu.m);
m->lc1 = 1.25 * m->d3;
m->lc2 = 8.0 * m->d3;
}

// Запис у файл
void SaveToFile(JetPumpModel *m, const char *filename) {
    FILE *f = fopen(filename, "w");
    if (!f) return;

    fprintf(f, "Нечіткий коеф. інжекції au = %.6f (± %.6f, %.6f)\n", m->au.m, m->au.l, m->au.r);
    fprintf(f, "Площа сопла fp1 = %.6f м² (± %.6f, %.6f)\n", m->bu.m, m->bu.l, m->bu.r);
    fprintf(f, "Площа змішувача f3 = %.6f м² (± %.6f, %.6f)\n", m->cu.m, m->cu.l, m->cu.r);
    fprintf(f, "Діаметри d1 = %.6f м, d3 = %.6f м\n", m->d1, m->d3);
    fprintf(f, "Довжини змішувача lc1 = %.6f м, дифузора lc2 = %.6f м\n", m->lc1, m->lc2);
    fclose(f);
}

#include <stdio.h>
#include "jetpump.h"

void Init(JetPumpModel*);
void Calculate(JetPumpModel*);
void SaveToFile(JetPumpModel*, const char*);

int main() {
    JetPumpModel model;
    Init(&model);
    Calculate(&model);
    SaveToFile(&model, "results.txt");

    printf("Розрахунок завершено. Результати збережено у 'results.txt'\n");
    return 0;
}

```

Нечіткий коеф. інжекції au = 0.337819 (± 0.000000, 0.000000)
 Площа сопла fp1 = 0.015681 м² (± 0.000000, 0.000000)
 Площа змішувача f3 = 0.038756 м² (± 0.000000, 0.000000)
 Діаметри d1 = 0.141444 м, d3 = 0.222278 м
 Довжини змішувача lc1 = 0.277848 м, дифузора lc2 = 1.778226 м

Висновки до розділу

Показана доцільність застосування математичного апарату нечіткої логіки і нечітких множин для створення моделі відцентрового насоса, яка реалізована на основі лінгвістичної бази знань . Змінні для опису вхідних та вихідних параметрів насоса з використанням параметричного підходу побудовані функції належності нечітких термів

3 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ СІТОК

3.1. Аналіз процесу транспортування сировини

Ухвалення рішень під час визначення параметрів гідравлічного транспортування сировини істотно впливає на енергоємність технологічного процесу [7, 9, 10, 12-14]. На сьогодні більшість гідротранспортних систем, призначених для переміщення пульпи, функціонують у нестійких і далеких від оптимальних режимах. Як зазначалося раніше, основна причина цього полягає в складності точного математичного опису фізичних процесів, що супроводжують транспортування гідросумішей.

Обґрунтований вибір математичної моделі, яка описує рух багатофазного середовища в трубопроводі, відіграє ключову роль у процесі ухвалення управлінських рішень щодо роботи гідротранспортної системи.

Особливі труднощі виникають при визначенні комплексу коефіцієнтів, що характеризують фізико-механічні властивості переміщуваного середовища. Навіть для однофазних рідин, що транспортуються трубопроводами, залишаються нерозв'язаними питання точного визначення таких параметрів, як число Рейнольдса, коефіцієнт гідравлічного опору та інші базові характеристики, необхідні для гідравлічного розрахунку [16, 19, 24].

Для багатофазних потоків задача ускладнюється наступним: зростає кількість параметрів, необхідних для точного опису течії гідросуміші. До них належать, зокрема, гідравлічна крупність твердих частинок, кінематична та динамічна в'язкість, структурна в'язкість, в'язкість зруйнованої структури, а також питомі втрати напору в умовах багатофазного транспортування.

Через значну різноманітність твердих компонентів, які транспортуються за допомогою гідравлічних систем у промисловості, виконати комплексне дослідження всіх можливих типів сировини та побудувати універсальні

аналітичні залежності для визначення параметрів гідротранспорту є надзвичайно складним завданням.

У зв'язку з цим, на практиці прийнято виділяти кілька типових класів гідросумішей, кожен з яких характеризується подібними фізико-механічними властивостями та умовами транспортування.

Для побудови математичних моделей, що описують рух двофазних потоків у трубопроводах, як правило, застосовуються емпіричні залежності, отримані на основі експериментальних досліджень. Ці моделі дозволяють враховувати специфіку взаємодії твердої та рідкої фаз, проте їх застосовність обмежується певними класами сумішей та режимами течії.

Гідравлічні суміші класифікуються залежно від розміру (крупності) твердих частинок, що входять до їхнього складу. Відповідно до цієї ознаки, виділяють такі основні типи гідросумішей [10, 12-14]:

- суспензії — суміші, що містять переважно найтонші фракції твердого матеріалу;
- тонкодисперсні суміші — містять тонкі фракції;
- дрібнодисперсні суміші — характеризуються наявністю дрібних фракцій;
- великодисперсні суміші — включають переважно великі фракції;
- полідисперсні суміші — складаються з твердих частинок змішаної дисперсності.

Крім цього, навіть усередині одного типу гідросумішей можуть спостерігатися суттєві відмінності. Наприклад, суспензії поділяються на стабільні та нестабільні, в залежності від їх здатності до розшарування у стані спокою.

Стабільність суспензії визначається наявністю коагуляційних структурних зв'язків між твердими частинками, які виникають внаслідок дії молекулярних сил. Ці сили створюють певну опірність зсуву, що проявляється у вигляді пружних деформацій структурної решітки суспензії. Такі суспензії, як

правило, мають підвищену ньютонівську в'язкість порівняно з чистою несучою рідиною. Величина в'язкості визначається рівнем дисперсності та концентрацією твердих частинок у рідинному середовищі, що безпосередньо впливає на їх стабільність.

Для стабільних структурних суспензій характерний ламінарний або структурний режим руху в трубопроводі. Формування структур спостерігається за умови високої концентрації твердих частинок розміром до 0,04 мм. У випадку, якщо у складі суспензії присутні більші фракції, які руйнують внутрішні структурні зв'язки, можливий перехід від структурного до турбулентного режиму течії. Стабільні безструктурні суспензії, навпаки, зазвичай транспортуються у так званих перехідних режимах.

Більшість суспензій, які утворюються з порід, концентратів або руд, є статично нестабільними, що проявляється у наявності початкового опору зсуву та дотичних напруг. У разі нестабільних суспензій питомі втрати напору визначаються як функція густини та в'язкості гідросуміші.

Для тонкодисперсних сумішей з об'ємною концентрацією твердих частинок менше 50% типовим є турбулентний режим течії. У такому режимі потік поступово набуває динамічної стабільності.

У випадку суспензій та тонкодисперсних гідросумішей, якщо швидкість потоку перевищує критичне значення, питомі втрати напору перебувають у прямій залежності від густини суміші.

Дрібнодисперсні гідросуміші вважаються нестабільними як статично, так і динамічно. При швидкостях потоку, близьких до критичних, спостерігається значна нерівномірність розподілу твердих частинок по поперечному перерізу трубопроводу. У горизонтальних ділянках трубопроводів нижня частина потоку зазнає надмірного насичення твердими частинками, що може призводити до локального ущільнення пульпи. При збільшенні швидкості руху ступінь рівномірності розподілу частинок зростає.

У порівнянні з суспензіями та тонкодисперсними гідросумішами, тверді частинки дрібнодисперсних сумішей характеризуються підвищеною інерційністю, що істотно впливає на питомий опір потоку пульпи в трубопроводі. Мінімальні втрати напору спостерігаються при критичній швидкості течії, що є оптимальною для транспортування таких сумішей.

Крупнодисперсні (грубодисперсні) гідросуміші мають значну нерівномірність у розподілі твердих частинок по поперечному перерізу потоку. Частинки переміщуються переважно волочінням або переривчастим зависанням поблизу стінок трубопроводу. Унаслідок цього спостерігається значне спотворення епюри швидкостей, що зумовлює ускладнення гідравлічного режиму. Опір потоку таких гідросумішей переважно залежить від сил тертя, концентрації та густини твердих включень. Через високу інерцію великих частинок відбувається руйнування вихрових структур, що зменшує інтенсивність турбулентного перемішування у потоці.

Полідисперсні гідросуміші, у свою чергу, характеризуються наявністю кількох фракцій твердих частинок, серед яких одна зазвичай переважає і визначає загальний характер руху суміші. Поведінка потоку таких сумішей складна і залежить від взаємодії частинок різних розмірів, їх концентрації та механічних властивостей.

Усі описані особливості різних типів гідросумішей мають бути обов'язково враховані при побудові статичних та динамічних моделей напірних трубопроводів, що використовуються для транспортування гідросумішей. Їх ігнорування може призвести до суттєвих похибок у розрахунках та прогнозах поведінки системи.

У процесі промислової експлуатації гідротранспортних систем можуть виникати задачі, розв'язання яких виявляється малоефективним або взагалі неможливим із застосуванням класичних підходів. Реальні виробничі умови часто супроводжуються неповнотою апріорної або оперативної інформації, яка

необхідна для оперативного прийняття рішень, і як наслідок, належного аналізу поточної ситуації та адаптації моделей до змін зовнішніх умов.

Для операторів технологічних процесів найбільшу цінність становить оперативна інформація та можливість моделювання основних параметрів технологічного об'єкта в умовах змін, що відбуваються у гідротранспортній системі. Як правило, це — вхідні та вихідні параметри, а також контрольні параметри у ключових точках системи, до яких належать проміжні насосні станції, бустерні установки та ділянки магістралей із підвищеним ризиком аварій.

Застосування апарату штучних нейронних сіток (ШНС) дає змогу ефективно вирішувати задачі такого типу [2, 7, 21]. При створенні адаптивної нейромережевої моделі визначається необхідний склад вхідних і вихідних параметрів, що є критично важливими для моніторингу та управління процесом гідравлічного транспортування. У процесі обчислювальних експериментів здійснюється відбір найбільш інформативних параметрів, а також можлива декомпозиція загальної задачі на підзадачі, що, в окремих випадках, дозволяє прискорити навчання моделі та підвищити якість ідентифікації.

3.2. Обґрунтування доцільності застосування штучних нейронних сіток для моделювання режимів роботи системи транспортування

Важливою перевагою нейромережевих моделей є мінімальна потреба у знанні точних значень фізичних коефіцієнтів, оскільки більшість з них можуть бути визначені автоматично під час навчання мережі, за умови наявності достатнього обсягу навчальних даних, які містять інформацію про інші параметри, пов'язані із цими коефіцієнтами. Це забезпечує високу адаптивність і гнучкість нейромережевого підходу, що є надзвичайно важливим в умовах складних і динамічних виробничих процесів.

Під час контролю та управління процесом напірного гідротранспорту ключовими параметрами виступають тиск, витрата, густина, концентрація гідросуміші, середній розмір твердих частинок, а також критична швидкість руху пульпи на вертикальних і горизонтальних ділянках трубопроводу.

Використання інтелектуальних нейромережевих методів для ідентифікації режимів функціонування гідротранспорту обумовлене тим, що різні типи твердої сировини, яку транспортують гідросистеми, мають не лише кількісні, а й якісні відмінності у своїх основних функціональних залежностях. Саме ці залежності описують поведінку багатофазного потоку в трубопроводі. У такому контексті застосування традиційних методів моделювання, зокрема поліноміальних моделей, призводить до прив'язки до конкретного об'єкта або до обмеженого класу матеріалів із подібними характеристиками. Такий висновок підтверджується широким спектром наявних методик розрахунку гідротранспортних систем.

Особливо слід відзначити, що жодна з існуючих теоретичних моделей руху полідисперсного середовища в трубопроводах не враховує наявності повітряних бульбашок у гідросуміші. Насправді ж у трубопроводах нерідко переміщується не двофазне, а трифазне середовище, зокрема за наявності пор у твердих частинках.

Оскільки нейромережева модель трубопровідної системи створюється шляхом навчання на основі фактичних експериментальних даних, вона здатна природним чином враховувати вплив вільного повітря на параметри гідротранспорту. Це є суттєвою перевагою такого підходу.

Режими роботи стаціонарних гідротранспортних установок істотно змінюються залежно від технологічних схем видобутку та збагачення, які безпосередньо пов'язані з процесом гідротранспорту. Під час гідравлічного транспортування сировини між окремими операціями збагачення, а також при її переміщенні від родовищ до збагачувальних підприємств, за умови проміжного складування між етапами видобутку та подачі в систему, формуються відносно

стабільні режими функціонування гідротранспортних установок. Для таких режимів характерна незначна варіативність основних технологічних параметрів у процесі експлуатації.

У режимах усталеного функціонування стаціонарних гідротранспортних установок застосування статичних моделей дає змогу ефективно розв'язувати низку актуальних прикладних завдань, зокрема: дослідження можливих режимів транспортування за умови зміни вхідних параметрів; визначення робочих точок на витратно-напірних характеристиках трубопровідної системи та насосного обладнання; проведення аналізу стійкості гідросистеми; встановлення оптимальних режимів експлуатації гідротранспортної установки.

Розглянемо основні засади методології синтезу нейронних мереж і застосування нейромережевого підходу до задач моделювання гідротранспортних процесів.

Штучна нейронна сітка є обчислювальною структурою, що імітує функціонування біологічних нейронних систем, зокрема процеси обробки інформації, подібні до тих, що відбуваються в нервових клітинах [5, 15, 21]. Базовим елементом такої мережі виступає формальний (або штучний) нейрон, який можна розглядати як логічний елемент порогового типу з кількома входами та одним виходом (див. рис. 3.1).

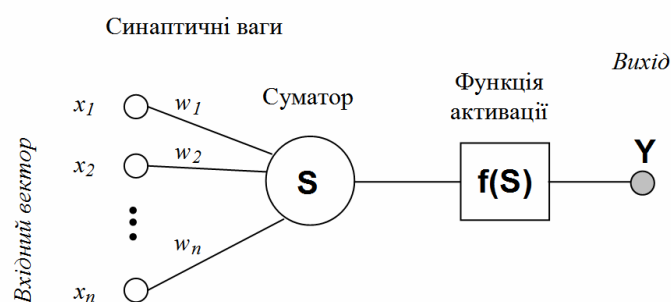


Рисунок 3.1 – Структура формального нейрона

Конструкція нейрона передбачає наявність трьох основних компонентів:

- синапсів (помножувачів), які зважують вхідні сигнали;
- суматора, що виконує підсумовування цих зважених сигналів;
- нелінійного перетворювача, який визначає вихідне значення відповідно до певної активаційної функції [5, 15, 21].

Формальний нейрон є базовим функціональним елементом ШНС. Його структура відображає спрощену модель біологічного нейрона та складається з трьох основних компонентів:

1. Синапси (вхідні з'єднання) — кожен вхідний сигнал x_i нейрона множиться на відповідну вагу w_i , яка визначає значущість цього сигналу.
2. Суматор — здійснює зважене підсумовування всіх вхідних сигналів:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b$$

де S - Результат підсумовування;

n – кількість входів нейрона;

w_i - значення синаптичної ваги i входу;

x_i - величина i -ї компоненти вхідного вектора \bar{X} ;

b - зсув (bias), що дозволяє зміщувати активаційну функцію.

3. Активаційна функція (нелінійний перетворювач) — обробляє результат суматора для прийняття рішення про активацію нейрона. Найпоширенішими функціями є сигмоїда, гіперболічний тангенс тощо.

Результатом обчислення є вихід нейрона $y = f(S)$, який передається далі по мережі, де f - функція активації нейрона.

У процесах моделювання гідротранспорту активаційні функції відіграють важливу роль, дозволяючи нейромережам ефективно обробляти нелінійні залежності між вхідними параметрами та характеристиками системи.

При розв'язанні задач ідентифікації режимів технологічного процесу гідротранспорту використовувалися наступні функції активації, кожна з яких має свої особливості та переваги залежно від характеру даних:

1) звичайна лінійна функція:

$$y = kS,$$

де k - деякий постійний коефіцієнт;

2) сигмоїд (рис. 3.2), вона є однією з найпоширеніших при практичному використанні

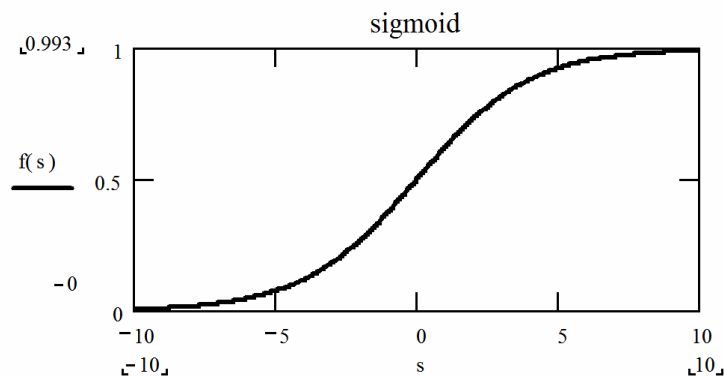


Рисунок 3.2 – Сигмоїдальна функція

Математично вираз для сигмоїда виглядає так:

$$f(S) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha S}},$$

де α - деяке речове число.

3) також була використана функція активації - гіперболічний тангенс, яка має форму, подібну до логістичної функції, проте набуває як позитивних, так і негативних значень (рис. 3.3):

$$y = \tanh(S) = \frac{1 - e^{-2S}}{1 + e^{-2S}}.$$

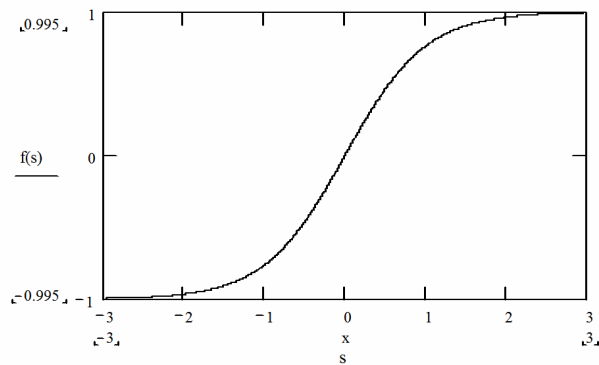


Рисунок 3.3 – Функція активації – гіперболічний тангенс

На сьогодні найбільшим застосуванням є використання багатошарових нейронних сіток з прямим розповсюдження сигналу (feedforward networks) без зворотних зв'язків, які виявилися особливо ефективними в умовах практичного використання [5, 15, 21]. Такі мережі мають топологію спрямованого графа з одностороннім передаванням сигналу від входу до виходу, що забезпечує стабільність їхньої поведінки.

У межах даного дослідження для розв'язання задач ідентифікації режимів технологічного процесу гідротранспорту буде застосовано саме таку архітектуру нейронної мережі.

Тришарова нейронна сітка з прямим поширенням помилки складається з таких рівнів::

1. Вхідний шар: містить нейрони, кількість яких відповідає числу вхідних параметрів моделі. Вони лише передають значення на наступний шар, не виконуючи обчислень.

2. Прихований шар: складається з одного шару нейронів, які виконують зважене підсумовування вхідних сигналів, додають зміщення (bias) та передають результат через активаційну функцію. Саме на цьому рівні відбувається виявлення внутрішніх закономірностей та нелінійних залежностей між вхідними даними.

3. Вихідний шар призначений для формування кінцевих результатів обчислень, тобто виходу моделі. Число нейронів в цьому шарі відповідає кількості цільових параметрів, які потрібно передбачити або ідентифікувати.

Усі шари зв'язані між собою послідовно, сигнали передаються строго в одному напрямку — від входу до виходу, без зворотних зв'язків. Така архітектура забезпечує стійку, передбачувану поведінку мережі, що є особливо важливою при моделюванні технологічних процесів, зокрема — гідротранспорту багатофазного середовища.

Найчастіше прихований шар використовує нелінійну активаційну функцію, тоді як вихідний шар — лінійну або сигмоїдальну, залежно від задачі.

У структурі багатошарової нейромережі без зворотних зв'язків нейрони впорядковані за шарами (див. рис. 3.4), де кожен шар повністю з'єднаний із наступним. На зображенні представлено модель мережі, що призначена для побудови математичного опису руху багатофазного середовища у напірному трубопроводі.

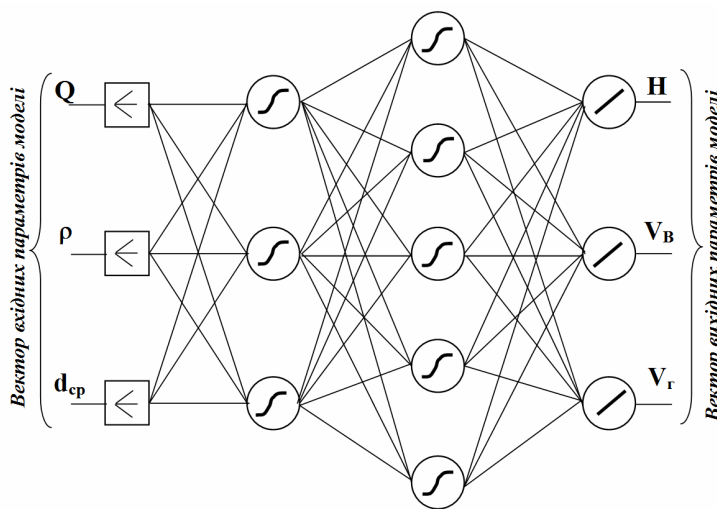


Рисунок 3.4 – Структура тришарової нейронної сітки прямого поширення

У запропонованій нейромережевій моделі вхідними параметрами виступають: витрата гідросуміші, її щільність, середній діаметр твердих включень.

Вихідними параметрами моделі є: повні втрати напору вздовж довжини трубопроводу, критична швидкість руху пульпи на вертикальних та горизонтальних ділянках трубопроводу.

Вхідні дані подаються до так званого шару розподілу сигналів, функція якого полягає виключно в перенаправленні вхідних значень — обчислення на цьому етапі не здійснюються.

Усі інші елементи мережі — це формальні нейрони одного типу відмінності між якими зумовлені вибором активаційної функції. Зокрема: нейрони вхідного та прихованого шару використовують сигмоїдальну функцію активації, що забезпечує нелінійне перетворення сигналів; нейрони вихідного шару реалізують лінійну функцію активації, яка дозволяє отримати безпосередні числові значення результатів моделі.

Кожен компонент вхідного вектора з'єднується з усіма нейронами першого (прихованого) шару через індивідуальні синаптичні вагові коефіцієнти. Після обчислень у нейронах першого шару отримані сигнали передаються на входи нейронів наступного шару, забезпечуючи багатоступеневу обробку інформації.

Проектування структури нейронної мережі повинно здійснюватися з урахуванням характеру та складності конкретного завдання. При цьому важливо враховувати наступні положення: зі збільшенням кількості шарів, нейронів у них та щільності міжнейронних зв'язків зростає обчислювальна потужність і здатність мережі до апроксимації складних функціональних залежностей. Проте така ускладнена архітектура потребує значно більше часу на навчання, що може бути критичним фактором у практичних застосуваннях; запровадження зворотних зв'язків у мережу (як у рекурентних нейронних мережах) істотно розширює спектр задач, які вона здатна вирішувати, зокрема пов'язаних із динамічними або часовими процесами. Однак така модифікація вимагає ретельного аналізу та обґрунтування стійкості функціонування мережі, оскільки можливе виникнення нестійких режимів обчислень.

3.3. Процес навчання нейросіткових моделей на основі методу зворотного розповсюдження помилки

Для того щоб нейронна мережа могла ефективно розв'язувати задачі певного класу, необхідно правильно визначити її архітектуру, яка включає: кількість шарів, кількість нейронів у кожному з них, топологію з'єднань між нейронами.

Адекватність роботи нейромережі, тобто її здатність відображати задану залежність між вхідними та вихідними параметрами, визначається значеннями синаптичних ваг (вагових коефіцієнтів), що діють на входах нейронів.

У загальному випадку мета навчання полягає в тому, щоб забезпечити реалізацію функціонального відображення (3.2) з допустимою похибкою, яка не перевищує заданого рівня. Це досягається шляхом адаптації вагових коефіцієнтів відповідно до обраного алгоритму навчання.

Типова послідовність кроків навчання нейронної мережі включає:

1. Визначення вхідних параметрів, які характеризують об'єкт або процес і формують компоненти вхідного вектора мережі.
2. Вибір цільових (вихідних) параметрів, що відображають бажаний результат моделювання й становлять вихідний вектор сигналів.
3. Проектування топології сітки, враховуючи кількість шарів, число нейронів у кожному шарі, а також їх характер з'єднань між шарами.
4. Вибір функції помилки (функціоналу втрат) та критерію якості навчання, що дозволяють оцінити ефективність моделі.
5. Вибір алгоритму навчання, відповідно до якого відбувається оновлення синаптичних ваг задля мінімізації похибки.

У процесі розв'язання задач ідентифікації характеристик напірного трубопроводу було використано метод навчання з учителем, реалізований через алгоритм зворотного поширення помилки (*backpropagation*) [10, 21].

Існуючі аналітичні моделі трубопроводів не отримали широкого впровадження у промисловості через їх обмежену універсальність і високу

складність реалізації. Натомість застосування ШНС з метою моделювання трубопровідних систем демонструє низку істотних переваг порівняно з традиційними методами.

Основні переваги нейронних мереж у цій сфері включають:

- простоту реалізації з використанням сучасних обчислювальних засобів, зокрема пакетів машинного навчання та гнучких програмних середовищ.
- можливість самонавчання на основі наявних експериментальних або експлуатаційних даних про трубопровідну систему без потреби в жорстко заданій математичній моделі.
- стійку роботу з неповними та зашумленими даними, що особливо актуально в умовах промислової експлуатації.
- універсальність — одна і та сама навчена мережа може виконувати функції ідентифікації, прогнозування та автоматичного управління.
- адаптивність до зміни зовнішніх умов, технологічних режимів або параметрів системи.
- надійність та відмовостійкість, що підвищує безпеку та ефективність експлуатації трубопровідних трас.

Для виконання комп'ютерного моделювання було розглянуто чотири різних нейросіткових моделі:

- а) 1 вхід – 1 вихід;
- б) 2 входи – 1 вихід;
- в) 2 входи – 3 виходи;
- д) 3 входи – 3 виходи.

При моделюванні таких моделей було взято архітектури з кількістю нейронів у прихованому шарі від 5 до 20.

Якість функціонування навченої згідно з алгоритмом навчання з учителем штучної нейронної сітки можна перевірена шляхом тестування [15].

Тестування мережі може проводитись у міру процесу навчання. З результатів моделювання було зроблено такі висновки. Нейронні мережі архітектури a і b при кількості нейронів у прихованому шарі від 3 до 5 вимагають розмір навчальної вибірки не менше 100-150 прикладів. Для моделей типу v , d необхідний мінімальний обсяг становить відповідно 150-300 прикладів.

За дотримання наведених умов навчання мережі є стабільним і гарантується невелика (не більше 9%) розбіжність між значеннями середньоквадратичної помилки навчання та тестування.

Заміна сигмоїдальної функції активації іншими типами активаційних функцій у процесі побудови статичних моделей функціонування трубопроводу не призводить до істотного покращення результатів навчання нейронної мережі.

Зокрема, при використанні гіперболічного тангенсу як функції активації для всіх нейронів мережі, отримані значення середньоквадратичної помилки (СКП) на етапах навчання та тестування виявилися порівнянними з результатами, що були досягнуті при застосуванні сигмоїдальної функції.

Таким чином, ефект заміни функції активації в цьому контексті є несуттєвим і не забезпечує переваг у якості моделі або швидкості збіжності навчання. Прикладна програма та програмні модулі для моделювання моделей напірного трубопроводу на основі ШНС наведена в Додатку Б.

Висновки до розділу

1. Обґрунтовано використання ШНС, які можуть дозволити реалізувати адаптивну модель гідротранспортної системи, яка здатна з високою точністю відображати реальні умови функціонування і може бути інтегрована до системи підтримки прийняття рішень. Це відкриває можливості для ефективного

планування, діагностики, аналізу стійкості та оптимізації режимів гідротранспорту.

2. У якості методу навчання штучних нейронних сіток запропоновано використання алгоритма зворотнього розповсюдження помилки, який є ефективним інструментом для оптимізації вагових коефіцієнтів у багатошарових мережах. Для розв'язання конкретних прикладних задач ідентифікації було досліджено кілька типів нейромережевих моделей з різною структурною організацією.

3. На основі результатів комп'ютерного моделювання сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальної архітектури нейронної сітки (кількість шарів, число нейронів, функції активації) та налаштування параметрів навчання, таких як швидкість навчання, розмір навчальної вибірки, критерії зупинки тощо. Запропоновані підходи дозволяють підвищити якість моделювання та скоротити час навчання без втрати точності.

4. Застосування інтелектуальних методів на основі штучних нейронних сіток для розв'язання задач ідентифікації режимів роботи напірних трубопроводів має низку суттєвих переваг. Однією з ключових є можливість практичного впровадження універсальних нейромережевих алгоритмів моделювання, що забезпечують побудову адекватної математичної моделі трубопроводу на основі оперативних експериментальних даних, отриманих безпосередньо в умовах функціонування гірничих підприємств.

5. Навчені нейромережеві моделі, що описують рух гідросумішей у напірних трубопровідних системах, можуть бути ефективно використані в режимі реального часу для задач ідентифікації та діагностики поточних режимів функціонування гідротранспортної системи, що значно підвищує рівень автоматизації та адаптивності процесу управління.

4. СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИРОВИНИ

4.1. Основні функції оперативно-диспетчерського керування стаціонарною гідротранспортною системою

Оперативне диспетчерське керування стаціонарною гідротранспортною системою є важливою складовою загального процесу управління технологічним обладнанням. Воно спрямоване на забезпечення безперервної, безпечної та ефективної роботи системи транспортування пульпи або інших матеріалів за допомогою водного середовища.

Гідравлічний трубопровідний транспорт належить до безперервних систем транспортування, що знайшли широке застосування у гірничодобувній промисловості. Аналіз досвіду промислової експлуатації різних видів транспорту, призначених для переміщення корисних копалин, свідчить про високу ефективність безперервних транспортних систем під час ведення відкритих гірничих робіт. Такі системи є доцільними для виконання комплексу технологічних операцій, пов'язаних із транспортуванням, первинною переробкою та складуванням корисних копалин, продуктів збагачення та виробничих відходів [3, 6, 7].

До основних експлуатаційних витрат гідравлічних транспортних систем відносяться, передусім, витрати електроенергії та зношування механічних елементів, зокрема трубопроводів і насосного обладнання. Як зазначено у джерелах [6, 7], економічна ефективність гідравлічного транспорту досягається лише за умови роботи системи в оптимальному режимі, що забезпечує найвищі техніко-економічні показники. У випадках, коли режим транспортування істотно відхиляється від розрахункового, а також за недотримання експлуатаційної надійності, витрати на утримання та обслуговування гідротранспортної системи суттєво зростають [9, 12-14]. У практичних умовах промислової експлуатації такі системи переважно

працюють у неоптимальних режимах, що зумовлено недостатнім рівнем автоматизації процесу та браком ефективних засобів контролю технологічних параметрів [6].

У загальному випадку гідротранспортна система гірничо-збагачувального підприємства є стаціонарною технологічною установкою, яка функціонально пов'язана з рядом суміжних операцій технологічного циклу. Внаслідок цього на систему гідравлічного транспортування накладаються суттєві обмеження, пов'язані з необхідністю забезпечення безперервності та узгодженості її роботи з іншими етапами виробництва.

З огляду на це, гідротранспортна система розглядається як складний динамічний об'єкт управління, для якого основним критерієм ефективності є забезпечення заданої продуктивності з транспортування твердого матеріалу за умов мінімізації енергоспоживання та зменшення зносу основних елементів обладнання. Водночас, цілком очевидно, що зазначені вимоги можуть конфліктувати між собою, оскільки підвищення продуктивності зазвичай супроводжується зростанням енергетичних витрат і прискоренням зносу механічних компонентів системи. Таким чином, необхідно забезпечити компромісне керування, яке дозволить досягти оптимального балансу між технічними обмеженнями та економічною доцільністю.

Режими експлуатації гідротранспортної системи визначаються як параметрами гідросуміші, що транспортується, так і технічними характеристиками обраного обладнання. Процес підбору необхідного устаткування є складовою стадією проектування, що має вирішальне значення для подальшої ефективності функціонування всієї системи.

Досягнення високих техніко-економічних показників гідравлічного транспортування безпосередньо залежить від коректного формування вимог до характеристик гідротранспортної установки, точності вихідних даних, що використовуються для гідравлічного розрахунку, а також від застосування обґрунтованих і раціональних методик розрахунку. Сукупність цих чинників

формує основу для надійної та економічно ефективної експлуатації гідротранспортних комунікацій.

Забезпечення оптимального функціонування стаціонарних гідравлічних установок потребує прийняття обґрунтованих інженерних рішень на всіх етапах життєвого циклу системи — від проектування до експлуатації й реконструкції. На етапах проектування та модернізації основними завданнями є [12-14, 19, 23]:

- гідравлічний розрахунок параметрів руху багатофазної суміші в трубопровідних системах;
- визначення оптимальних геометричних та гідравлічних параметрів пульпопроводів;
- підбір відповідного насосного обладнання та допоміжних технологічних засобів;
- моделювання узгодженої роботи насосних агрегатів і пульпопроводів у типових режимах експлуатації (номінальному, мінімальному та максимальному);
- розробка рекомендацій щодо вдосконалення гідротранспортних процесів, зокрема оптимізації експлуатаційних режимів і підвищення їх надійності.

Кінцевою метою є досягнення максимальної ефективності системи за умов забезпечення заданої продуктивності та технічної надійності з урахуванням експлуатаційних обмежень.

На етапі експлуатації гідротранспортної системи необхідно вирішувати низку прикладних інженерних завдань, спрямованих на забезпечення стабільної, ефективною та економічно доцільної роботи системи. До основних таких завдань належать [3, 7, 23, 24]:

- моделювання режимів функціонування об'єктів гідротранспорту в умовах реального промислового середовища;

- розрахунок технічних характеристик та моделювання роботи технологічного обладнання за змінених умов експлуатації (зокрема, після капітального ремонту або заміни зношених елементів на нові);
- аналіз стійкості функціональних режимів гідравлічної системи;
- оптимізація режимів роботи насосного (напірного) обладнання відповідно до змін навантаження та технологічних вимог.

У цьому розділі розглядаються питання розробки системи підтримки прийняття рішень (СППР) для керування процесами гідротранспортування. У якості математичного апарату для побудови такої системи запропоновано використання сучасних інтелектуальних методів, а також локальних засобів контролю та автоматизації.

Управління основним технологічним процесом транспортування пульпи у стаціонарних гідротранспортних установках реалізується через систему оперативного диспетчерського керування. Для ілюстрації практичного впровадження такого підходу розглянемо типову схему диспетчерського керування кар'єрною гідротранспортною системою, показану на рис. 4.1 [7, 14].

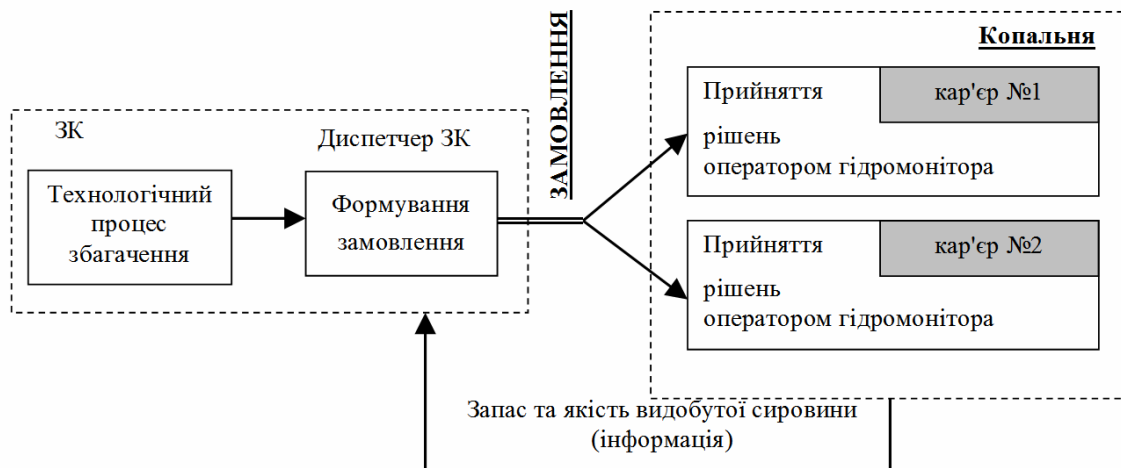


Рисунок 4.1 – Схема типового диспетчерського керування стаціонарною гідротранспортною системою:

ЗК – збагачувальний комплекс

Як було зазначено раніше, головною вимогою до стаціонарної гідротранспортної системи є забезпечення стабільної продуктивності за твердою фазою. У такому випадку ефективність роботи системи гідротранспортування безпосередньо визначається технологічними параметрами процесу збагачення.

Диспетчер, що працює на підприємстві з переробки корисних копалин, на основі оперативних даних щодо перебігу збагачувального процесу приймає рішення про формування замовлення на необхідний обсяг твердої сировини для забезпечення безперервної роботи технологічного обладнання. Сформоване замовлення передається оператору гідромонітора для подальшої реалізації [14].

Специфіка гідротранспортної системи як об'єкта автоматизації визначає особливості побудови системи управління. Основними керувальними параметрами трубопровідної лінії є густина та витрата гідросуміші. Зміна цих параметрів дозволяє здійснювати вплив на роботу системи, однак таке регулювання супроводжується низкою технологічних обмежень.

Зокрема, зміна витрати гідросуміші для досягнення заданої продуктивності за твердою фазою може призвести до переходу системи у критичні режими. Якщо швидкість потоку знижується нижче критичної, у трубопроводі починає осідати тверда фаза, формуючи шар осаду, що спричиняє зменшення ефективного діаметра трубопроводу. Це, у свою чергу, викликає збільшення швидкості потоку, яка при досягненні певного порогу може спричинити різке руйнування осаду. Цей цикл повторюється, що призводить до періодичних коливань густини гідросуміші на виході системи та дестабілізації збагачувального процесу, що, зрештою, негативно позначається на ефективності вилучення корисних компонентів [7, 14].

З іншого боку, перевищення критичної швидкості транспортування більш ніж на 30% значно підвищує питомі енергетичні витрати, що знижує загальну енергоефективність системи [7, 14].

З метою забезпечення необхідної продуктивності за твердою фазою доцільно реалізовувати керувальний вплив шляхом регулювання густини гідросуміші на вході в трубопровідну систему. Проте специфіка технологічного процесу видобутку корисних копалин, а також відсутність надійного і високопродуктивного автоматизованого обладнання обумовлюють необхідність ручного виконання операцій пульпоприготування.

У виробничих умовах збагачувального комплексу транспортування видобутої рудної маси здійснюється самоскидами з наступним розміщенням матеріалу у накопичувальних конусах. Подальше формування гідросуміші відбувається внаслідок розмиву сировини за допомогою гідромоніторів. Отримана гідросуміш стікає в зумпф, звідки подається до всмоктувального патрубку відцентрового насоса [7, 14].

Кожен зумпф обладнаний двома гідромоніторами, які перебувають під керуванням оператора. Також до зумпфа підведено дві лінії подачі технічної води — вертикальна та під нахилом, подача з яких регулюється вручну за допомогою засувки. Від оператора вимагається підтримання стабільного рівня пульпи в зумпфі, оскільки його переповнення може спричинити підтоплення прилеглої території та ерозію основи накопичувального конуса. З іншого боку, надмірне зниження рівня загрожує виникненням повітряних пробок у всмоктувальній частині насоса, що призводить до дестабілізації гідротранспорту.

Для запобігання потраплянню негабаритних частинок до системи трубопроводів, на поверхні зумпфа перед вхідним патрубком насоса встановлено ґрати. У стандартному робочому режимі один із гідромоніторів використовується для основного розмиву сировини у накопичувальному конусі, тоді як другий виконує допоміжну функцію — очищення захисної решітки від налипань глинистих фракцій та поступовий розмив крупних шматків, що накопичуються на її поверхні [7, 14].

З метою визначення технологічних параметрів гідротранспортної системи, як правило, застосовують таку контрольно-вимірвальну апаратуру: сенсор струму на обмотці електродвигуна; манометр, який реєструє тиск при всмоктуванні відцентрового насоса; манометр, який реєструє величину тиску в нагнітальному трубопроводі; витратомір; густомір.

Робоче місце оператора гідромонітора повинно мати у своєму складі спеціальний інформаційний пульт, який в режимі реального часу буде показувати таку інформацію:

- напругу електромережі;
- тиск при всмоктуванні відцентрового насоса;
- температуру гідросуміші ;
- струм на обмотці електродвигуна відцентрового насоса;
- тиск пульпи при нагнітанні відцентрового насоса;
- щільність пульпи;
- витрати пульпи;
- температуру води, яка надходить у зумпфі (зумпф - ємність або відстійник для збору води, відходів або інших матеріалів, особливо тих, що містять частинки або суспензії);
- температуру навколишнього середовища;
- тиск чистої води, яка надходить до зумпфа;
- витрату чистої води, яка надходить до зумпфа.

Також на пульті оператор буде бачити інформацію щодо величини витрати твердої фракції, значення якої визначається в реальному часі. Крім того, на екрані пульта можна побачити графіки зміни витрати твердої фракції залежно від щільності пульпи протягом останньої години. Диспетчер збагачувального комплексу визначає кількість твердого за період часу, який становить 60 хвилин.

Особа, що виконує керування режимом роботи гідротранспортної системи є оператором гідромонітора. В цьому процесі регульованою

процес прийняття рішень щодо керування пульпоприготуванням відбувається в умовах невизначеності та наявності нечіткої, неповної вхідної інформації, що змушує оператора спиратися на власний досвід та професійні знання, набуті в процесі роботи.

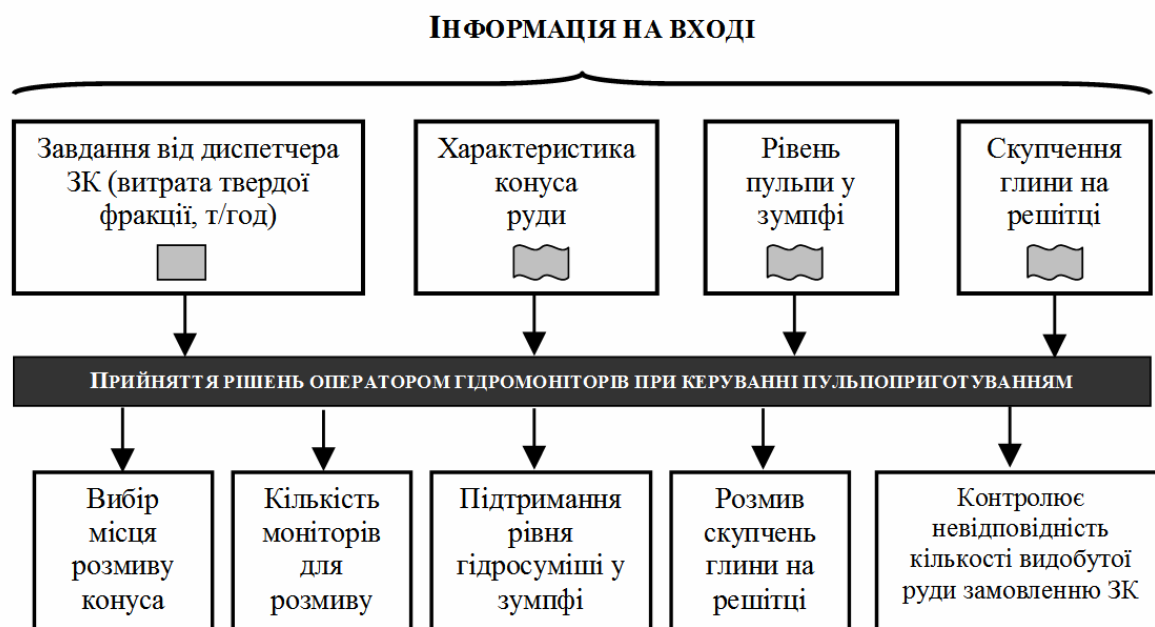


Рисунок 4.3 – Структура процесу прийняття рішень при керуванні гідромонітором

Практика експлуатації установок, оснащених гідромоніторами та системами пульпоприготування з ручним керуванням, свідчить про суттєву варіативність якості роботи операторів. Це зумовлює актуальність завдання щодо систематизації знань та аналізу накопиченого досвіду операторів з метою подальшого вдосконалення стратегій управління процесом пульпоприготування.

Рішення, які приймає оператор гідромонітора, характеризуються високим ступенем невизначеності та нечіткості. При цьому рекомендації,

переваги у виборі дій, а також накопичену інформацію оператор здатен передати у формі експертних знань, викладених засобами природної мови.

4.2. Розробка СППР

Розробка математичних моделей, програмного забезпечення та апаратних засобів для підтримки діяльності особи, що приймає рішення (ОПР), є необхідною умовою підвищення ефективності управління та скорочення часу ухвалення управлінських рішень у складних технічних системах і промислових комплексах [8, 18, 20, 21].

Основною метою функціонування СППР є забезпечення зручного та оперативного доступу до різноманітної інформації, необхідної для ухвалення ефективних рішень, а також формалізація, накопичення й тиражування знань у межах конкретної предметної області.

На сучасному етапі розвитку СППР пріоритетним напрямом є впровадження інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень. Як зазначено у [20, 21], найбільш перспективними вважаються гібридні інтелектуальні системи, які поєднують елементи нечіткої логіки та еволюційних методів математичного моделювання — зокрема, генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж.

У попередніх розділах даної роботи було розглянуто процес створення інтелектуальних моделей ключових об'єктів гідротранспортної системи, які можуть слугувати основою для розробки інтелектуальної СППР, побудованої на основі комплексного нейро-нечіткого підходу.

Як правило, життєвий цикл гідротранспортної системи охоплює три основні фази: проєктування, експлуатацію та реконструкцію.

Техніко-економічні показники експлуатації гідротранспортної системи значною мірою залежать від якості прийняття рішень на всіх етапах її

життєвого циклу. У зв'язку з цим в проєктовану СППР доцільно закласти методичні та програмні засоби, здатні забезпечити інформаційну підтримку процесу прийняття рішень на всіх стадіях — від проєктування до реконструкції. На рисунку 4.4 представлено використання основних компонентів СППР у розрізі різних фаз життєвого циклу системи.

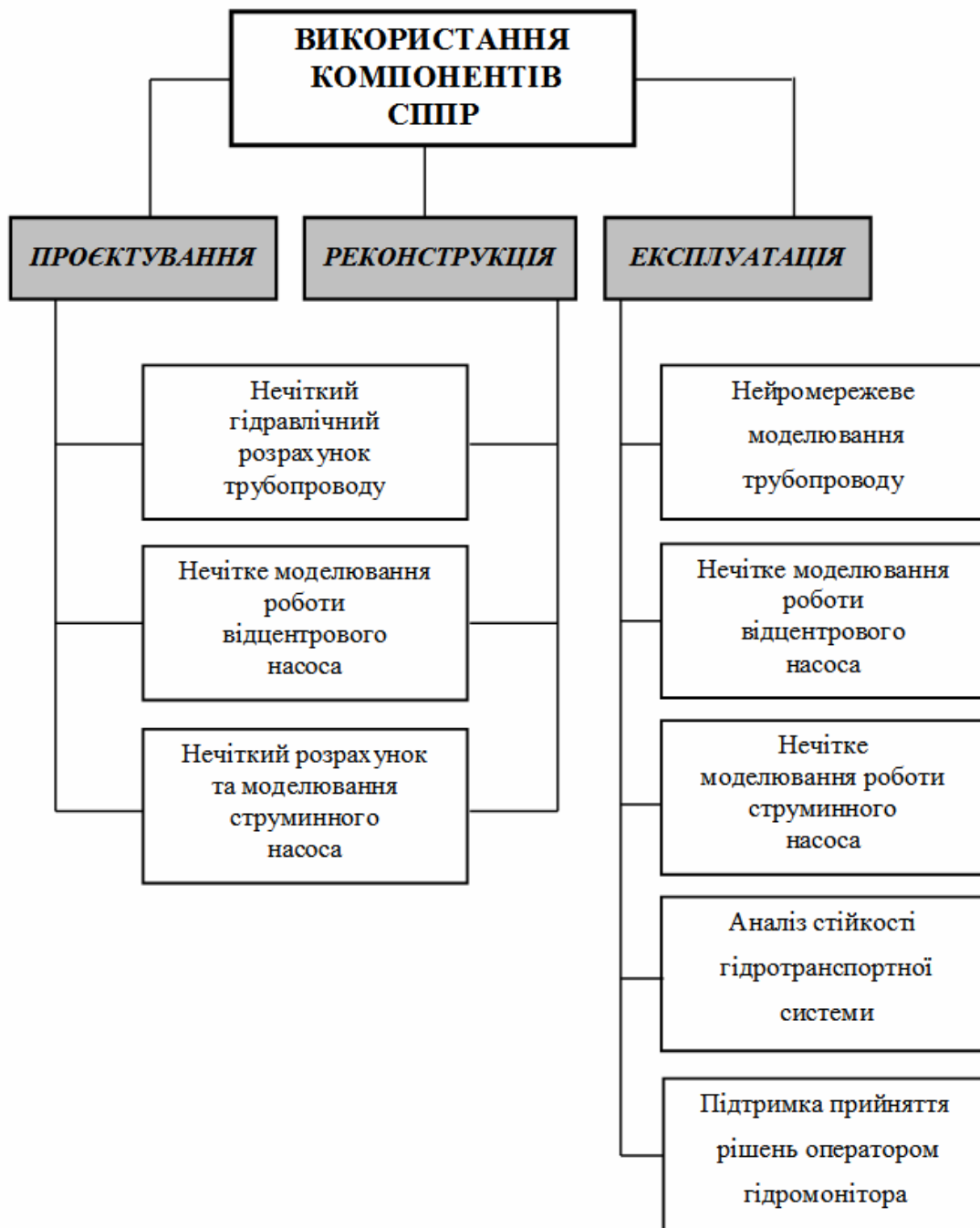


Рисунок 4.4 – Структурне використання компонентів СППР при керуванні транспортування сировини

Технологічна специфіка стаціонарних гідротранспортних систем, зокрема тісний взаємозв'язок між їх структурними елементами, зумовлює необхідність централізованого управління. Таке управління повинно включати не лише оперативне реагування, але й забезпечувати коротко- та довгострокове планування. Таким чином, проєктована СППР повинна містити моделі, орієнтовані на оперативне управління, а також на підтримку процесів стратегічного й тактичного планування [10, 19, 24].

Як видно з наведеної схеми компонентів, на всіх етапах розвитку гідротранспортної системи користувач СППР має можливість активно використовувати знання експертів, а також емпіричні та напівемпіричні дані для виконання розрахунків і моделювання. Завдяки цьому СППР виступає гнучким інструментом, що дозволяє користувачеві враховувати власну точку зору, застосовувати особистий досвід і накопичені знання інших фахівців.

Важливою функціональною особливістю СППР є здатність оцінювати вплив розбіжностей у поглядах експертів і нечіткості вхідних параметрів на кінцеві результати розрахунків.

Згідно з рекомендаціями, наведеними у [2, 7, 19], знання й досвід оператора для об'єктів такого класу найадекватніше можуть бути представлені у формі продукційних систем.

Для умов кар'єрного гідротранспорту, на основі експертних знань, накопичених операторами гідромоніторів, було сформовано базу правил. Вона містить кілька десятків продукцій типу «*Якщо..., то...*», що враховують основні вхідні дані, якими керується оператор при прийнятті рішень, та формують рекомендації щодо можливих варіантів керуючих впливів. Синтезована база знань забезпечує обробку всієї множини вхідної інформації та відповідних вихідних впливів, що були узагальнені на рис. 4.3.

У системі продукцій, що використовується для формування правил, застосовується обмежений словник термінів природної мови, який має бути чітко формалізований. Оскільки процес виведення знань здійснюється на

якісному рівні, єдиний вхідний параметр, представлений у числовій формі — завдання на продуктивність за твердою фракцією — доцільно перетворити у лінгвістичну форму.

Для реалізації цього перетворення зазвичай використовують математичний апарат теорії нечітких множин. Як функції належності до нечітких термів були застосовані трикутні функції, що дозволяють ефективно здійснювати нечітку класифікацію значень продуктивності.

Для переходу від числового значення параметра «завдання за твердою фракцією» до його лінгвістичного опису використовується система нечітких множин із трикутними функціями належності. Такий підхід дозволяє здійснити якісну інтерпретацію вхідних даних та використовувати їх у продукційних правилах СППР.

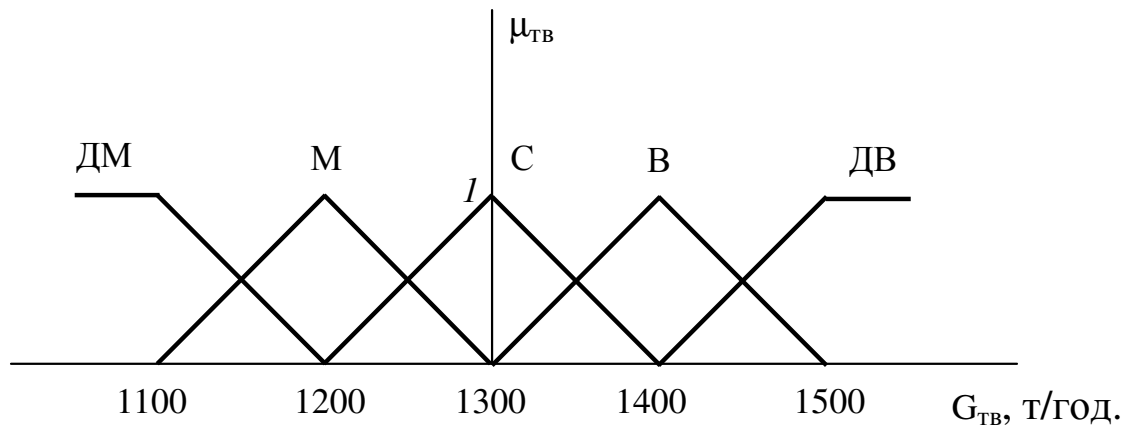
Для опису лінгвістичних змінних обрано п'ять термів: «дуже мале», «мале», «середнє», «велике» та «дуже велике». Такий підхід дозволяє здійснювати нечітке розбиття числового діапазону вхідної змінної та враховувати нечіткість у процесі прийняття рішень.

завдання за твердою фракцією = (ДМ, М, С, В, ДВ).

Інші вхідні параметри для прийняття рішень є результатом візуального сприйняття оператора та застосовуються ним у процесі прийняття рішень у якісному вигляді.

Кожен терм описується відповідною трикутною функцією належності, що задається трьома ключовими точками – лівим краєм, вершиною та правим краєм.

Функції мають перекриття, що дозволяє відображати невизначеність у значеннях та забезпечити гнучкість під час логічного виведення. Графічна інтерпретація функцій належності представлена на рис. 4.5.



**Рисунок 4.5 – Функції належності вхідного параметра
«завдання за твердою фракцією»**

Пропонується таке подання цих параметрів:

кількість сировини для розмиву = (дуже мала, мала, середня, велика, дуже велика);

характеристика густини конуса = (щільний, змішаний, пухкий);

вміст глини = (малий, середній, великий);

рівень пульпи в зумпфі = (дуже малий, малий, середній, великий, дуже великий);

скупчення глини та шматків на решітці = (мале, середнє, велике);

ступінь відкриття засувки = (мале, середнє, велике);

режим = («ПУСК», «ЗУПИНКА», нормальний).

З використанням можливих значень параметрів з урахуванням експертних знань будуються правила продукції (нечіткого висновку).

Наприклад,

Якщо Режим = («ПУСК»), **то**

гідромонітори відключені;

відкрити засувку №1 = (велике);

відкрити засувку №2 = (середнє);

прокачування води 20 хв. до сигналу зі збагачувальної фабрики.

Якщо режим = (нормальний), **то**

Якщо завдання по твердій фракції = (ДМ), **то**

розмив щільного підніжжя;

розмив конуса 1-м гідромонітором;

очищення грат 2-м гідромонітором;

відкрити засувку №1 = (велике);

відкрити засувку №2 = (ні);

Якщо кількість сировини = (В) або (ДВ), **то**

Повідомлення диспетчеру: «Велике скупчення сировини при малому замовленні».

Таким чином, СППР реалізує блок підтримки прийняття рішень оператором гідромоніторів на основі продукційних правил, що є необхідним для оперативного управління вхідними параметрами гідротранспортної системи. Програмна реалізація мовою С цього блоку наведена нижче.

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
```

```
void normal_mode(const char* zakaz, const char* conus_size, const char* conus_density,
const char* grid_clay) {
    printf("=== Нормальний режим ===\n");
```

```

if (strcmp(zakaz, "OM") == 0) {
    printf("Режим: OM\n");
    printf("edit2: щільне підніжжя\n");
    printf("edit3: відкрити повністю\n");
    printf("edit4: закрити\n");
    printf("memo1: Здійснювати розмив, забезпечити малу подачу в зумпф.\n");
    printf("memo2: Гідромонітор -> решітка\n");

    if (strcmp(conus_size, "велике") == 0 || strcmp(conus_size, "дуже велике") == 0) {
        printf("memo3: Великий запас сировини при малому замовленні\n");
    }

    if (strcmp(conus_density, "пухке") == 0) {
        printf("DopInfo: Низька щільність пульпи ускладнюється пухкістю конуса\n");
    }
}

// Інші режими (М, С, Б, ОБ) реалізуються аналогічно
}

int main() {
    char mode[20], zakaz[5], conus_size[20], conus_density[20], grid_clay[20];

    // Введення
    printf("Введіть режим (пуск, зупинка, нормальний): ");
    scanf("%s", mode);

    if (strcmp(mode, "нормальний") == 0) {
        printf("Введіть тип замовлення (OM, М, С, Б, ОБ): ");
        scanf("%s", zakaz);
        printf("Введіть розмір конуса (дуже мале, мале, середнє, велике, дуже велике): ");
        scanf("%s", conus_size);
        printf("Введіть щільність конуса (пухке, щільне): ");
        scanf("%s", conus_density);
        printf("Введіть інтенсивність очистки решітки (малое, среднее, большое): ");
        scanf("%s", grid_clay);

        normal_mode(zakaz, conus_size, conus_density, grid_clay);
    } else if (strcmp(mode, "пуск") == 0) {
        printf("Режим ПУСК: заповнення зумпфа, перекачка чистої води тощо.\n");
    } else if (strcmp(mode, "зупинка") == 0) {
        printf("Режим ЗУПИНКА: вимкнення гідромоніторів, очищення трубопроводів.\n");
    } else {

```

```

    printf("Невідомий режим.\n");
}

return 0;
}
#include <stdio.h>
#include <string.h>

void getRecommendations(float qtv, const char* zakaz, const char* conus_size, const char*
density, const char* grid_clay) {
    char edit2[256] = "", edit3[256] = "", edit4[256] = "";
    char memo1[512] = "", memo2[512] = "", memo3[512] = "", memo4[512] = "", memo5[1024]
= "";

    if (strcmp(zakaz, "ОМ") == 0) {
        strcpy(edit2, "щільне підніжжя");
        strcpy(edit3, "відкрити повністю");
        strcpy(edit4, "закрити");
        strcpy(memo1, "Здійснювати розмив, намагаючись забезпечити невелику кількість
сировини...");
        strcpy(memo2, "Гідромонітор спрямувати виключно на решітку");

        if (strcmp(conus_size, "велике") == 0 || strcmp(conus_size, "дуже велике") == 0) {
            strcpy(memo3, "Великий запас сировини при малому замовленні");
            strcpy(memo4, "Можливо призупинити зростання розміру накопичувального
конуса");
        }

        if (strcmp(density, "пухке") == 0) {
            strcat(memo5, "Підтримка низької щільності пульпи ускладнюється високою
пухкістю конуса. ");
        }

    } else if (strcmp(zakaz, "М") == 0) {
        strcpy(edit2, "щільність, пухке");
        strcpy(edit3, "відкрити наполовину");
        strcpy(edit4, "зачинити");
        strcpy(memo1, "Виробляти розмив...");
        strcpy(memo2, "Гідромонітор спрямувати виключно на решітку");

        if (strcmp(conus_size, "дуже велике") == 0) {
            strcpy(memo3, "Великий запас сировини при малому замовленні");
            strcpy(memo4, "Можливо призупинити зростання розміру конуса");
        }
    }
}

```

```

}

if (strcmp(density, "пухке") == 0) {
    strcat(memo5, "Підтримка низької щільності пульпи ускладнюється високою
пухкістю конуса. ");
}

} else if (strcmp(zakaz, "С") == 0) {
    strcpy(edit2, "пухка");
    strcpy(edit3, "відкрити наполовину");
    strcpy(edit4, "зачинити");
    strcpy(memo1, "Нормальний режим розмиву накопичувального конуса");
    strcpy(memo2, "Очистка решітки");

} else if (strcmp(zakaz, "Б") == 0) {
    strcpy(edit2, "пухка");
    strcpy(edit3, "відкрити наполовину");
    strcpy(edit4, "зачинити");
    strcpy(memo1, "Нормальний режим розмиву...");
    strcpy(memo2, "Очищення решітки...");

if (strcmp(conus_size, "дуже мале") == 0) {
    strcpy(memo3, "Малий запас сировини при великому замовленні");
    strcpy(memo4, "Рекомендується перемикання");
}

if (strcmp(density, "плотное") == 0) {
    strcat(memo5, "Можливі труднощі через велику щільність сировини. ");
}

} else if (strcmp(zakaz, "ОБ") == 0) {
    strcpy(edit2, "пухка");
    strcpy(edit3, "відкривати за необхідності");
    strcpy(edit4, "зачинити");
    strcpy(memo1, "Нормальний режим розмиву накопичувального конуса");
    strcpy(memo2, "Розмив з перемиканням на решітку");

if (strcmp(conus_size, "дуже мале") == 0) {
    strcpy(memo3, "Малий запас сировини при великому замовленні");
    strcpy(memo4, "Можливо необхідне перемикання");
}

if (strcmp(density, "плотное") == 0) {

```

```

        strcat(memo5, "Труднощі через щільну сировину.");
    }
}

if (strcmp(grid_clay, "малое") == 0)
    strcat(memo5, " Інтенсивність очистки решітки не велика.");
else if (strcmp(grid_clay, "среднее") == 0)
    strcat(memo5, " Інтенсивність очистки решітки середня.");
else if (strcmp(grid_clay, "большое") == 0)
    strcat(memo5, " Необхідна інтенсивна очистка решітки!");

// Вивід результатів
printf("edit2: %s\n", edit2);
printf("edit3: %s\n", edit3);
printf("edit4: %s\n", edit4);
printf("memo1: %s\n", memo1);
printf("memo2: %s\n", memo2);
printf("memo3: %s\n", memo3);
printf("memo4: %s\n", memo4);
printf("memo5: %s\n", memo5);
}
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

char zakaz[10];

void fuzzyfication(double qtv) {
    if (qtv < 10.0)
        strcpy(zakaz, "OM"); // дуже мале
    else if (qtv < 20.0)
        strcpy(zakaz, "M"); // мале
    else if (qtv < 30.0)
        strcpy(zakaz, "C"); // середнє
    else if (qtv < 40.0)
        strcpy(zakaz, "B"); // велике
    else
        strcpy(zakaz, "OB"); // дуже велике
}

void getRecommendations(double qtv, const char* combo1, const char* combo2, const char*
combo3) {
    char dopInf[512] = "";

```

```
fuzzyfication(qtv);
```

```
printf("\nРекомендації для замовлення [%s]:\n", zakaz);
```

```
if (strcmp(zakaz, "OM") == 0) {  
    printf("- Щільне підніжжя\n");  
    printf("- Відкрити повністю, закрити напівклапан\n");  
    printf("- Розмив з мінімальною сировиною в зумпф\n");  
    printf("- Спрямування на решітку\n");  
    if (strcmp(combo1, "велике") == 0 || strcmp(combo1, "дуже велике") == 0)  
        printf("- Великий запас сировини при малому замовленні\n");  
    if (strcmp(combo2, "пухке") == 0)  
        strcat(dopInf, "Підтримка низької щільності ускладнена пухкістю. ");  
} else if (strcmp(zakaz, "M") == 0) {  
    printf("- Пухке підніжжя\n");  
    printf("- Відкрити наполовину, зачинити клапан\n");  
    if (strcmp(combo1, "дуже велике") == 0)  
        printf("- Великий запас сировини при малому замовленні\n");  
    if (strcmp(combo2, "пухке") == 0)  
        strcat(dopInf, "Пухке середовище ускладнює стабільність. ");  
} else if (strcmp(zakaz, "C") == 0) {  
    printf("- Нормальний режим розмиву накопичувального конуса\n");  
    printf("- Очистка решітки\n");  
} else if (strcmp(zakaz, "B") == 0) {  
    printf("- Пухке середовище\n");  
    printf("- Можливо тимчасовий допоміжний розмив\n");  
    if (strcmp(combo1, "дуже мале") == 0)  
        printf("- Малий запас сировини при великому замовленні\n");  
    if (strcmp(combo2, "плотное") == 0)  
        strcat(dopInf, "Висока щільність сировини ускладнює виконання. ");  
} else if (strcmp(zakaz, "OB") == 0) {  
    printf("- Перемикання між конусом та решіткою\n");  
    if (strcmp(combo1, "дуже мале") == 0)  
        printf("- Малий запас сировини — можлива зміна черги гідротранспорту\n");  
    if (strcmp(combo2, "плотное") == 0)  
        strcat(dopInf, "Щільна сировина ускладнює процес. ");  
}
```

```
if (strcmp(combo3, "малое") == 0)  
    strcat(dopInf, "Інтенсивність очистки решітки не велика. ");  
else if (strcmp(combo3, "среднее") == 0)  
    strcat(dopInf, "Інтенсивність очистки решітки середня. ");  
else if (strcmp(combo3, "большое") == 0)
```

```

        strcat(dopInf, "Необхідна інтенсивна очистка решітки! ");

    printf("Додаткова інформація: %s\n", dopInf);
}

int main() {
    double qtv;
    char combo1[20], combo2[20], combo3[20];

    printf("Введіть значення Qtv (наприклад, 25.0): ");
    scanf("%lf", &qtv);

    printf("Введіть ComboBox1 (наприклад, велике): ");
    scanf("%s", combo1);

    printf("Введіть ComboBox2 (наприклад, пухке): ");
    scanf("%s", combo2);

    printf("Введіть ComboBox3 (малое/среднее/большое): ");
    scanf("%s", combo3);

    getRecommendations(qtv, combo1, combo2, combo3);

    return 0;
}
char zakaz[10];

void fuzzyfication(double qtv) {
    if (qtv < 10.0)
        strcpy(zakaz, "ОМ"); // дуже мале
    else if (qtv < 20.0)
        strcpy(zakaz, "М"); // мале
    else if (qtv < 30.0)
        strcpy(zakaz, "С"); // середнє
    else if (qtv < 40.0)
        strcpy(zakaz, "Б"); // велике
    else
        strcpy(zakaz, "ОБ"); // дуже велике
}

void handleStartStop(const char* mode) {
    if (strcmp(mode, "пуск") == 0) {
        printf("\nРежим: ПУСК\n");
    }
}

```

```

printf("- Немає розмиву\n");
printf("- Відчинений повністю\n");
printf("- Відчинений наполовину\n");
printf("- Вимкнутий\n");
printf("- Вимкнути\n");
printf("Додатково: Заповнити насос водою, зумпф чистою водою, увімкнути насос
для перекачування чистої води (приблизно 20 хв), контролювати рівень у зумпфі.\n");
} else if (strcmp(mode, "зупинка") == 0) {
printf("\nРежим: ЗУПИНКА\n");
printf("- Немає розмиву\n");
printf("- Відчинений повністю\n");
printf("- Відчинений наполовину\n");
printf("- Вимкнутий\n");
printf("- Вимкнути\n");
printf("Додатково: Вимкнути гідромонітори, заповнювати зумпф чистою водою,
перекачувати її у трубопроводі 20 хвилин.\n");
}
}

```

```

void getRecommendations(double qtv, const char* combo1, const char* combo2, const char*
combo3) {

```

```

char dopInf[512] = "";
fuzzyfication(qtv);

```

```

printf("\nРекомендації для замовлення [%s]:\n", zakaz);

```

```

if (strcmp(zakaz, "ОМ") == 0) {
printf("- Щільне підніжжя\n");
printf("- Відкрити повністю, закрити напівклапан\n");
printf("- Розмив з мінімальною сировиною в зумпф\n");
printf("- Спрямування на решітку\n");
if (strcmp(combo1, "велике") == 0 || strcmp(combo1, "дуже велике") == 0)
printf("- Великий запас сировини при малому замовленні\n");
if (strcmp(combo2, "пухке") == 0)
strcat(dopInf, "Підтримка низької щільності ускладнена пухкістю. ");
} else if (strcmp(zakaz, "М") == 0) {
printf("- Пухке підніжжя\n");
printf("- Відкрити наполовину, зачинити клапан\n");
if (strcmp(combo1, "дуже велике") == 0)
printf("- Великий запас сировини при малому замовленні\n");
if (strcmp(combo2, "пухке") == 0)
strcat(dopInf, "Пухке середовище ускладнює стабільність. ");
} else if (strcmp(zakaz, "С") == 0) {

```

```

printf("- Нормальний режим розмиву накопичувального конуса\n");
printf("- Очистка решітки\n");
} else if (strcmp(zakaz, "Б") == 0) {
printf("- Пухке середовище\n");
printf("- Можливо тимчасовий допоміжний розмив\n");
if (strcmp(combo1, "дуже мале") == 0)
printf("- Малий запас сировини при великому замовленні\n");
if (strcmp(combo2, "плотное") == 0)
strcat(dopInf, "Висока щільність сировини ускладнює виконання. ");
} else if (strcmp(zakaz, "ОБ") == 0) {
printf("- Перемикання між конусом та решіткою\n");
if (strcmp(combo1, "дуже мале") == 0)
printf("- Малий запас сировини — можлива зміна черги гідротранспорту\n");
if (strcmp(combo2, "плотное") == 0)
strcat(dopInf, "Щільна сировина ускладнює процес. ");
}

if (strcmp(combo3, "малое") == 0)
strcat(dopInf, "Інтенсивність очистки решітки не велика. ");
else if (strcmp(combo3, "среднее") == 0)
strcat(dopInf, "Інтенсивність очистки решітки середня. ");
else if (strcmp(combo3, "большое") == 0)
strcat(dopInf, "Необхідна інтенсивна очистка решітки! ");

printf("Додаткова інформація: %s\n", dopInf);
}

```

```

int main() {
double qtv;
char combo1[20], combo2[20], combo3[20];
char mode[20];

printf("Введіть режим (пуск/зупинка/нормальний): ");
scanf("%s", mode);

if (strcmp(mode, "нормальний") == 0) {
printf("Введіть значення Qtv (наприклад, 25.0): ");
scanf("%lf", &qtv);

printf("Введіть ComboBox1 (наприклад, велике): ");
scanf("%s", combo1);

printf("Введіть ComboBox2 (наприклад, пухке): ");

```

```

scanf("%s", combo2);

printf("Введіть ComboBox3 (малое/среднее/большое): ");
scanf("%s", combo3);

getRecommendations(qtv, combo1, combo2, combo3);
} else {
    handleStartStop(mode);
}

return 0;
}

```

На етапі експлуатації гідротранспортної системи диспетчер спільно з іншими фахівцями комбінату виконує завдання коротко- та довгострокового планування режимів роботи як гідротранспорту, так і збагачувальної фабрики. Для обґрунтування доцільності вибору конкретних режимів роботи можуть застосовуватись різноманітні інструменти, що реалізовані у складі запропонованої СППР.

Серед таких інструментів: нечіткі моделі, що дозволяють урахувувати неточні або якісні вхідні дані; нейромережеві моделі, призначені для виявлення прихованих закономірностей та прогнозування ефективності режимів; методика нечіткого гідравлічного розрахунку, яка враховує розмитість параметрів середовища; аналіз стійкості, що забезпечує перевірку режимів на можливість виникнення критичних ситуацій; діагностика режимів роботи гідротранспортної системи, яка дозволяє виявляти нештатні або неефективні стани системи.

Функціональна схема інтеграції зазначених компонентів СППР у процес експлуатації системи з метою планування та оперативного керування показана на рис. 4.6.

Подвійною прямокутною рамкою на функціональній схемі (рис. 4.6) виділено ті компоненти системи, що були розроблені в межах цієї роботи й становлять основу СППР.

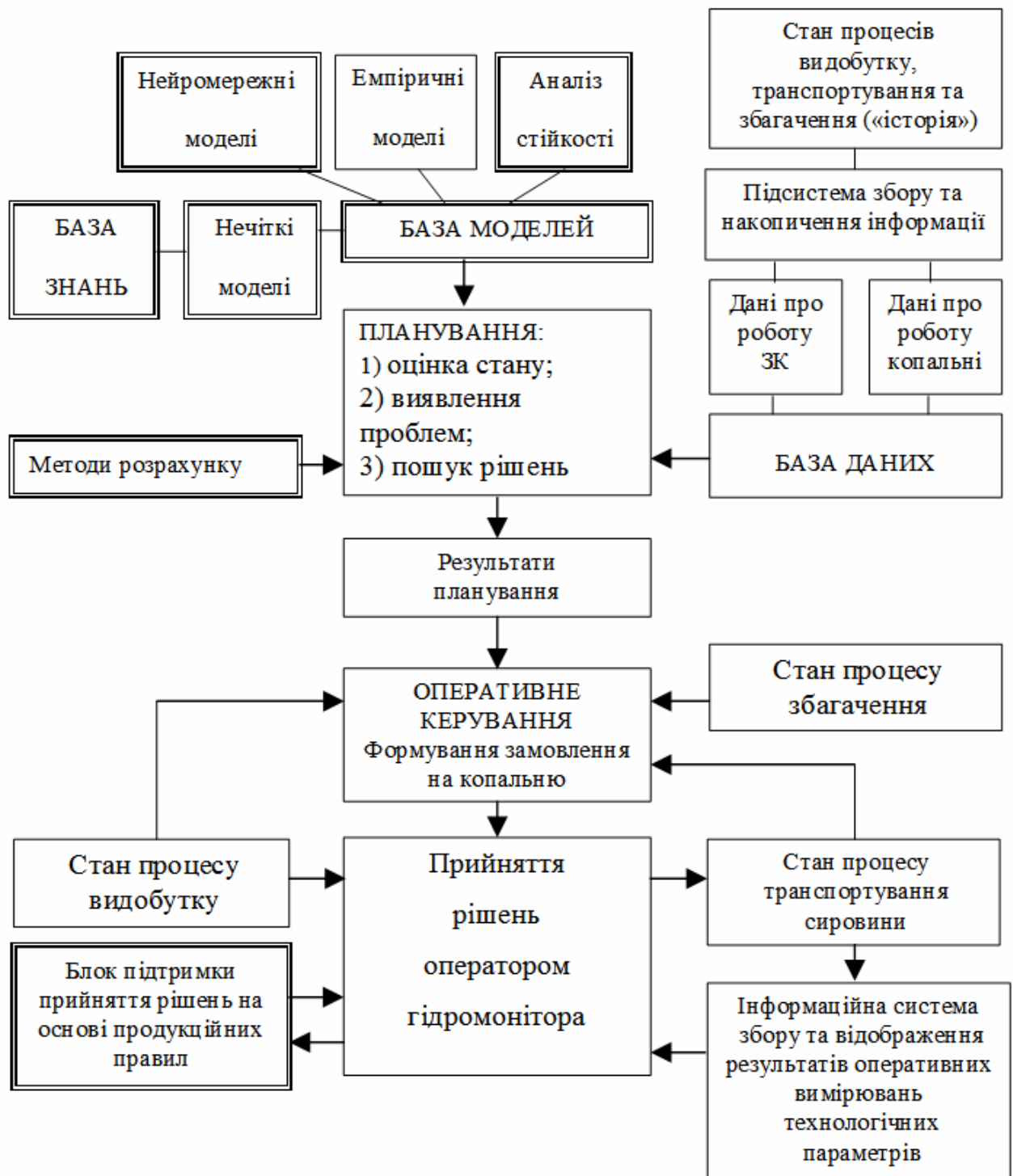


Рисунок 4.6 – Функціональна схема СППР на стадії експлуатації транспортування сировини

Процес придбання знань у СППР здійснюється за двома основними напрямками: використання експертних знань — при побудові нечітких моделей і виконанні нечіткого гідравлічного розрахунку; використання експериментальних даних — для навчання нейронних мереж і побудови прогнозних моделей.

Відповідно до класифікації СППР, наведеної в роботі [1, 8, 18, 20], розроблена система для управління гідротранспортом належить до:

- систем спеціального призначення, орієнтованих на конкретне виробниче завдання;
- систем, у яких користувач є ініціатором діалогу, а СППР виступає пасивною ланкою, що реагує на запити;
- систем, що мають можливості збору, накопичення та видачі інформації у зручній формі для оперативного та стратегічного прийняття рішень.

Компоненти СППР реалізовано у вигляді окремих програмних модулів, між якими інформаційний обмін відбувається переважно за допомогою читання і запису даних у файли.

Такий підхід до архітектури системи є доцільним з огляду на підвищення гнучкості, масштабованості та надійності. Поділ логіки між модулями дозволяє легко модифікувати наявні компоненти або додавати нові, що підтверджено також у працях [1, 8, 18, 20].

Висновки до розділу

1. Запропоновано вдосконалений підхід до аналізу стійкості режимів роботи гідротранспортної системи, що базується на комплексному використанні нечітких моделей та нейромережових технологій. Такий підхід дозволяє поєднати експертні знання з даними експериментальних вимірювань,

що, у свою чергу, забезпечує підвищену адаптивність, стійкість до невизначеностей та здатність до узагальнення в умовах неповної або неточної інформації. Використання обох типів моделей дозволяє здійснювати як оперативну діагностику режимів, так і прогнозування можливих відхилень або аварійних ситуацій у системі, що істотно підвищує ефективність прийняття рішень на етапі експлуатації.

2. Синтезовано блок підтримки прийняття рішень для керування процесом пульпоприготування, основу якого становлять продукційні правила, сформовані на основі накопиченого досвіду операторів гідромоніторів. Такий підхід дозволяє формалізувати експертні знання у вигляді структурованої системи логічних умов та дій, що забезпечує швидке реагування на зміну технологічних параметрів та адаптацію режимів роботи до реальних виробничих умов.

3. У результаті дослідження обґрунтовано можливість побудови системи підтримки прийняття рішень (СППР) для управління гідротранспортом, основою якої є розроблені інтелектуальні моделі технологічних процесів та об'єктів гідротранспорту, а також створені відповідні програмні засоби. Запропоновано структуру інтелектуальної СППР для керування стаціонарною гідротранспортною системою гідросуміші, що забезпечує ефективне планування та оперативне управління режимами роботи.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне завдання, що полягає у застосуванні математичного та програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для керування процесами гідротранспортування, що дозволяє зменшити витрати на електроенергію. Суть розв'язання цього завдання полягає у побудові математичних моделей відцентрового та струминного насосів із використанням експертної та емпіричної інформації, формалізованої за допомогою апарату теорії нечітких множин, а також у синтезі моделей руху полідисперсного середовища в напірному трубопроводі на основі штучних нейронних мереж. Реалізація запропонованого підходу дала змогу підвищити ефективність оперативного диспетчерського управління процесами гідротранспортування, знизити ризик прийняття помилкових рішень на етапах експлуатації, проектування та модернізації обладнання гідротранспортних систем, а також створити передумови для впровадження сучасних автоматизованих систем керування в даній галузі.

Загалом отримано такі результати:

1. Основні функції управління гідротранспортними системами покладено на диспетчерську службу, яка забезпечує координацію та контроль за технологічними процесами. Процес прийняття рішень як на етапі проектування, так і під час експлуатації систем гідравлічного транспорту відбувається в умовах неповної апріорної та експериментальної інформації, що ускладнює вибір оптимальних режимів функціонування та підвищує вимоги до професійної підготовки персоналу й до засобів автоматизації управління.

2. Запропоновано вдосконалений підхід до аналізу стійкості режимів роботи гідротранспортної системи, що базується на комплексному використанні нечітких моделей та нейромережевих технологій. Такий підхід дозволяє поєднати експертні знання з даними експериментальних вимірювань, що, у свою чергу, забезпечує підвищену адаптивність, стійкість до невизначеностей та здатність до узагальнення в умовах неповної або неточної інформації.

Використання обох типів моделей дозволяє здійснювати як оперативну діагностику режимів, так і прогнозування можливих відхилень або аварійних ситуацій у системі, що істотно підвищує ефективність прийняття рішень на етапі експлуатації.

3. Синтезовано блок підтримки прийняття рішень для оперативного управління процесом пульпоприготування на вході гідротранспортної системи, реалізований у вигляді набору продукційних логічних правил із залученням знань та досвіду операторів гідромонітора.

4. У результаті дослідження обґрунтовано можливість побудови системи підтримки прийняття рішень (СППР) для управління гідротранспортом, основою якої є розроблені інтелектуальні моделі технологічних процесів та об'єктів гідротранспорту, а також створені відповідні програмні засоби. Запропоновано структуру інтелектуальної СППР для керування стаціонарною гідротранспортною системою гідросуміші, що забезпечує ефективне планування та оперативне управління режимами роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. FUZZY-системи – новий технологічний інструмент управління / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, К.О. Липківський, В.В. Кирик // Техн. електродинаміка. – 2001. - №3. – С.17-20.
2. USING VIRTUAL LABORATORY MODELS FOR RESEARCH OF AUTOMATION ELECTRICAL DRIVE SYSTEMS OF HYDROTRANSPORT UNIT / Т. Korenkova et al. *Electromechanical and energy saving systems*. 2023. Vol. 60, no. 1. P. 8–25. URL: <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.1.60.1> (date of access: 22.04.2025).
3. Автоматизація процесів гірничих робіт: підручник /А.В. Бубліков, та ін. – Д.: НГУ, 2012. – 304с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/48404734.pdf> (дата звернення: 15.04.2025).
4. Анісімов А.В. Інформаційні системи і бази даних знань: навчальний посібник / Анісімов А.В., Кулябко П.П. – Київ. – 2017. – 110с.
5. Архангельський В. І. Нейроні мережі в системах автоматизації / В. І. Архангельський, І. Н., Богаєнко, Г. Г. Грабовський, Н. А. Рюмшин – К.: Техніка, 1999. – 364с.
6. Богомолів В. О. Математичне моделювання робочих процесів колісних і гусеничних транспортних засобів / В. Богомолів, Д. Леонтєв. – Харків : Вид-во Бровін О.В., 2025. – 170 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/24827> (дата звернення: 21.04.2025).
7. Власенко А.І., Карпінський В.Й. Системи автоматичного керування в гідротранспортних мережах : монографія / А.І. Власенко, В.Й. Карпінський. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2017. – 148с.

8. Воронін А.М. Інформаційні системи прийняття рішень: навч. посіб. / Воронін А.М., Зіатдінов Ю.К., Климова А.С. – К. : НАУ-друк, 2019. – 136с.
9. Гідравлічний транспорт - *Aggreagating the world open access research paper*. URL: <https://core.ac.uk/reader/162876710> (дата звернення: 18.04.2025).
10. Єгоров В. Є., Ільїн С. Г. Інтелектуальні системи керування насосними станціями / В.Є. Єгоров, С.Г. Ільїн // Вісник НТУ "ХПІ". – 2018. – № 45(1321). – С. 01–106.
11. Калюжний О.Я. Моделювання систем в середовищі MATLAB-Simulink: навч. посіб. –К.: ІВЦ «Вид-во «Політехніка», 2004. - 136 с
12. Лобода О., Мартиненко О. Моделювання процесів гідравлічного транспорту пульпи / О.І. Лобода, О.П. Мартиненко // Вісник Криворізького нац. ун-ту. – 2019. – Вип. 57. – С.85–90.
13. Мельник В.О., Кузьменко І.М. Автоматизація технологічних процесів у гідравлічному транспорті : навч. посіб. / – Київ : НАУ, 2012. – 216 с.
14. Науменко В.П., Сидоренко І.О. Диспетчеризація насосних станцій систем водопостачання / Системи автоматичного управління. – 2021. – № 4. – С. 54–60.
15. Нейро-технології та нейрон-комп'ютерні системи: підручник (з електронним диском) / Л.С. Ямпольський, О.І. Лісовиченко, В.В. Олійник – К.: «ДорадоДрук», 2016. – 576 с.
16. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> (дата звернення: 14.04.2025)
17. Про затвердження правил безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення : Наказ Міненерговугілля України № 355 від 12.06.2013 (зі змінами від

16.02.2024 р.

URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1127-](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1127-13#Text)

[13#Text](#) (дата звернення: 04.05.2025).

18. Пушкар О.І. Системи підтримки прийняття рішень / Пушкар О.І., Гіковатий В.М., Євсєєв О.С., Потрашкова Л.В. / : навч. посібник. Харків : Инжек, 2006. 304с.

19. Середюк М.Д. Обґрунтування вибору математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору в нафтопроводах / М.Д. Середюк, Н.В. Люта // Нафтова і газова промисловість. – 2000. - №2. – С. 35-42.

20. Системи і методи підтримки прийняття рішення : підручник / П.І. Бідюк та ін. Київ : 2022. 610 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48418/1/Systemy_i_metody_pidtrymk_u_pryiniattia_rishen.pdf

21. Системи штучного інтелекту в моделюванні та управлінні: підручник / Л. С. Ямпольський, Б. П. Ткач, О. І. Лісовиченко ; МАУП. - К. : Персонал, 2011 р. - 543 с

22. Сучасні моделі і методи автоматизації технологічних об'єктів / монографія / А.П. Ладанюк, О.А. Ладанюк, Р.О. Бойко, В.В. Івашук, Д.О. Кроніковський, Д.А. Шумигай. – К.: Інтер Логістик Україна, 2015. – 408с.

23. Транспортні системи гірничих підприємств : підручник / З.А. Маланчук та ін. Рівне, 2018. 190 с.

24. Транспортні системи електромеханічних комплексів: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: С.В. Зайченко, В.А. Побігайло, В.Г. Дубовик – Київ : КПІ, 2022. – 136 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/68dec947-97f5-4fc5-b235-ca3c27e7ebbf/content> (дата звернення: 11.04.2025).

ДОДАТКИ