

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти-магістр
за освітньо-професійною програмою

«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

*174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка*

тема роботи:

*«Система керування технологічним процесом подрібнення сировини з
використанням інтелектуальних алгоритмів на базі нечіткої логіки»*

Виконав ст. гр. АКТР-24-1м

Удовенко Д.О.

Керівник

Тиханський М.П.

Нормоконтроль

Маринич І.А.

Завідувач кафедри

Рубан С.А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**Факультет:** інформаційних технологій**Кафедра:** автоматизації, комп'ютерних наук і технологій**Ступінь вищої освіти:** Магістр**Спеціальність:** 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка**ЗАТВЕРДЖУЮ**Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.«15» липня 2025 р.**ЗАВДАННЯ****на кваліфікаційну роботу магістра**студентові групи АКІТР-24-1м Удовенку Дем'яну Олександровичу**1. Тема кваліфікаційної роботи:** «Система керування технологічним процесом подрібнення сировини з використанням інтелектуальних алгоритмів на базі нечіткої логіки»затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2005 р.**2. Термін здачі кваліфікаційної роботи:** 01.12.2025 р.**3. Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді**4. Консультанти кваліфікаційної роботи:**Розділ 1-3 доц. Тиханський М.П.Нормоконтроль доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	14.05.25
2	<i>Розділ 1</i>	20.05.25
3	<i>Розділ 2</i>	18.08.25
4	<i>Розділ 3</i>	19.09.25
5	<i>Висновки</i>	15.10.25
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	20.11.25
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	28.11.25
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	01.12.25

6. Дата видачі завдання: 13.05.2025р.

Керівник _____ /Тиханський М.П. /

7. **Запевнення:** Я, Удовенко Дем'ян Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету з метою запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти ознайомлена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ /Удовенко Дем'ян Олександрович /

АНОТАЦІЯ

Удовенко Д.О. Система керування технологічним процесом подрібнення сировини з використанням інтелектуальних алгоритмів на базі нечіткої логіки : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 89 с.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подрібнення сировини в подрібнювальному комплексі збагачувальної фабрики.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби інтелектуального керування процесом подрібнення сировини з використанням нечіткої логіки.

Метою роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи керування процесом подрібнення сировини на основі нечіткої логіки, що забезпечує підвищення стабільності, енергоефективності та якості процесу подрібнення в умовах змінних та невизначених параметрів об'єкта керування.

В першому розділі наведено: аналіз технічних рішень щодо автоматизації технологічного процесу подрібнення; актуальність удосконалення систем автоматичного управління ТПП. В другому розділі наведено: аспекти побудови моделей управління у нечіткому середовищі; способи перевірки адекватності моделі управління у нечіткому середовищі; узагальнена структура підсистеми управління на базі інтелектуальних алгоритмів та нечіткої логіки; модель процесу подрібнення; схема моделі серед Matlab/Simulink для проведення обчислювального експерименту. В третьому розділі наведено: розробка структурної логічної схеми АСУ з урахуванням інтелектуальних алгоритмів процесу подрібнення; аналіз рівня завантаження млина; дослідження моделі інтелектуальної АСУ ТПП при різних режимах подрібнення; алгоритм управління ТПП.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ, МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ПРОЦЕС ПОДРІБНЕННЯ.

ANNOTATION

Udovenko D.O. Control system for the technological process of raw material grinding using intelligent algorithms based on fuzzy logic: master's thesis: 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 89 p.

The object of the study is the technological process of raw material grinding in the grinding complex of the enrichment factory.

The subject of the study is methods, algorithms and technical means of intelligent control of the raw material grinding process using fuzzy logic.

The purpose of the work is to develop and study an intelligent control system for the raw material grinding process based on fuzzy logic, which ensures increased stability, energy efficiency and quality of the grinding process in conditions of variable and uncertain parameters of the control object.

The first section provides: analysis of technical solutions for automating the grinding technological process; the relevance of improving automatic control systems of the CCI. The second section presents: aspects of building control models in a fuzzy environment; methods for checking the adequacy of the control model in a fuzzy environment; generalized structure of the control subsystem based on intelligent algorithms and fuzzy logic; grinding process model; model scheme in Matlab/Simulink for conducting a computational experiment. The third section presents: development of a structural logical scheme of the ACS taking into account intelligent algorithms of the grinding process; analysis of the mill loading level; study of the model of the intelligent ACS of the CCI under different grinding modes; CCI control algorithm.

Keywords: AUTOMATION, INTELLIGENT ALGORITHMS, CONTROL MODEL, FUZZY LOGIC, GRINDING PROCESS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1 Характеристика технологічного процесу подрібнення.....	12
1.2 Аналіз технічних рішень щодо автоматизації технологічного процесу подрібнення	15
1.3 Актуальність удосконалення систем автоматичного управління ТПП	29
1.4 Постановка задач дослідження	30
Висновки до розділу	31
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ У НЕЧІТКОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	32
2.1 Концепція дослідження явищ із елементами моделювання штучного інтелекту	32
2.2 Аспекти побудови моделей управління у нечіткому середовищі	36
2.3 Процедура побудови керуючої моделі як поліномів	40
2.4 Способи перевірки адекватності моделі управління технологічним процесом у нечіткому середовищі	47
2.5 Узагальнена структура підсистеми управління на базі інтелектуальних алгоритмів та нечіткої логіки	49
2.6 Модель процесу подрібнення у циклі підготовки до збагачення.....	51
2.7 Схема моделі серед Matlab/Simulink для проведення обчислювального експерименту	52
Висновки до розділу	60

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	61
3.1 Розробка структурної логічної схеми АСУ з урахуванням інтелектуальних алгоритмів процесу подрібнення	61
3.2 Апаратно-програмний комплекс аналізу рівня завантаження млина..	68
3.3 Дослідження моделі інтелектуальної АСУ технологічного процесу подрібнення при різних режимах подрібнення	74
3.4 Алгоритм управління технологічним процесом подрібнення	77
Висновки до розділу	82
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

АСКП – автоматизована система керування підприємством;

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ВМ – виконавчий механізм;

ОК – об'єкт керування;

ПІД-регулятор – пропорційний інтегральний та диференціальний регулятор;

ПЛК – програмований логічний контролер;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматизованого керування;

ТЗА – технічні засоби автоматизації;

ТК – технологічний комплекс;

ТПП – технологічний процес подрібнення;

ВСТУП

Процес подрібнення сировини займає одне з ключових місць у багатьох промислових галузях, зокрема у гірничозбагачувальній, металургійній, хімічній, цементній та будівельній промисловості. Саме на етапі подрібнення здійснюється підготовка матеріалу до подальших технологічних операцій – збагачення, агломерації, спікання, випалу, складування або формування готової продукції. Ефективність роботи дробильно-помольного обладнання безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, енерговитрати підприємства та стабільність усього виробничого процесу.

Сучасні системи подрібнення характеризуються складними фізико-механічними процесами, нелінійними залежностями між параметрами, стохастичними впливами та значною інерційністю. Властивості сировини, такі як міцність, вологість, зернистість, однорідність та насипна густина, можуть змінюватися в широких межах навіть у межах однієї технологічної партії. Це ускладнює процес керування та створює додаткові труднощі для традиційних систем автоматизації, які базуються на класичних алгоритмах регулювання, зокрема П, ПІ або ПІД-законах.

Традиційні методи керування процесом подрібнення, як правило, не враховують повною мірою складну природу об'єкта керування, а також змінність і невизначеність його параметрів. Унаслідок цього можуть виникати режими перевантаження обладнання, нерівномірне подрібнення матеріалу, перевитрата електроенергії, підвищене зношування робочих органів та часті аварійні зупинки. Усе це призводить до зменшення загальної ефективності виробництва та зростання експлуатаційних витрат.

В умовах розвитку концепцій «Індустрії 4.0» та цифрової трансформації промисловості особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних систем керування, здатних до адаптації, самоналаштування та прийняття рішень в умовах неповної або нечіткої інформації. Одним із найбільш перспективних напрямів у цій сфері є використання алгоритмів на базі нечіткої логіки (Fuzzy

Logic), які дозволяють формалізувати експертні знання та враховувати якісні й нечіткі залежності між вхідними й вихідними параметрами технологічного процесу.

Застосування нечіткої логіки в системах керування дає змогу створити гнучкий інтелектуальний регулятор, здатний адекватно реагувати на зміну фізичних параметрів сировини, режимів навантаження та зовнішніх збурень. Такий підхід дозволяє покращити стабільність роботи мельничного або дробильного агрегату, підвищити якість подрібненого продукту та зменшити енергоспоживання. Особливо важливою є можливість врахування суб'єктивного досвіду оператора або технолога при формуванні бази правил нечіткого регулятора.

Подальшого розвитку набувають системи, у яких нечітка логіка поєднується з методами математичного моделювання, комп'ютерного прогнозування, нейромережових технологій та адаптивних алгоритмів. Це дозволяє реалізувати інтелектуальні підсистеми моніторингу і керування, які працюють у реальному часі та забезпечують оптимальний режим функціонування дробильно-помольного комплексу.

З урахуванням вищезазначеного, розробка **системи керування технологічним процесом подрібнення сировини з використанням інтелектуальних алгоритмів на базі нечіткої логіки** є важливою і актуальною науково-технічною задачею. Вона має не лише теоретичну значущість, але й високу практичну цінність для підприємств, які прагнуть до підвищення ефективності, енергоощадності та конкурентоспроможності своєї продукції.

У даній магістерській роботі передбачається проведення аналізу існуючих методів керування процесом подрібнення, побудова математичної моделі об'єкта керування, розробка структури інтелектуальної системи керування на основі нечіткої логіки, синтез бази правил нечіткого регулятора та дослідження ефективності запропонованої системи шляхом комп'ютерного моделювання. Особливу увагу буде приділено питанням підвищення стабільності процесу, зниження енергоспоживання та поліпшення якості продукту подрібнення.

Таким чином, тема даної магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною, перспективною і повністю відповідає сучасним вимогам до розвитку автоматизованих і інтелектуальних систем керування в промисловості.

Метою роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи керування процесом подрібнення сировини на основі нечіткої логіки, що забезпечує підвищення стабільності, енергоефективності та якості процесу подрібнення в умовах змінних та невизначених параметрів об'єкта керування.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подрібнення сировини в подрібнювальному комплексі збагачувальної фабрики.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби інтелектуального керування процесом подрібнення сировини з використанням нечіткої логіки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Характеристика технологічного процесу подрібнення

Об'єктом автоматизації є подрібнювальний комплекс збагачувальної фабрики, що складається з млина МШЦ-1А (продуктивністю по руді до 320т/год), зливного ЗУМПФ та батареї гідроциклонів ГЦ-1700. Схема подрібнення загалом характеризується частковим поверненням (рециклом) подрібненого матеріалу на вхід комплексу.

Вихідною сировиною для подрібнювального комплексу руди. Вихідними продуктами є: пульпа з регламентованим вмістом готового класу твердого і щільністю (кількістю твердого) і піски, що надходять на вхід млина як рециркулюючий матеріал.

Схема подрібнення представлена рис. 1.1, а технологічні показники комплексу млин – гідроциклон – в таблиці 1.1.

Робота досліджуваного комплексу технологічного процесу подрібнення у межах збагачувального переділу будується так.

Отриманий промпродукт подрібнення (злив млина), на виході з млина надходить у проміжний зумпф, звідки він по двох транспортних лініях – основний та резервний – насосами, під тиском, подається на вхід батареї гідроциклонів ГЦ-1700. Необхідно відзначити, що резервна транспортна лінія працює лише при зупинці основної лінії.

Насос резервної лінії оснащений частотним приводом регулювання кількості обертів.

До проміжного ЗУМПФ додатково подається вода, величина витрати якої автоматично підтримується існуючим контуром стабілізації щільності на зливі гідроциклону. Вибір величини уставки щільності зливу гідроциклону

визначається оператором-технологом в залежності від поточної виробничо-технологічної обстановки на підприємстві. При роботі по резервній лінії кількість обертів приводу насоса регулюється контуром підтримання заданого рівня пульпи у зумпфі [1].

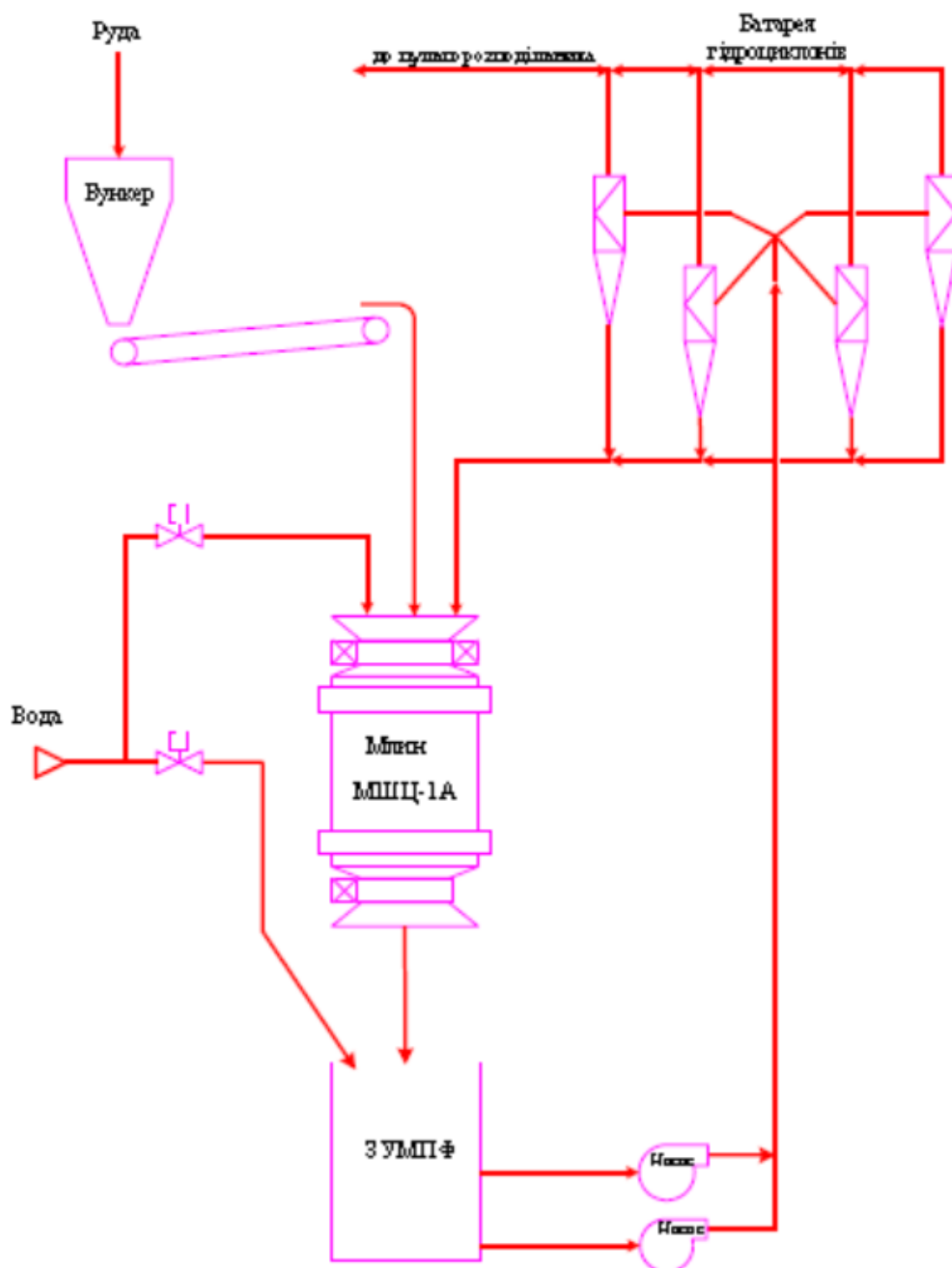


Рисунок 1.1 - Схема апаратурна технологічного процесу подрібнення ЗФ

Таблиця 1.1 – Основні показники роботи комплексу млин – гідроциклон

Група параметрів	Найменування технологічного параметра	Од. змін.	Діапазон змін.	Умовне позначення
Вхідні	Витрата руди до млина	т/год	270-320	Qp
	Витрата води до млина	м3/год	70-120	Вм
	Витрата води в зумпф	м3/год	350-500	ВГЦ
	Число оборотів приводу насоса гідроциклону	%	нгц	нгц
Режимні	Потужність приводу млина	кВт	1850-2300	М
	Рівень пульпи у зумпфі	м	0,5-3,0	Н
	Тиск пульпи на вході гідроциклону	МПа	0,2-0,27	Ргц
	Об'ємне завантаження млина (акустичний та вібраційний датчики)	%	40-85	Зв
Вихідні	Щільність зливу гідроциклону (кількість твердого)	%	25-35	ргц
	Вихід готового класу - 0,74	%	55-75	QT
Параметри агрегату	Розмір млина –діаметр, довжина	мм	5500х6500	
	Діаметр гідроциклону	мм	1400	

Злив гідроциклону надходить у пульподілювач і далі прямує на наступну стадію. Піски гідроциклону подаються на вхід млина як рециркулюючий матеріал.

У разі реального виробництва управління подрібненням ведеться операторами – технологами, мають різний досвід ведення процесу кваліфікацію. Технолог ділянки подрібнення, керуючись Технологічними регламентами, на основі змінного завдання, апріорної і вельми приблизною і з затримкою на кілька годин, інформації про кількісний і якісний склад перероблюваних рудних матеріалів і власного досвіду ведення процесу вибирає технологічний режим

процесу подрібнення: витрата руди, витрата води на тиск на виході гідроциклону і ін. власного уявлення про технологічний процес забезпечує підтримку обраного технологічного режиму зміною потоку завантажуваної руди, кількості води в млин, кількості рециркулюючих потоків, рівня пульпи в ЗУМПФ за допомогою на виконавчі механізми. Вибір положення цих механізмів визначає управління комплексом млин – гідроциклон. [2]

1.2 Аналіз технічних рішень щодо автоматизації технологічного процесу подрібнення

Зважаючи на те, що всі технологічні процеси подрібнення матеріалів комплексом млин - гідроциклон мають багато спільного, спробуємо оцінити сучасний стан питання автоматичного управління процесами за допомогою цих агрегатів, розглядаючи процеси подрібнення руди в млині як моделювання сукупностей і різних поєднань моделей типових ідеалізованих фізичних процесів, таких як процеси ідеального. наявним численним попереднім дослідженням технологічного процесу подрібнення рудних матеріалів у комплексах млин – гідроциклон, млин – класифікатор для одностадійного та багатостадійного виробництва було розроблено математичні моделі для цих процесів та на їх основі побудовано системи автоматичного ними управління.

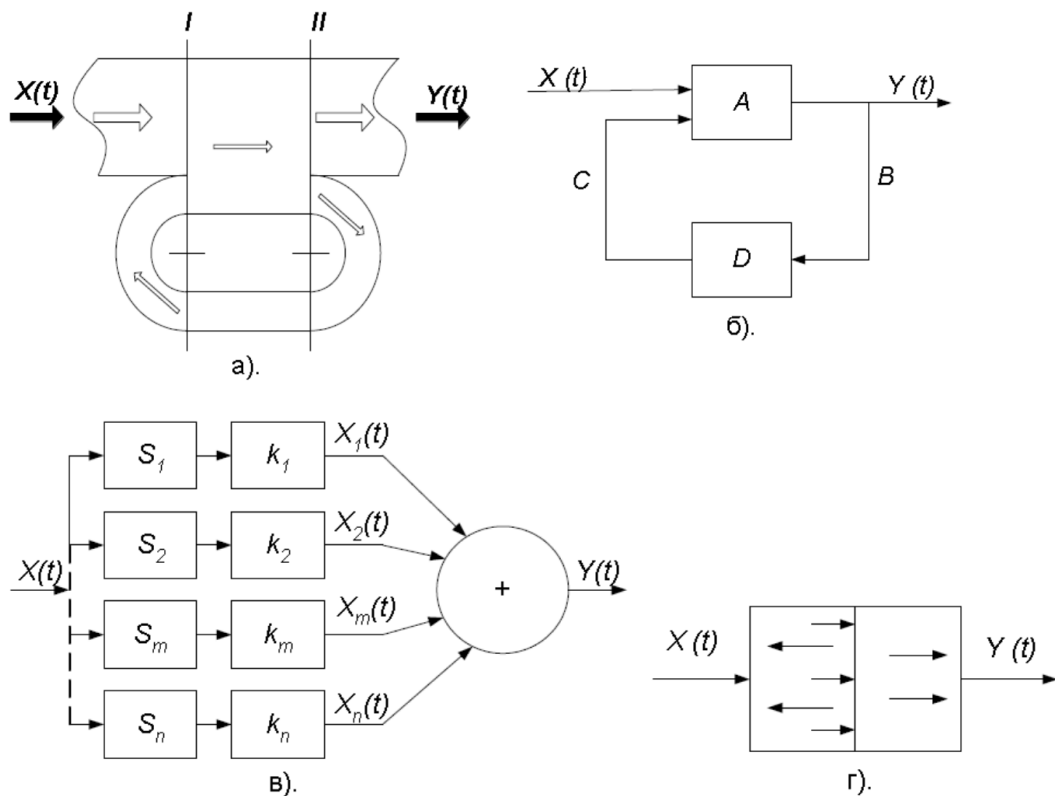
При моделюванні складних об'єктів найбільшого поширення набули способи, у яких технологічні процеси розглядаються як процеси з ідеальним витісненням, і з ідеальним перемішуванням [2]. Разом з тим, для моделей реальних процесів виявляється скрутним вказати, якою проміжною моделлю між ідеальним витісненням і ідеальним перемішуванням слідує об'єкт.

Ця ситуація виникає також під час аналізу дуже поширеного для технологічного процесу подрібнення випадку з рециркуляцією матеріальних потоків - так званого об'єкта з рецикл (рис. 1.2а). Очевидно, що між перерізами I-I та II-II спостерігається процес змішування потоку $x(t)$ з рециклом:

$$z(t) = x(t) + ay(t)$$

де a - деякий коефіцієнт - ступінь рециркуляції, що являє собою відношення значень потоків, що встановилися, в тракці рециркуляції до величини потоку на вході.

При тому самому значенні S_0 об'єкт тим паче слідує моделі ідеального перемішування, що більше a , розташовуючись у послідовності, зображеної на рис. 1.2а, праворуч від об'єктів із меншим значенням ступеня рецикла.



а, б, з рециклом; г - дифузійного витіснення

Рисунок 1.2 - Модельні уявлення об'єкті

Динамічні властивості замкнутого циклу подрібнення визначаються сукупністю динамічних властивостей процесів подрібнення та класифікації. Тому особливості, що визначають динаміку процесів подрібнення та класифікації окремо, притаманні і замкнутому циклу подрібнення [3]:

1) апарати, що входять у замкнутий цикл, мають значні гідравлічні ємності, що зумовлюють інерційність циклу;

2) процеси, що відбуваються в апаратах, що входять у замкнутий цикл, мають транспортне запізнення (переміщення матеріалу по довжині барабана млина, транспорт подрібненого матеріалу в класифікатор, транспорт пісків до млина). Ця обставина значно підвищує час перехідного процесу циклу;

3) якісні та кількісні параметри вхідних потоків циклу (продуктивність, гранулометричний склад та фізико-механічні властивості руди) безперервно змінюються, тому цикл подрібнення піддається безперервним обуренням.

Одностадійний замкнутий цикл подрібнення можна розглядати як двоємнісний об'єкт із внутрішнім позитивним зворотним зв'язком (Рис. 1.3).

На рисунку 1.3 наведено наступні позначення: $X_{вх}(p)$ – живлення циклу; $Z_M(p)$ – злив млина; $Y_n(p)$ – піски класифікатора (гідроциклону); $Y_{сл}(p)$ – злив класифікатора (гідроциклону); $W_M(p)$, $W_{сл}(p)$, $W_n(p)$, $W_{мп1}(p)$, $W_{мп2}(p)$ – передавальні функції млина, класифікатора зі зливу та пісків, транспортних пристроїв подрібненого продукту в класифікатор (гідроциклон) та пісків до млина.

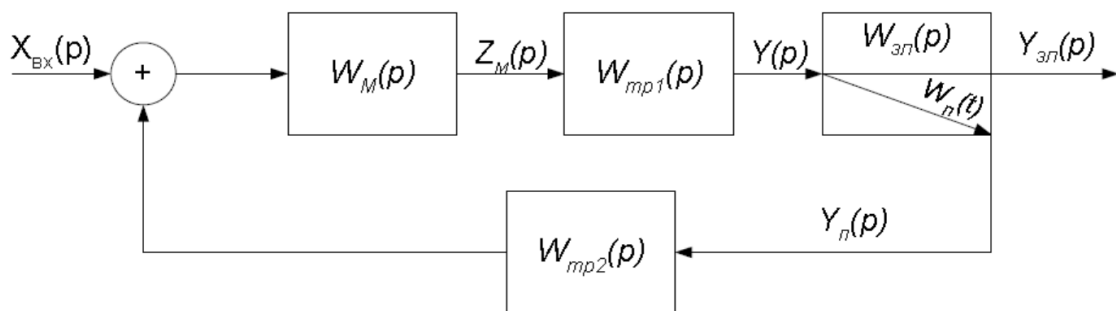


Рисунок 1.3 - Структурна схема замкнутого циклу подрібнення

Передатна функція такого об'єкта для нульових початкових умов має вигляд:

$$\Phi(p) = \frac{W_M(p)W_{сл}(p)W_{мп1}(p)}{1 - W_M(p)W_n(p)W_{мп1}(p)W_{мп2}(p)}$$

Передатна функція замкнутого циклу подрібнення каналом «продуктивність — вихід твердого в злив»:

$$\Phi(p) = \frac{W_1(p)W_3(p)e^{-p\tau_1}}{1 - W_1(p)W_4(p)e^{-p(\tau_1+\tau_2)}}$$

де $W_1(p)$ - передавальна функція млина по каналу "продуктивність - вихід твердого в розвантаження"; $W_3(p)$ -передаточна функція класифікуючого апарату по каналу "витрата твердого в класифікатор - витрата твердого зі зливом"; $W_4(p)$ -передавальна функція класифікатора по каналу «витрата твердого в класифікатор - витрата твердого з пісками»; τ_1 та τ_2 - час транспортування відповідно подрібненого продукту до класифікатора та пісків до млина.

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку замкнутого циклу подрібнення завжди менше одиниці. Значення його характеризує здатність процесу самовирівнювання в перехідних режимах. Чим менше цей коефіцієнт, тим більше схильність процесу самовирівнювання.

На характер перехідних процесів мокрого подрібнення в замкнутому циклі значний вплив мають гідравлічні процеси, що відбуваються в циклі [5].

Перехідні процеси циклу за зміни витрати води менш тривалі, ніж із зміни витрати руди, але вони більш коливальні.

1.2.1 Принципи автоматичного керування процесом подрібнення

Основне завдання процесу подрібнення – забезпечення підготовки пульпи до збагачення (великість, розкриття мінералів тощо). При цьому у циклі подрібнення передбачається переробляти планову кількість руди.

У зв'язку з цим виділяють такі цілі управління процесом подрібнення:

а) стабілізація гранулометричного складу продукту подрібнення (Вихід готового класу) $Q_T = \text{const}$ при постійній продуктивності циклу за вихідною рудою ($Q_p = \text{const}$);

б) стабілізація гранулометричного складу і щільності пульпи після гідроциклону, що надходить у процес збагачення ($Q_T = \text{max}$, $\rho_{2\text{ц}} = \text{const}$);

в) досягнення максимально можливого виходу готового продукту ($Q_T \rightarrow \max$)

г) забезпечення сталості гранулометричного складу подрібненого матеріалу ($\rho_{\text{гц}} = \text{const}$) за умови максимальної продуктивності циклу за вихідною рудою ($Q_p \rightarrow \max$)

Під час керування процесом подрібнення, щоб досягти визначених цілей, необхідно компенсувати такі збурення:

- варіювання фізико-механічних характеристик руди, що спричиняє поступову зміну витрати й гранулометричного складу пульпи на виході циклу;
- коливання параметрів вхідних потоків руди та води, які призводять до зміни витрати та гранулометричного складу пульпи;
- нестабільність витратних параметрів потоків пульпи всередині циклу, що викликає нерівномірне навантаження класифікуючих пристроїв і порушення режиму класифікації.

Таким чином, для досягнення цілей управління процесом подрібнення необхідно вирішити такі завдання:

- а) стабілізація потоків руди та води на вході;
- б) утримання сталих умов подрібнення;
- в) підтримання стабільності процесу класифікації;
- г) забезпечення постійного гранулометричного складу пульпи на виході;
- д) компенсація змін у фізико-механічних властивостях вихідної руди.

Для реалізації цих завдань запропоновано багато підходів до керування процесом подрібнення, які можна згрупувати таким чином:

1. Регулювання шляхом зміни подачі сирової руди до циклу подрібнення.
2. Керування витратою води, що подається в барабан млина.
3. Контроль рівня пульпи в зумпфі насоса гідроциклону.
4. Регулювання гранулометричного складу пульпи на виході циклу.
5. Керування подачею подрібнювальних тіл у барабан млина.

Проектування систем автоматичного управління стикається з низкою важливих проблем, тому що не існує загальних способів об'єктивного виявлення

роду і числа обурювальних і регулюючих впливів. Разом з тим, при цьому підході не може бути отримана однозначна відповідь на питання, що краще: варіювати в даній системі параметри або нелінійності, структуру чи коди імпульсів тощо.

Таким чином, при узагальненні технологічних вимог до процесу подрібнення вся різноманітність завдань управління зводилася до вигляду:

1. $Q_p = \text{const}; Q_T = \text{const};$
2. $Q_p = \text{var}; (Q_p = \text{max}); Q_T = \text{const};$
3. $Q_p = \text{const}; Q_T = \text{var}; (Q_T = \text{max});$
4. $Q_p = \text{var}; Q_T = \text{var};$

де Q_p - продуктивність комплексу ТПП по руді; Q_T - тонкість помелу, що оцінюється, наприклад, % залишку на ситі заданого класу.

1.2.2 Побудова систем управління для роботи відповідно до локальних критеріїв ефективності

Забезпечення можливості роботи подрібнювального комплексу з урахуванням мінімальних витрат енергії на подрібнення матеріалу, а також підтримання встановлених режимних параметрів та дотримання обмежень подрібнювального комплексу можливе лише при виконанні локальних критеріїв оптимальності процесу подрібнення у самому млині.

Встановлено, що продуктивність готового продукту падає до нуля, якщо млин повністю заповнена матеріалом [6]. При незначному заповненні, коли ймовірність попадання матеріалу між соударяючимися дробящими тілами невелика, мала і швидкість утворення готового продукту.

Зі сказаного вище випливає, що для кожного конкретного випадку слід проводити дослідження з ідентифікації виявлених експериментальних закономірностей між технологічними факторами та їх обмежень для забезпечення ефективного управління.

Експериментальні дані дозволяють сформулювати критерій оптимальності процесу подрібнення у млині:

$$Q_{\text{гот. прод}} = \max \text{ при } Z_m = Z_{mн}$$

де $Q_{\text{гот. прод}}$ - продуктивність по готовому продукту.

Крім оптимального заповнення млина матеріалом $M = M_n$, можливі режими $Z_m < Z_{mн}$ і $Z_m > Z_{mн}$. При $Z_m < Z_{mн}$ частина енергії E_k витрачається на нагрівання і взаємне розколювання тіл, що мелють футерування, а продуктивність по готовому продукту різко знижується.

При $Z_m > Z_{mн}$ центр тяжкості внутрішньомлиного завантаження наближається до осі млина, в результаті статичний момент зменшується і знижується питома витрата потужності на одиницю обсягу матеріалу, що вигідно при багатостадійних схемах та обмеження на переподрібнення.

При побудові САР ТПП необхідно враховувати, що такий важливий режим роботи подрібнювального комплексу, як тонкість помелу на виході з млина має значне транспортне запізнення по відношенню до керуючих впливів. Регулятор, побудований для такого об'єкта із запізненням, може не тільки не забезпечити заданої якості регулювання, але навіть і стійкості. Разом з тим, як зазначено низкою дослідників, існують суттєві залежності параметрів подрібнювального агрегату від одного узагальненого показника — внутрішньомлиного заповнення. Для оцінки зв'язку внутрішньомлиного заповнення зі змінними: керованими параметрами $X(t)$, керуючими впливами $Y(t)$ та збурюючими впливами $Z(t)$ дослідниками було запропоновано ввести параметр - час перебування матеріалу або пульпи в млині - як узагальнений показник цього зв'язку. На практиці при автоматичному та ручному управлінні величину внутрішньомлиного заповнення контролюють непрямыми методами [7], наприклад, по амплітуді шуму, що видається млином під час роботи: чим більше заповнення барабана, тим «глуше» звучить млин і менше амплітуда його шуму. Відповідно до обраного критерію ефективного режиму . під час експлуатації

необхідно визначати значення внутрішньомлинного заповнення та значення амплітуди шуму, що відповідає такому заповненню. Контролювати цей режим найбільш просто для млинів із заповненням кулями 50%, тому що при такому заповненні кулями та заповненні пульпою всіх порожнин потужність M або струм приводу млина I досягає максимального значення. Встановити значення амплітуди шуму $Z_{вотим}$, що відповідає заповненню пульпою Z_v легко після побудови графіка $M = f(Z_v)$ або $I = f(Z_v)$.

У деяких випадках пошук оптимальної кількості пульпи в млині можна також виконувати за допомогою оцінки результатів процесу подрібнення на різних рівнях заповнення ситових аналізів готового продукту. Однак такий спосіб дуже складний і вимагає застосування імовірнісних методів контролю та проведення тривалих випробувань та у виробничих умовах, як правило, неприйнятний.

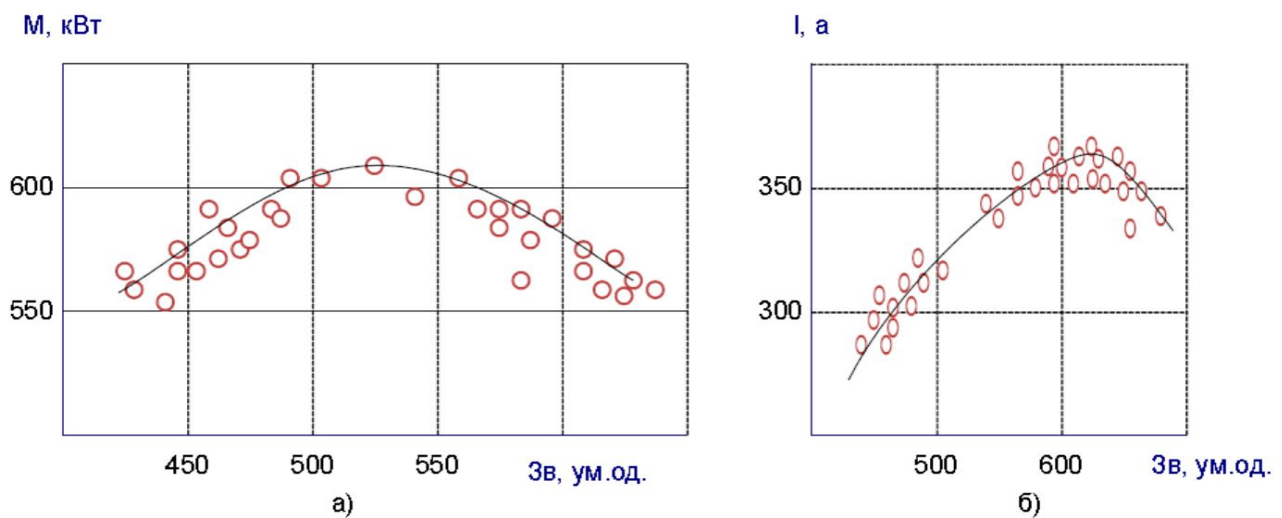


Рисунок 1.4 - Графіки залежності внутрішньомлинного заповнення від потужності (а) та струму (б) приводу млина

Також відомий спосіб побудови керуючих алгоритмів на базі оптимізації без моделей. При використанні цього підходу побудова моделі об'єкта управління як проміжний етап використання даних не є принципово необхідною. Можна використовувати дані без обчислення моделі.

Перевага моделі — можливість інтерполювати та частково екстраполювати результати. При оптимізації без моделей зазвичай не потрібно накопичення інформації, що надходить. У цьому полягає її значна перевага.

Оптимізацію процесів без моделей називають коротко "пошук". Важлива особливість пошуку — необхідність попередньої чіткої формулювання та подальшого безперервного використання цільової функції, оскільки аналіз результатів кожного досвіду виконується з її використанням. Крім того, особливості цільової функції безпосередньо позначаються на характері пошуку. Пошук суттєво ускладнюється за наявності обмежень на вихідні показники.

Наявність обмежень на вихідні показники, тобто використання цільових функцій виду

$$\Pi \rightarrow \max; y = B \text{ або } y < > B,$$

поряд з погіршенням умов пошуку вносить деякі корективи та до самі алгоритми пошуку [9,10]:

а) у пасивних методах та при сліпому пошуку зіставляються між собою лише умови, для яких виконані обмеження;

б) у методах, що містять елементи переміщення центру експериментування, рух зазвичай здійснюється спочатку до лінії обмеження, а потім уздовж точок, що задовольняють обмеження. Якщо це неможливо, передбачаються спеціальні кроки (зміни значень факторів), що переносять центр пошуку в нову точку, з якої знову починається рух до обмеження.

1.2.3 Самоналаштовуються системи управління

Принциповою особливістю аналізованої нижче системи регулювання процесу подрібнення, що самоналаштовується, є застосування екстремального регулятора позиційного типу. Пропонована І. Шепелєвим принципова схема самонастроювальної системи регулювання замкнутого циклу подрібнення (рис. 1.6) складається з наступних вузлів, що працюють незалежно один від одного:

- регулятора 1, що підтримує постійну щільність зливу класифікатора;
- регулятора співвідношення 2, що підтримує витрату води в млина в залежності від тоннажу (конвеєрні ваги 3) руди, що переробляється;
- екстремального регулятора ЕР, здатного підтримувати оптимальне завантаження млина рудою. При розробці принципової схеми самонастроювання системи регулювання за основу прийняті наступні положення:
 - при незалежному регулюванні щільності зливу класифікатора (задана щільність витримується з необхідною точністю) всі зміни живлення млина (кількісні та якісні) тягнуть за собою тільки кількісні зміни у виході готового продукту, якість же подрібнення (великість готового продукту) зберігається завдяки сталості щільності зливу;
 - при постійній якості вихідного живлення між живленням і виходом готового продукту є зв'язок з явно вираженим оптимумом;
 - якісні зміни живлення (твердості та крупності руди) принципових змін у характер процесу не вносять, впливаючи лише на абсолютну величину максимально можливої продуктивності млина по готовому продукту. При прийнятті даних положень слід, що об'єкт управління має наступні властивості;
 - для певної якості живлення млина є власне виражений максимум продуктивності по готовому продукту. Саме цей максимум у кожний момент і повинна знаходити і підтримувати система автоматичного регулювання продуктивності млина;
 - при постійній щільності зливу класифікатора за витратою пульпи на злив класифікатора можна судити про продуктивність замкнутого циклу подрібнення по готовому продукту (розрахунковому дрібному класу крупності).

Самоналаштовується система регулювання подрібнювального агрегату із замкнутим циклом, заснована на принципі регулювання на межі стійкості працює за таким принципом.

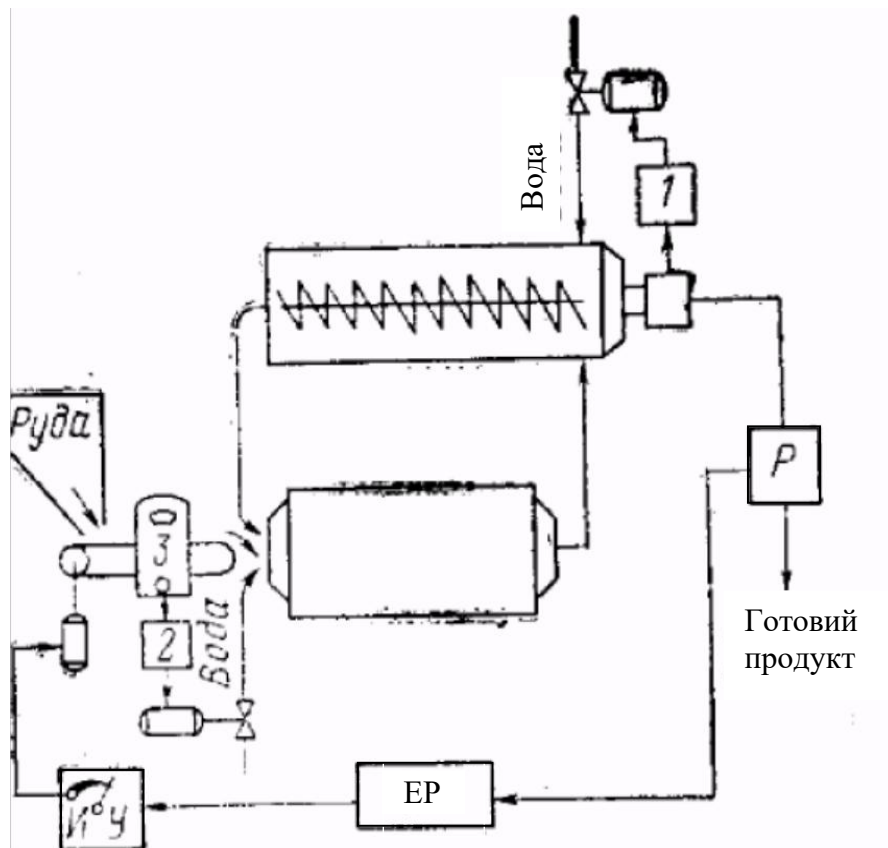


Рисунок 1.5 - Схема самонастроювання системи регулювання замкнутого циклу подрібнення

Використовуючи побудовану з урахуванням наведених вище властивостей об'єкта управління і на основі балансу матеріалів, що завантажуються, і одержуваних продуктів статичну модель самоналаштовується система регулювання повинна автоматично відшукувати вагу живлення комплексу ТПП рудою в кількості, що відповідає максимальній його продуктивності. При цьому керування здійснюється шляхом вибору регулятором максимальної ваги живлення комплексу ТПП рудою дискретним (стрибкоподібним) збільшенням його поточного значення.

Також зазначається [13], що крім значення маси пісків, що перебуває в подрібнювальному агрегаті, регулятор для своєї роботи може використовувати рівень шуму млина.

Блок-схема системи регулювання, що самоналаштовується, показана на рисунку 1.6.

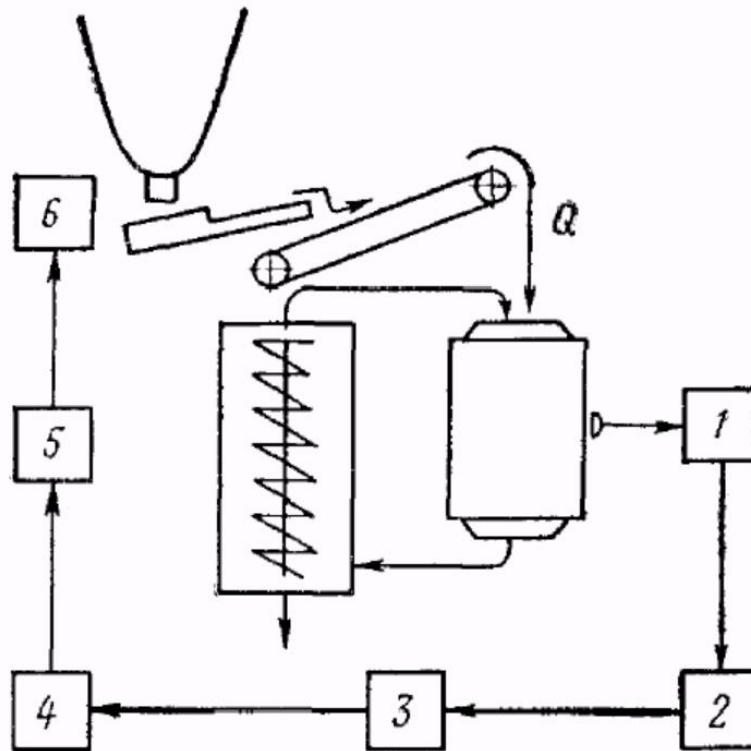


Рисунок 1.6 - Блок-схема системи регулювання, що самоналаштовується

У проміжок часу виміру сигналу величини похідної маси що знаходиться в подрібнювальному агрегаті пісків з датчика 1 циркулюючого навантаження або шуму через переривач 2 і диференціюючий пристрій 3 подається в логічний пристрій 4, яке керує пускорегулюючими ланцюгами виконавчого механізму 6 у відповідності. Переривач 5 регулюючого сигналу подає напругу живлення попередньо підготовлену пристроєм 4 ланцюг управління механізму 6 тільки у встановлені моменти часу.

1.2.4 Побудова експертних систем управління

До одним із останніх публікацій у сфері автоматизації технологічних процесів подрібнення належать результати розробки створених з допомогою методів побудови систем комплексу з урахуванням штучного інтелекту (нейронні мережі).

Поява подібних систем останнім часом стала можливою завдяки широкому поширенню досить потужних та порівняно недорогих обчислювальних комплексів, а також доступного спеціалізованого програмного забезпечення. Метою оптимального управління процесом подрібнення та класифікації цеху подрібнення є максимально можлива переробка руди при забезпеченні заданої якості її помелу. Завдання при цьому зводиться до знаходження оптимального керування, яке переводить систему з поточного стану в потрібне, мінімізуючи заданий інтегральний критерій якості.

Загальна структура системи оптимального управління наведена на рис.1.7.

Для кожного переділу ТПП та класифікації створюється інформаційна нейромодель за такими етапами:

- збір поточних значень параметрів (сигналів вимірювань та обчислень) з SCADA-системи ,
- визначення типових складів параметрів до створення і тренування об'єктів нейромоделі;
- автоматичне створення нейромоделей об'єктів управління та їх тренування з метою мінімізації помилки математичного моделювання для реальних діапазонів змін вхідних та вихідних змінних у звичайному режимі роботи;
- аналіз ступеня впливу вхідних параметрів нейромоделей;
- створення каналів комунікації між нейромоделями та системою управління для динамічного обміну даними;
- запуск нейромоделі в режимі реального часу за допомогою програми "NeuroModel" Runtime, в результаті чого видається прогноз гранулометричного складу пульпи в режимі реального часу.

Порівняння результатів прогнозу змісту готового класу $< 0,074$ мм з нейромоделей для кожного об'єкта управління з даними вимірювань гранулометрів.

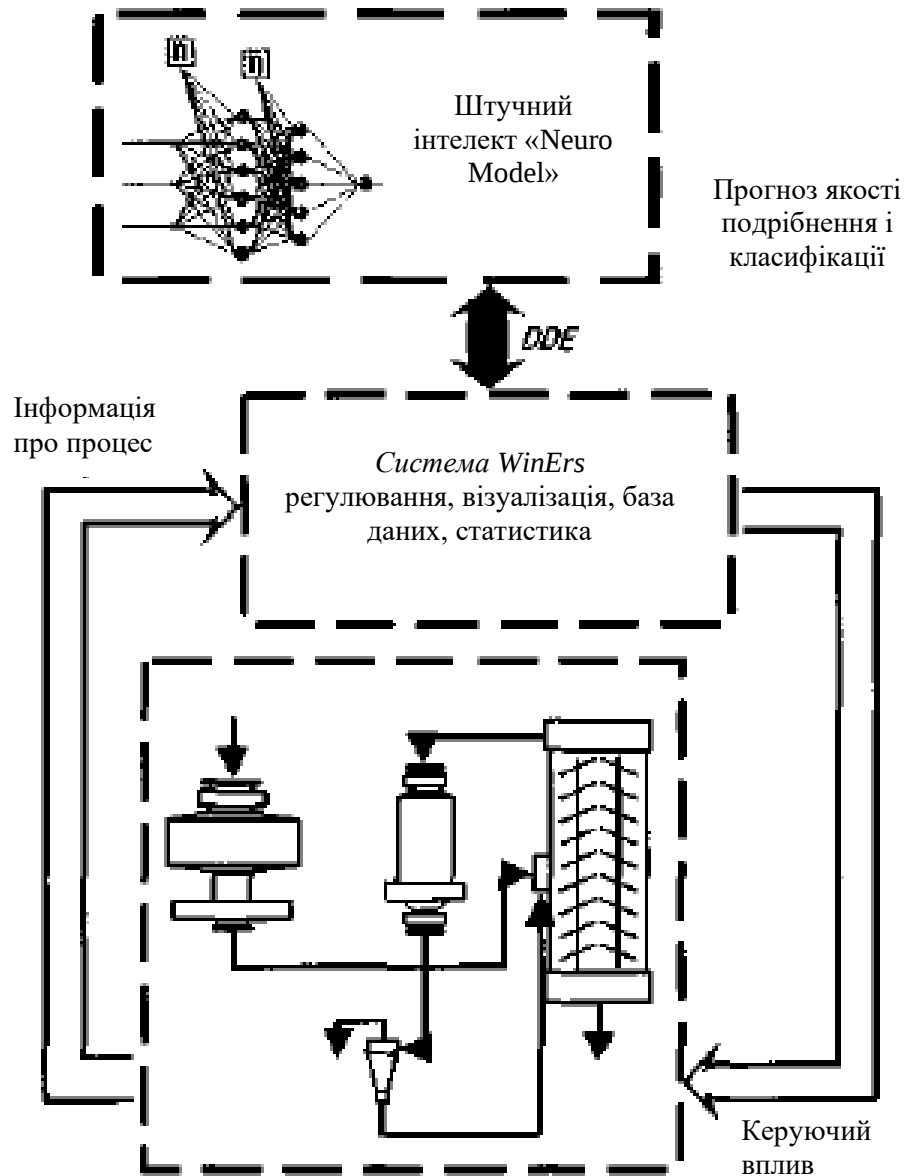


Рисунок 1.7 - Загальна структура системи раціонального управління ТПП з урахуванням штучного інтелекту (нейронні мережі)

Однак, використання описаного вище методу побудови АСУ ТПП хоча і досить перспективне, але він вимагає виконання процедури накопичення великої кількості статистичних даних на реальному об'єкті, періодичної ідентифікації математичної моделі, і не дозволяє оператору-технологу з використанням можливостей сучасних обчислювальних засобів приймати оперативні керуючі рішення, що забезпечують високі техніко-економічні показники готової.

1.3 Актуальність удосконалення систем автоматичного управління ТПП

Керуючі моделі та алгоритми повинні враховувати ряд технологічних обмежень, властивих процесу подрібнення, такі як необхідність роботи в строго певному діапазоні по виходу готового класу, недопущення навантаження млина за внутрішнім обсягом, а також обмежити витрати електроенергії при роботі технологічного обладнання.

Велике транспортне запізнення в отриманні даних про один із ключових технологічних параметрів (вихід готового класу) унеможливорює ефективне регулювання цього показника з використанням традиційних методів автоматичного керування. Для вирішення впливають із наведених вище обмежень щодо недопущення виходу основних технологічних параметрів за встановлені обмеження в статичних і динамічних режимах управління доцільно використовувати самодіагностуються або нечіткі інтелектуальні алгоритми управління.

Управління подрібненням ускладнюють існуючі і в промислових умовах істотні обурення, що не піддаються формалізації, за механічним і фізико-хімічним складом подрібнюваних матеріалів (твердість, крупність, однорідність тощо). Контролювати дані обурення з необхідною для детермінованих моделей точністю і дискретністю неможливо, а стабілізація величини вищевказаних вхідних матеріальних потоків не знімає коливань фізико-механічних властивостей руди.

Для вирішення цих завдань можна використовувати методи на основі нечіткої логіки та теорії планування експерименту та дозволяють побудувати аналітичну базу знань (БЗ) інтелектуальної підсистеми управління.

1.4 Постановка задач дослідження

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи керування процесом подрібнення сировини на основі нечіткої логіки, що забезпечує підвищення стабільності, енергоефективності та якості процесу подрібнення в умовах змінних та невизначених параметрів об'єкта керування.

Реалізація поставленої мети в цій роботі забезпечується через виконання таких ключових завдань:

- обґрунтування та вибір найбільш ефективного підходу до побудови автоматизованої системи керування технологічним процесом подрібнення в умовах багатфакторності та невизначеності оперативної інформації;
- визначення локального критерію ефективності функціонування комплексу «млин – гідроциклон» серед існуючих варіантів з подальшою ідентифікацією його режимних параметрів та обмежень на основі реальних технологічних даних;
- формування та аналіз простору керуючих факторів для процесу подрібнення, а також синтез аналітичної залежності, що відображає вплив керуючих дій на технологічний об'єкт з урахуванням наявних обмежень;
- розроблення алгоритмів керування процесом подрібнення, які враховують пріоритетність вибору оптимальних керуючих впливів для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи;
- створення інженерно-технічного забезпечення для практичної реалізації розроблених алгоритмів керування та функціонування автоматизованої системи у цілому.

Висновки до розділу

Метою роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи керування процесом подрібнення сировини на основі нечіткої логіки, що забезпечує підвищення стабільності, енергоефективності та якості процесу подрібнення в умовах змінних та невизначених параметрів об'єкта керування.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подрібнення сировини в подрібнювальному комплексі збагачувальної фабрики, що складається з млина МШЦ-1А (продуктивністю по руді до 320т/год), зливного ЗУМПФ та батареї гідроциклонів ГЦ-1700.

Розглянуто сучасний стан питання автоматичного управління процесами за допомогою цих агрегатів, розглядаючи процеси подрібнення руди в млині як моделювання сукупностей і різних поєднань моделей типових ідеалізованих фізичних процесів, таких як подрібнення рудних матеріалів .

Забезпечення можливості роботи подрібнювального комплексу з урахуванням мінімальних витрат енергії на подрібнення матеріалу, а також підтримання встановлених режимних параметрів та дотримання обмежень подрібнювального комплексу можливе лише при виконанні локальних критеріїв оптимальності процесу подрібнення у самому млині.

Керуючі моделі та алгоритми повинні враховувати ряд технологічних обмежень, властивих процесу подрібнення, такі як необхідність роботи в строго певному діапазоні по виходу готового класу, недопущення навантаження млина за внутрішнім обсягом, а також обмежити витрати електроенергії при роботі технологічного обладнання.

Для вирішення завдань можна використовувати методи на основі нечіткої логіки та теорії планування експерименту та дозволяють побудувати аналітичну базу знань (БЗ) інтелектуальної підсистеми управління.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ У НЕЧІТКОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Концепція дослідження явищ із елементами моделювання штучного інтелекту

2.1.1 Нечіткість як властивість інформації

Як зазначається в різних джерелах літератури в більшості завдань управління реальними технологічними об'єктами вихідні дані, цілі та обмеження управління є надто складними і невизначеними, щоб допустити точну і сувору математичну інтерпретацію в термінах існуючих.

Усвідомлення нечіткості інформації про об'єкт дослідження в будь-якому її вираженні – чисельному чи вербальному – призвело до створення теорії нечітких множин.

Як відомо, при розробці АСУТП проблема ідентифікації внутрішніх закономірностей та критеріїв ефективного управління технологічним об'єктом, а також побудова адекватних керуючих ним алгоритмів є одними з найважливіших та складних. У будь-якому випадку виникає необхідність розробки алгоритмів управління безпосередньо на об'єкті, що часом пов'язано зі значними витратами часу та технологічними ускладненнями. Використання отриманої від оператора – технолога якісної інформації про управління технологічним процесом дозволяє створювати продукційні правила типу «ЯКЩО ..., ТО ..., інакше ...» як набору таблиць відносин.

Поняття нечіткості багато в чому пов'язане з суб'єктивністю та приблизністю уявлень про якийсь показник системи. На відміну від імовірнісних, нечіткі величини характеризуються не імовірнісним законом розподілу, заснованому на статистиці, а функцією приналежності, ранжируючої

ступінь приналежності аналізованої величини: від повної не приналежності до повної. Нечітка інформація є найменш "точною" (неоднозначною), але вона в більшості випадків залишається єдиною, що характеризує процеси в металургійній практиці, особливо важкоформалізуються. Види невизначеності інформації, що розглядаються нижче та підтверджуються багатьма роботами, можуть бути представлені у вигляді дерева (рис. 2.1).

Верхній рівень цього дерева утворений головними причинами, що характеризують відсутню інформацію про елементи завдання. Невизначеність інформації для вирішення завдань предметної галузі визначається трьома складовими:

1. Складністю металургійних процесів як об'єктів досліджень.
2. Неповнотою знань про поточний стан процесу як у окремому його ділянці, і у цілому, що пов'язані з недостатньою визначеністю наших конкретних знань.
3. Нечіткістю ситуації, що з відсутністю точних кордонів областей визначень, і властивості більшості, якщо взагалі всім, поняттям.



Рисунок 2.1 - Класифікація причин невизначеності у вирішенні завдань предметної галузі

Нижній рівень дерева вказує на загальні причини невизначеності інформації в галузі досліджень:

1. Невідомість. У ситуації невідомості, наприклад, на перших стадіях

вивчення завдання, коли ще не вироблено вимог до критеріїв оцінки, коли невідомі вимоги замовника або можливості виконавця, а також, коли інформація про проблему практично відсутня.

2. Недостовірність. При зборі даних на початковому етапі досліджень може виявитися, що зібрана інформація має недостовірність, оскільки є ще не всі можливі та необхідні відомості, а для деяких елементів визначені не їх однозначні описи, а лише безлічі, яким ці описи належать;

3. Неадекватність. Неадекватність є мірою оцінки ступеня знань, інформації, моделі тощо. про дане явище та можливості застосування їх на практиці. При цьому суттєвим є методологічно обумовлене застосування чи розробка критеріїв оцінки адекватності.

2.1.2 Стан питання моделювання процесу управління подрібненням комплексом млин – гідроциклон

Розглянуті вище способи та методи моделювання процесів, що відбуваються при подрібненні рудних матеріалів у млинах та побудова на основі цих моделей АСУ ТПП передбачає розбиття всього процесу побудови системи на два послідовні етапи:

- побудова адекватної математичної моделі ТПП (ідентифікація процесу) на основі диференціальних рівнянь;
- з урахуванням побудованої математичної моделі синтез структури регулятора.

При русі цим шляхом ми стикаємося з низкою витрат:

а) на етапі ідентифікації технологічного процесу необхідно провести ряд складних та дорогих експериментів на реальних об'єктах управління і чим точніше ми хочемо побудувати модель, тим більше цих експериментів нам потрібно провести. Для побудови моделі на основі диференціальних рівнянь такого складного процесу, яким є ТПП, що враховує всі фізико-механічні та гідродинамічні перетворення з частинками подрібнюваного матеріалу та тілами, що мелють, кількість і тривалість подібних експериментів оцінці не піддається.

Т.о. існуючі математичні моделі мають дуже наближений характер і можуть відображати лише деякі тенденції технологічного об'єкта;

б) синтезована на основі свідомо неточних і огрублюваних моделей технологічного процесу модель управління несе в собі всі «врожені вади» прототипу і неминуче додає до них нові, пов'язані вже, наприклад, помилки обчислювальних процедур і методів;

в) у запропонованих системах автоматичного управління процесом подрібнення (і реальному виробництві) відсутня безперервний прямий контроль двох основних збурюючих чинників: крупності руди та її фізико-механічних властивостей, що свідчить, що й оперативна компенсація не передбачена. Таким чином, інформація про поточний фізико-механічний стан руди набуває досить умовного, приблизного і нечіткого вигляду. Ця обставина не дозволяє повною мірою використовувати переваги статичних моделей об'єктів управління, навіть застосовуючи сучасні обчислювальні потужності, що, відповідно, веде до огрублення процесу управління в цілому і є істотною перешкодою для досягнення необхідної якості управління подрібненням.

г) в силу об'єктивних виробничо-технологічних факторів, що склалися, в переважній кількості існуючих систем автоматичного управління технологічним процесом подрібнення основним є інерційний і "грубий" канал управління по витраті руди, що також вносить свій внесок у "розмивання" точності підтримки заданого технологічного режиму процесу.

Розглянуті основні напрями побудови АСУ ТПП складними технологічними процесами, що базуються на основі *якісних методів*, дозволяють зробити таке узагальнення:

— за допомогою існуючих на сьогоднішній день способів управління технологічними процесами на основі якісних методів можемо проводити аналіз та проектувати системи управління реальними об'єктами, які суттєво складні та погано визначені для застосування суворого кількісного аналізу (наприклад, якщо ми не знаємо детермінованої математичної моделі об'єкта чи процесу);

— алгоритмічна складність систем управління на основі якісних методик

значно нижча, ніж у детермінованих систем. Насправді це призводить до вищої технічної надійності та можливості ефективного оперативного управління;

- використання керувальних алгоритмів, побудованих на якісних методах, дає змогу застосовувати під час керування інформацію якісного типу, яку складно формалізувати в рамках традиційних законів регулювання. Як свідчить аналіз літературних джерел, нечіткі логічні регулятори демонструють низьку чутливість до збурень у визначеному діапазоні та забезпечують кращі показники порівняно з класичними регуляторами.

- формування бази керувальних правил для нечітких логічних регуляторів вимагає глибокого розуміння особливостей об'єкта керування, а також інтуїції та практичного досвіду оператора-технолога, який фактично виконує роль експерта.

2.2 Аспекти побудови моделей управління у нечіткому середовищі

Використовуваний аналізу математичний апарат звичайних множин виявляється недостатньо ефективним під час вирішення завдань предметної області. Крім того, у потоці аналізованих повідомлень велике місце займає якісна та суб'єктивна (притаманна «людському фактору» у прийнятті рішень) інформація, яка не може бути адекватно формалізована відомими математичними підходами. Щоб подолати зазначені труднощі, у ряді досліджень доведено, що відмова від класичних математичних моделей і перехід до методів теорії нечітких множин (ТНМ) дозволяє розв'язати проблему.

Застосування ТНМ характеризується відмовою від обробки одного, дискретного числа з одержуваних даних: у ТНМ використовується не одне, а безліч числових значень за наявності суворості математичного апарату, що дозволяє інтерпретувати і якісну інформацію кількісними співвідношеннями. Лінгвістичний підхід ТНМ дозволяє створювати інтелектуальні системи для надання допомоги та підвищення об'єктивності у прийнятті рішень щодо

прикладних завдань предметної галузі.

2.2.1 Елементи та визначення теорії нечітких множин

У теорії множин довільне підмножина A універсальної множини X однозначно визначається своїм індикатором

$$I_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{для } x \in A \\ 0 & \text{для } x \notin A \end{cases}$$

Л. Заде запропонував розширити клас підмножин X , вводячи нове поняття нечіткої множини. Нечіткий множині відповідає узагальнений індикатор (числові функції зі значеннями з усього відрізка $[0,1]$). Визначальні нечіткі множини узагальнені індикатори були названі функціями приналежності. Для нечіткої множини A значення функції належності $\mu_A(x)$ трактується як ступінь належності точки x певній множині A .

2.2.2 Типи нечітких чисел та арифметичні операції

Для вирішення завдань, у яких утруднено точний опис, або є достатня стійкість до невеликих змін параметрів функції приналежності, можна використовувати лінійну інтерполяцію. Якщо огинаюча складається з відрізків прямих, то НМ є нечітким числом (НЧ). НЧ є окремим випадком НМ (2.2) з функцією належності $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ $A \subset X$. Використання даних, виражених за допомогою НЧ, може дати більше інформації, ніж "точна" детермінована або інтервальна оцінка. НЧ показує одночасно "песимістичне" і "оптимістичне" уявлення про діапазон зміни аналізованої величини, а ядро НЧ містить найближче до детермінованого значення. При цьому запроваджується поняття унімодального НЧ LR-типу. Унімодальне НЧ LR-типу представляють у вигляді трійки параметрів.

Нечітке число A буде нечітким унімодальним числом (LR)-типу, якщо

$$\mu_A(X) = L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), \quad \forall x \leq a, \quad \alpha > 0$$

$$\mu_A(X) = R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), \quad \forall x \geq a, \quad \beta > 0$$

де a - середнє значення (мода) НЧ; α, β - відповідно лівий та правий коефіцієнти нечіткості; L, R - ідентифікатори лівого та правого коефіцієнтів нечіткості відповідно.

Таким чином, нечітке число можна подати у вигляді трійки параметрів $A=(a, \alpha, \beta)$ (Рис. 2.2).

При побудові моделей, що управляють, на основі нечіткої інформації використовують лінгвістичні змінні (ЛП) як найбільш відповідні мисленню людини.

Під ЛП розумітимемо кортеж: $\langle X, U, D, G, M \rangle$, де X - назва лінгвістичної змінної; U - безліч її значень, що є найменуваннями нечітких змінних, областю визначення кожної з яких є безліч дійсних чисел d ; D - безліч нечітких чисел, кожному з яких поставлено у відповідність найменування нечіткої змінної з множини u ; G - синтаксична процедура, що описує процес утворення з множини u нових значень ЛП; M - семантична процедура, що дозволяє приписати кожному значенню, яке утворюється процедурою g .

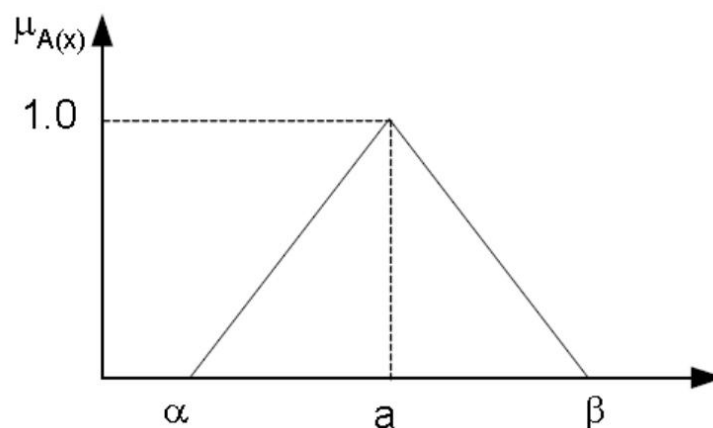


Рисунок 2.2 - Загальне уявлення НЧ LR-типу

Наприклад, *Рівень завантаження* (в кортежі, що позначається як X) стане ЛП, якщо вона асоціюється з терм-множиною значень: висока, середня, низька, дуже низька. Поняття ЛП дає відповідний засіб для опису різних процесів, зокрема, інтелектуальної діяльності [15].

Нечіткою лінгвістичною шкалою нечіткою лінгвістичною змінною S називатимемо пару $(T(s), M)$, де $T(s)$ – терм безліч $\{A_i\}$, $i = \overline{1, n}$, а M – відображення $M: T(s) \rightarrow F(R)$, де $F(R)$ – безліч чисел $\{U_i\}$ де $U_i = M(A_i)$.

Лінгвістична змінна застосовується для формалізації якісної інформації про технологічний процес, представленої в словесній формі операторами-технологами, які виступають як експерти.

У основі світосприйняття в людини лежить опозиційна шкала. Опозиційні шкали утворюються парами слів антонімів. Прикладами їх можуть бути *слабий - сильний, маленький - великий, легкий - важкий*.

Нечіткою опозиційною шкалою (НОШ) називатимемо лінгвістичну шкалу, терм-множина якої включає терми, що є антонімами.

У нечіткій опозиційній шкалі, як правило, марковані антонімами лише кінці шкали. Середині її, що відіграє роль початкової позиції, відповідає нейтральне значення, що врівноважує значення маркерів на кінцях шкали. Маркування проміжних понять досягається подальшим розподілом шкали і таким чином експерт ранжує свої понятійні оцінки. Подальше розширення НОШ за межі антонімів може здійснюватися за рахунок словосполучень типу *дуже сильний, дуже великий*.

У ряді робіт було математично обґрунтовано можливість виконання додаткових та розширених операцій над НЧ (LR) — типу та розв'язання нечітких рівнянь у введеному метричному просторі. Ця обставина дозволила значно спростити реалізацію обчислювальних процедур під час вирішення прикладних завдань побудови інтелектуальних АСУ, зокрема. ТПП.

2.3 Процедура побудови керуючої моделі як поліномів

В даний час для побудови БЗ НЛР найбільш розроблений композиційний метод виведення. Зазначений метод використовує подання інформації матриці нечітких відносин. Для реальних технологічних процесів кількість цих матриць та їх розміри стають надмірно великими, що суттєво обмежує застосування цього методу.

Забезпечення надійності та достовірності одержуваних результатів або висновків за експериментальними даними у чіткому інформаційному середовищі досягається застосуванням теорії планування експериментів. Це пов'язано з тим, що планований експеримент дозволяє:

- а) побудувати модель явища будь-якої складності за неповного знання його механізму;
- б) вибрати оптимальну стратегію дослідження за неповного знання процесу;
- в) при дослідженні складних явищ суттєво знизити кількість експериментів, що проводяться.

Однак нечітке інформаційне середовище, яким є результати експертної оцінки, застосування теорії планування експерименту потребує додаткового обґрунтування, особливо в частині адекватності отриманих рівнянь експериментальним даним.

Для обґрунтування застосування теорії планування експерименту на ЛП авторами методики були прийняті наступні вихідні пропозиції:

- поведінка досліджуваної системи описується експертом природною (або близькою до нього) мовою, що робить ЛП найбільш адекватним засобом представлення його знань, а перехід від словесних оцінок до числових не викликає труднощів за будь-якою зі шкал;
- світосприйняття людини ґрунтується на опозиційній шкалі, у якій чітко визначені лише крайні полюси, тоді як центральна частина має нейтральне значення між ними. Проміжні ступені уточнюються шляхом подальшого поділу

шкали, що дає можливість експерту упорядковувати свої оціночні поняття.

- опозиційна шкала, яка містить k значень лінгвістичних перемінних, фактично є шкалою з $k-1$ рівними інтервалами. Її поділи розміщені на психологічному континуумі на однакових відстанях, що забезпечує однакову ймовірність помилки під час класифікації значень лінгвістичних перемінних.

- в силу домінування в експерта аналітичного мислення, що полягає у поданні вхідних змінних як незалежних (експерту буває важко визначити ступінь їх корелювання), застосування методів теорії планування експерименту найбільш природно відповідає понятійній моделі описуваного процесу, що існує в його свідомості.

Працюючи з експертом опитування планують, тобто задають експерту значення вхідних ЛП. Тоді, згідно з обраним підходом, до опитування експерта можна підходити апроксимуючи результати аналітичною функцією виду:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_j X_i + \sum_{u,j=1}^N \beta_{uj} X_j Y_u, \quad j \neq u$$

де Y_i - величина вихідний ЛП управління (керуючого впливу); X_i – величина вхідний ЛП управління.

Традиційні процедури опитування експертів ґрунтуються на варіюванні в кожному наборі вхідних змінних однієї з них. Однак такий підхід має такі недоліки:

- а) при великій кількості оцінюваних параметрів різко зростає обсяг інформації, що експертується;

- б) велика кількість експертної інформації викликає фізичну та психологічну втоми експерта, що веде до збільшення обсягу помилкових оцінок;

- в) втоми експерта призводить до збільшення часу створення моделі, що може призвести до порушення критичності експерта до своїх оцінок і накопичення помилок.

Для отримання явно вираженої тенденції (центру планування) доцільно по кожній із вхідних ЛП вибирати непарну кількість інтервалів розбиття, тому що це дає можливість оцінки адекватності функції думки експерта.

Обробка результатів опитування проводитиметься за допомогою переходу від лінгвістичних змінних до кодованих змінних, що варіюються в однакових діапазонах.

Алгоритм отримання рішення поставленого завдання виглядає як на рис.2.3:

1) *Визначення факторного простору досліджуваного процесу.* Цей етап включає визначення факторного простору:

- виявлення за допомогою експерта максимально більшої кількості факторів, що впливають з усього різноманіття технологічних параметрів об'єкта управління;

- за допомогою експерта та на основі загальних знань про об'єкт управління та застосовувані на практиці способи управління ним виділення найбільш суттєвих факторів;

- вибір лінійно-незалежних та керованих факторів здійснюється експертом на основі загальних знань про об'єкт управління та застосовувані на практиці способи управління об'єктом;

- на основі інформації про існуюче метрологічне забезпечення об'єкта управління та даних матеріального та теплового балансів технологічного агрегату, а також за допомогою обчислення автокореляційної функції технологічних параметрів на основі реальних розрахунків рівня квантування факторів.

2) *Визначення меж опозиційної шкали та термів за кожним фактором.* Етап включає визначення меж опозиційної шкали:

- за допомогою експерта визначення кількісної чи якісної оцінки нижньої та верхньої меж обраного фактора – ЛП. У цьому кожному за чинника необхідно визначити поріг чутливості. Так, порогом чутливості експертної оцінки праворуч назовемо значення вхідної ЛП x_i , після якого V_{xi} виконується умова

$$Y_e = f(X_r) = f(X_i); \quad r < i \leq n, \quad X_n = X_{max}$$

Y_e - мінімальне або максимальне значення вихідний ЛП у;

Порогом чутливості експертної оцінки ліворуч назвемо значення вхідний ЛП x_l , після якого $\forall x_i$ виконується умова

$$Y_e = f(X_l) = f(X_i); \quad 1 \leq i < l, \quad X_l = X_{min}$$

- визначення кількості поділів (терм-множин) розбиття шкали та їх назв – бажано вибрати нечітку кількість термів;
- визначення ступеня «розмитості» - нечіткості поняття (визначення α та β , значення термова);

3) *Формування матриці експертного опитування* (матриці продукцій) виконується на основі підходів теорії планування експерименту з урахуванням можливості проведення дробового варіанта повного факторного експерименту. У такому випадку кількість запитів до експерта дорівнює 2^n для повного експерименту або 2^{n-p} для дробового, де n — число факторів, а p — показник дробності. Наприклад, якщо $n = 3$ та $p = 1$, то експерта потрібно опитати 4 рази. Відповідна матриця планування представлена нижче (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Перша напіврепліка повного факторного експерименту типу 2^3 (планування типу 2^{3-1})

№	Фактори X_i				Відгук Y
	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+	-	-	+	у
2	+	+	-	-	у
3	+	-	+	-	у
4	+	+	+	+	у

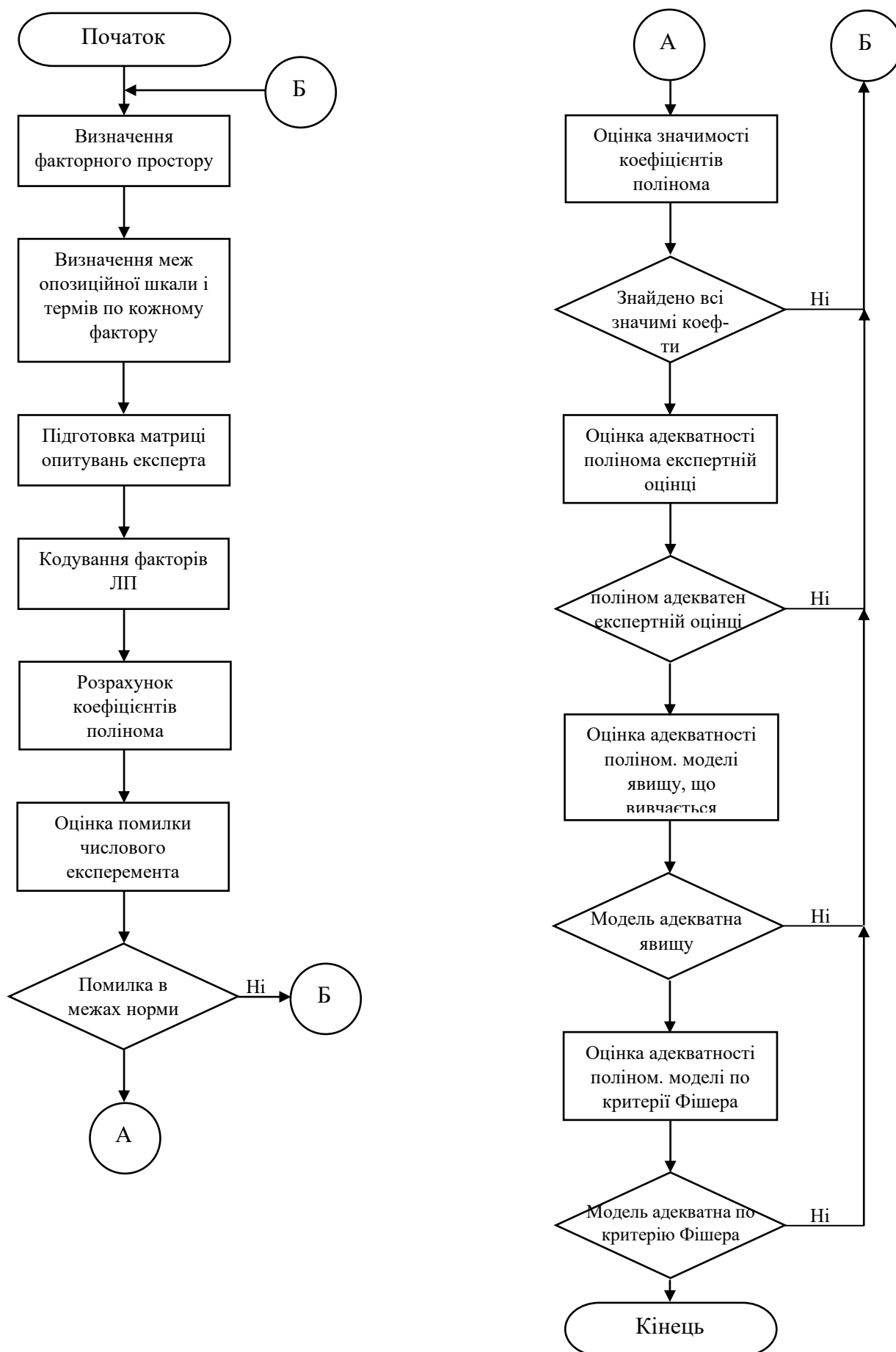


Рисунок 2.3 - Алгоритм побудови керуючої моделі у вигляді поліномів

Нехай є n вхідних ЛП X_j , одна вихідна ЛП Y і під час роботи з експертом ми можемо планувати опитування, тобто. ставити експерту значення вхідних ЛП. Тоді набір значень $A_{ij} \in T(X_j)$, де $\forall j = \overline{1, m}; \forall i = \overline{1, n}$ назовемо планом опитування. Матрицю

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1p} & A_{2p} & \dots & A_{np} \end{pmatrix}$$

назовемо *матрицею плану опитування*.

Розрахунковою матрицею плану опитування називатимемо матрицю C , у якій елемент C_{ij} є перекладеним методом точної інтерпретації у чіткий вигляд значенням A_{ij} .

4) Кодування факторів - ЛП (переведення в метрику)

Полягає у перетворенні шкали назв термів на метрику на інтервалі $[-1, +1]$.

У кодованій розрахунково матриці плану C (надалі просто матрицею плану C) виконуються умови

$$C_{ij} = \frac{(C'_{ij} - \bar{C}_j)}{S_j}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, p}$$

де

$$\bar{C}_j = \frac{(C'_{1j} - C'_{nj})}{2}, \quad S_j = \frac{(C'_{nj} - C'_{1j})}{2}$$

а C'_{ij} є переведеним у чіткий вид значенням ЛП A_{ij} , отриманим згідно з прийнятими пропозиціями при

$$C_{1j} < C_{2j} < \dots < C_{nj}$$

5) Розрахунок коефіцієнтів полінома

Полягає в перекладі залежних ЛП (Y) у чітку шкалу та виконанні традиційних дій з матрицею опитування, прийнятих у теорії планування експерименту методом найменших квадратів.

У цьому необхідно особливо стежити, щоб дотримувалося умова ортогональності матриці планування, тобто. стовпці матриця плану C були попарно ортогональні, або виконувалася умова:

$$\sum_{i=1}^p C_{il} C_{is} = 0, \quad l \neq s$$

Якщо кодована матриця плану опитування C ортогональна та її ранг дорівнює числу невідомих коефіцієнтів виразу

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_j X_i + \sum_{u,j=1}^N \beta_{uj} X_j Y_u$$

то вони некореловані, визначаються з мінімальною помилкою та є незміщеними. Отже, під час роботи з експертом ми можемо ставити йому значення вхідних ЛП за планом, тобто. до опитування експерта можна підходити з погляду теорії планування експерименту, апроксимуючи результати аналітичною функцією, у якій коефіцієнти β_j визначаються за формулами:

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} Y_i}{N}$$

де N – кількість експериментів.

Наведений алгоритм побудови адекватної прогностичної моделі проілюстровано на рис.2.4.

б) Оцінка помилки чисельного експерименту

а) полягає у порівнянні значення вільного члена полінома b_0 з оцінкою думки експерта в центрі планування факторного простору явища, що вивчається, або порівнянням розрахункових і фактичних значень вихідних параметрів з експериментальними даними:

$$s_{\text{ош}} = b_0 - \bar{y}$$

де b_0 – вільний член у поліномі, побудованому за експертними даними; y – значення величини управляючого впливу у центрі планування, отримане за результатами опитування експерта.

б) помилку отримуємо шляхом розрахунку інтервалу нечутливості процесу за основним показником ведення випалу при існуючому метрологічному забезпеченні технологічного агрегату

$$s_{\text{ош}}^2 = f(\text{помилка засобів зміни}).$$

2.4 Способи перевірки адекватності моделі управління технологічним процесом у нечіткому середовищі

Методика перевірки адекватності у сенсі має на увазі цілу систему перевірок відповідності результатів роботи моделі та її складових виробничим даним у широкому діапазоні зміни змінних. Без перевірки адекватності може бути мови про моделі як такої, т.к. неадекватність призводить до необхідності розробки нової моделі або її ідентифікації.

Зазначимо, що найбільш прийнятною нагодою можна вважати існування кількох незалежних способів перевірки гіпотези про адекватність, Необхідними

етапами визначення структури керуючої моделі та визначення її коефіцієнтів слід прийняти такі процедури:

- оцінка значимості коефіцієнтів моделі;
- оцінка адекватності побудованої моделі управління процесом загалом.

Оцінка значимості коефіцієнтів полягає у виділенні тих коефіцієнтів, значення яких вище за помилку їх визначення за t - критерієм Стюдента;

Оцінка адекватності моделі управління загалом визначається:

а) як результат близькості відповідей кількох експертів та чисельного експерименту. Перевіряється відповідність відповідей експерта на питання, що не входили до експериментів при побудові керуючої моделі, значенням, розрахованим за допомогою керуючої моделі при тих же вихідних даних;

б) як результат близькості фізичного та чисельного експериментів. Перевіряється за критерієм Фішера як відношення двох дисперсій - залишкової і змінної, що управляє, за досить великою вибіркою;

в) як результат близькості фізичного та чисельного експериментів. Перевіряється також оцінкою значущості коефіцієнта кореляції між розрахунковими та фактичними значеннями управляючих впливів.

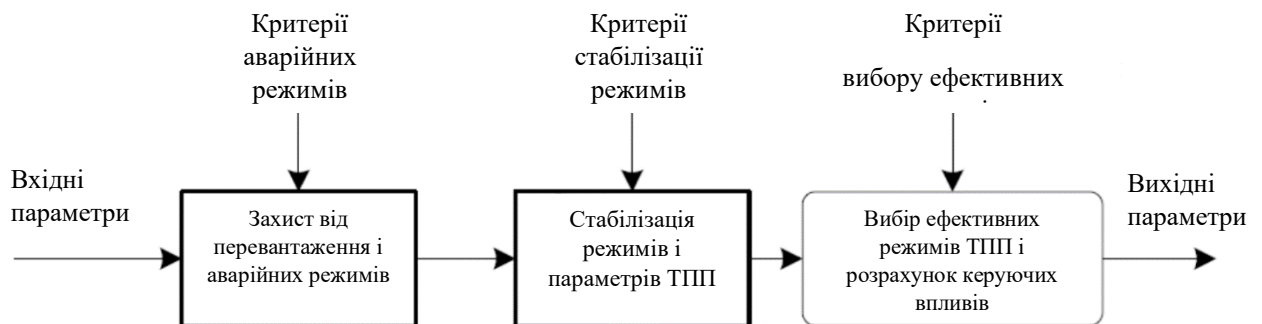


Рисунок 2.4 - Узагальнена структурна схема послідовності та умов виконання алгоритмів управління ТПП

2.5 Узагальнена структура підсистеми управління на базі інтелектуальних алгоритмів та нечіткої логіки

Узагальнена структура блоку інтелектуальних алгоритмів на базі нечіткої логіки, в якій як БЗ НЛР виступає модель, що управляє, у вигляді полінома, представлена на рис. 2.5.

Робота системи будується в такий спосіб.

Вхідні сигнали, що відображають величину технологічних параметрів, надходять у *Блок формування нечітких чисел*. Блок з масивів вхідних технологічних сигналів, що надходять із встановленим інтервалом часу, формує матриці вхідних ЛП у вигляді набору нечітких чисел (LR)-типу. Інтервал оновлення такого набору буде приблизно на порядок більший, ніж час оновлення вхідного масиву.

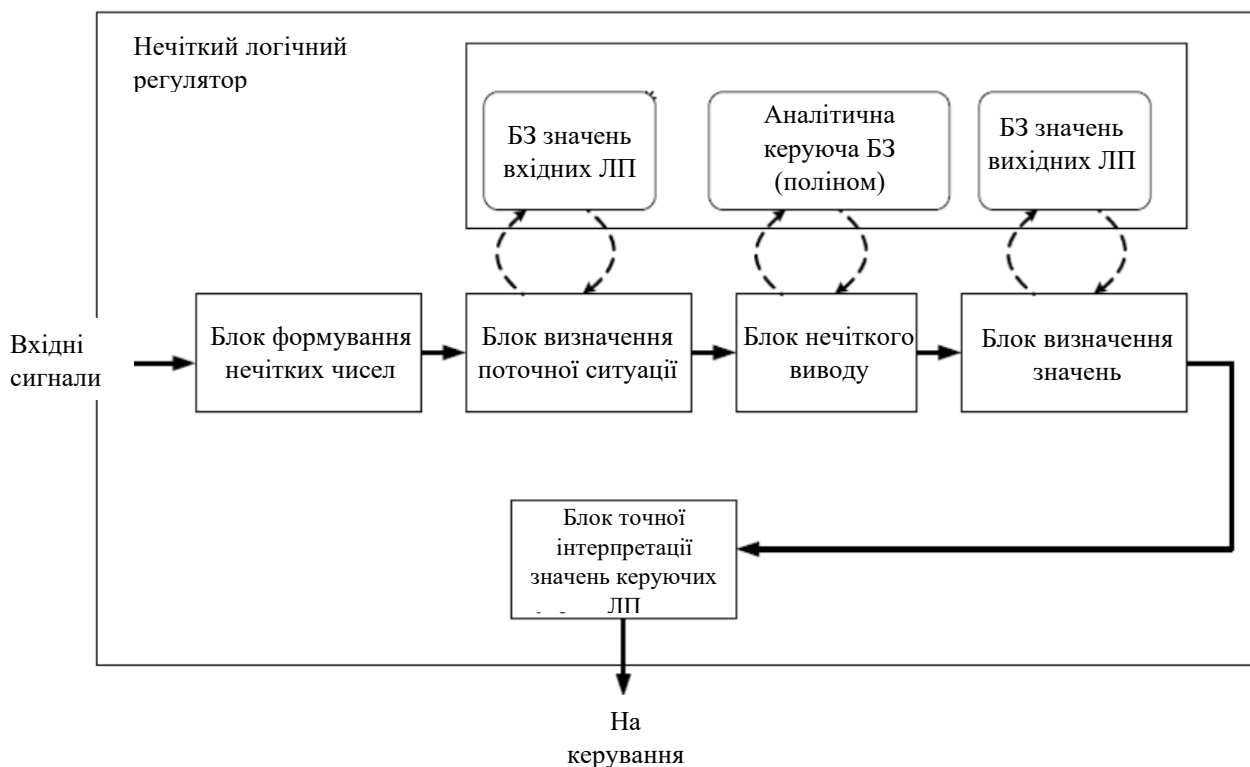


Рисунок 2.5 - Узагальнена схема управління на базі нечіткого логічного регулятора

Блок визначення поточної ситуації служить для порівняння сформованої матриці нечітких чисел для поточного моменту часу зі стандартними множинами ЛП та приведення нечітких значень X_i до кодованого виду. Визначення поточного стану та кодування здійснюється за допомогою блоку *БЗ значень вхідних ЛП*. Ця БЗ містить у формалізованому вигляді дані про числові значення термів для кожної вхідної ЛП (рис. 2.4), отримані на основі знань експерта - технолога.

У блоку *нечіткого виводу* розраховуються величини керуючих впливів для поточного моменту часу шляхом підстановки кодованих значень вхідних ЛП в *аналітичну управляючу БЗ (поліном)*.

У цьому блоці містяться дані про величину коефіцієнтів полінома.

Далі розрахована інформація про величину управляючих впливів надходить у блок *визначення значень керуючих ЛП*, який служить для встановлення відповідності набору сформованих нечітких чисел для поточного моменту часу одному з формалізованих станів технологічного процесу. Визначення поточного стану здійснюється за допомогою блоку *БЗ значень вихідних ЛП*. Ця БЗ містить у формалізованому вигляді дані про числові значення термів для кожної вхідної ЛП, отримані на основі знань експерта - технолога.

Заключний етап обробки поточних параметрів проводиться у *Блоку точної інтерпретації значень керуючих ЛП*. Цей блок містить алгоритм перетворення розрахованих значень керуючих величин з нечіткого виду на загальноприйнятий чіткий, зрозумілий для подальшої обробки низовою технологічною автоматикою.

Слід зазначити, що представлена схема носить декларативний характер, тобто. не містить окремих алгоритмічних побудов і в нашій роботі наведена для найбільш наочного уявлення механізму роботи інтелектуальної підсистеми управління на базі нечіткого логічного регулятора.

2.6 Модель процесу подрібнення у циклі підготовки до збагачення

Під час розгляду математичної моделі процесу подрібнення враховувалися результати, отримані вище.

На рисунку 2.6 показаний технологічний процес подрібнення в циклі підготовки збагачення. Насосом №1 з акумулюючої ємності (пульпобака) №2 технологічні хвости залізорудного виробництва подаються на знешламлюючий гідроциклон ГЦ 1400, піски з якого направляються в кульовий млин №4, де відбувається процес доподрібнення, злив з млина МШР 3600x50 подається на класифікуючі гідроциклони ГЦ-710 №7, піски з якого йдуть назад до млина, а слив з гідроциклону №7 подається на згущення, будучи згодом вихідним живленням флотації.

Продуктивність млина оцінюється за споживаною потужністю, при цьому враховується витрата вихідної сировини по датчику №8, далі система управління виробляє вплив на електродвигун насоса №1, що управляє, через перетворювач частоти.

Для якісного перебігу процесу, живлення повинно мати необхідний регламентний гранулометричний склад та густина живлення. Густина живлення в даній системі аналізується густоміром №11, інформація з якого подається системі управління №9, яка виробляє керуючий вплив на клапан подачі оборотної води №12, який одночасно є витратоміром (клапан-витратомір). Величина продукту аналізується приладом вимірювання крупності №10.

У подібних системах додатково може враховуватись контроль рівня пульпи в млиновому зумпфі, а також тиск на вході в гідроциклон. Щоб проаналізувати поведінку процесу подрібнення та класифікації в динаміці, при зміні витрати вихідної сировини в процес подрібнення та витрати води в зумпф млина, при різних коефіцієнтах поділу на піски та злив усередині гідроциклонів, що імітують зміну різних фізико-хімічних властивостей сировини, було поставлено ряд імітаційних експериментів у середовищі Matlab Silab.

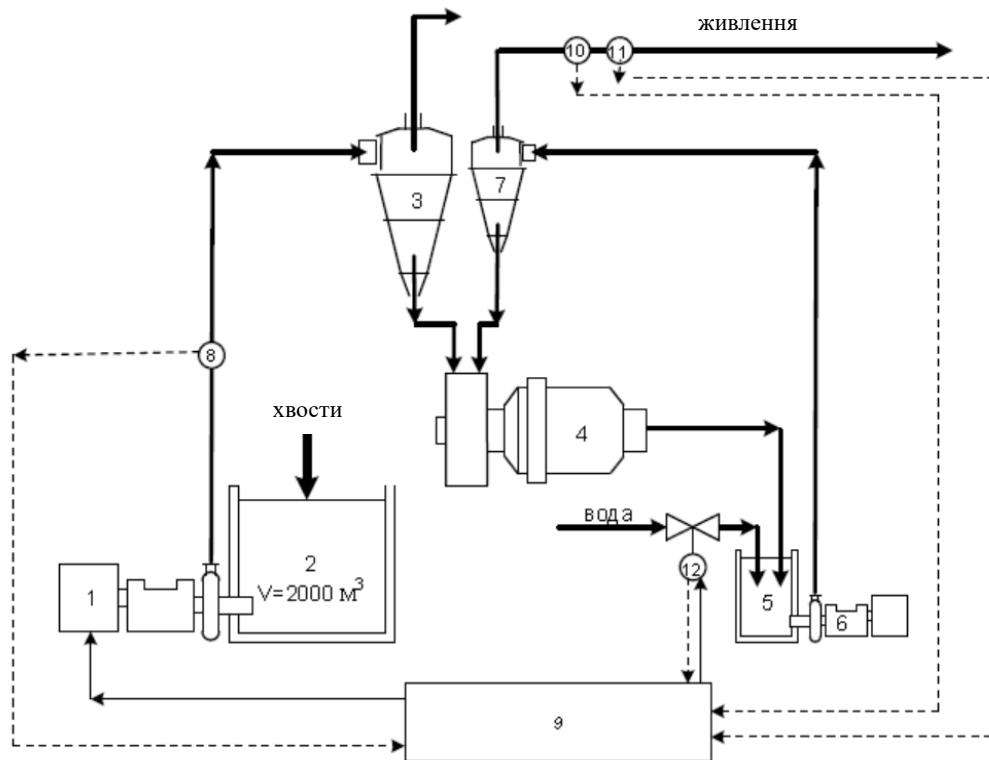


Рисунок 2.6 - Технологічний процес подрібнення

2.7 Схема моделі серед Matlab/Simulink для проведення обчислювального експерименту

Нижче на рисунку 2.7 наведена модель, створена в середовищі Matlab/Simulink з метою проведення обчислювального експерименту. Ця модель побудована згідно з рисунком 2.6.

Таблиця обчислювального експерименту

У таблиці 2.2 показані дані для трьох різних експериментів, в яких комбінувалися завдання з вихідного живлення і подачі води в зумпф гідроциклону, при фіксованих коефіцієнтах відбору матеріалу в піски і злив гідроциклонів №3 і №7 (згідно з малюнком 2.6). Результати експериментів №1, №2, №3 представлені як графіки рисунку 2.8. Під продуктами в результатах експериментів мається на увазі злив із гідроциклонів №3 та №7 згідно з рис. 2.6.

Таблиця 2.2 – Дані для експериментів №1, №2, №3

№ екс-ту	Завдання з живлення (завдання 1)	Завдання подачі води у зумпф (завдання 2)	Коеф. відбору в злив після гід-ну 3	Коеф. відбору у піски після гід-ну 3	Коеф. відбору в злив після гід-ну 7	Коеф. відбору в піски після гід-ну 7
Тимчасові характеристики						
1.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3
2.	Constant1=1	Constant2 =0	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3
3.	Constant1=0	Constant2 =1	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3

Дослідження поділу матеріалу в гідроциклонах на злив та піски.

На рис. 2.9 наведена модель, створена серед Matlab|Simulink, для дослідження системи управління з використанням підсистем. Структура підсистем Subsystem 1 та Subsystem 2 показана на рисунках 2.10 та 2.11. У цих підсистемах проводиться обчислення індексу оцінки якості готового продукту. Далі здійснюється наступне коригування управління відповідно до отриманих значень.

У таблиці 2.3 показані вихідні дані для п'яти різних експериментів, згідно з моделлю з підсистемою (рисунок 2.9), в яких, при фіксованому завданні з витрат вихідного живлення і витрати води в млиновий зумпф комбінувалися різні коефіцієнти поділу матеріалу на піски і злив у гідроциклонах №3 і №7 (згідно рисунок. Результати експериментів №№4-8 представлені як графіків на рис. 2.12- 2.16.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані для експериментів №№4-8

№ екс-ту	Завдання з живлення (завдання 1)	Завдання подачі води у зумпф (завдання 2)	Коеф. відбору в злив після гід-ну 3	Коеф. відбору у піски після гід-ну 3	Коеф. відбору в злив після гід-ну 7	Коеф. відбору в піски після гід-ну 7
Тимчасові характеристики						
4.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.3	k3 =0.7	k2=0.7	k4 = 0.3
5.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.4	k3 =0.6	k2=0.6	k4 = 0.4
6.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.5	k3 =0.5	k2=0.5	k4 = 0.5
7.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.6	k3 =0.4	k2=0.4	k4 = 0.6
8.	Constant1=1	Constant2 =1	k1=0.7	k3 =0.3	k2=0.3	k4 = 0.7

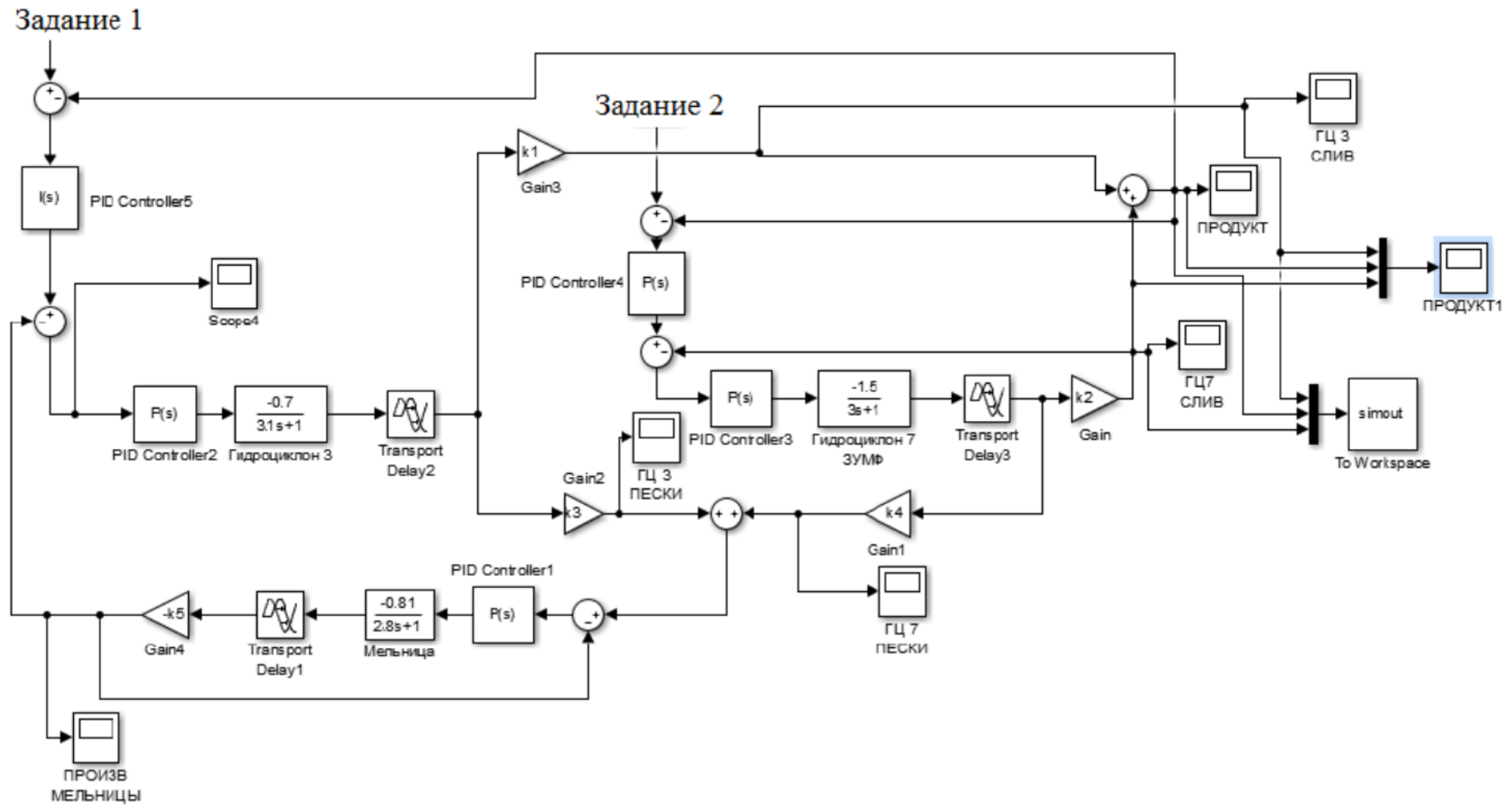
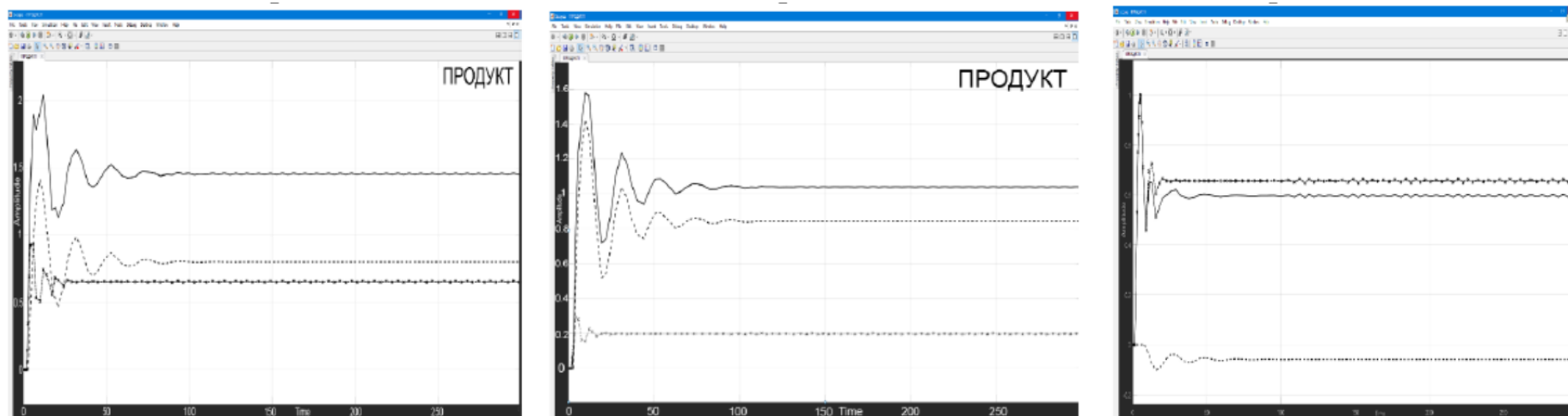


Рисунок 2.7 - Схема моделі технологічного процесу подрібнення в Matlab / Simulink



—— - продукт, --- - гідроциклон №3, -.-*- - гідроциклон №7

Рисунок 2.8 - Результати експериментів №1, №2, №3 серед Matlab|Simulink

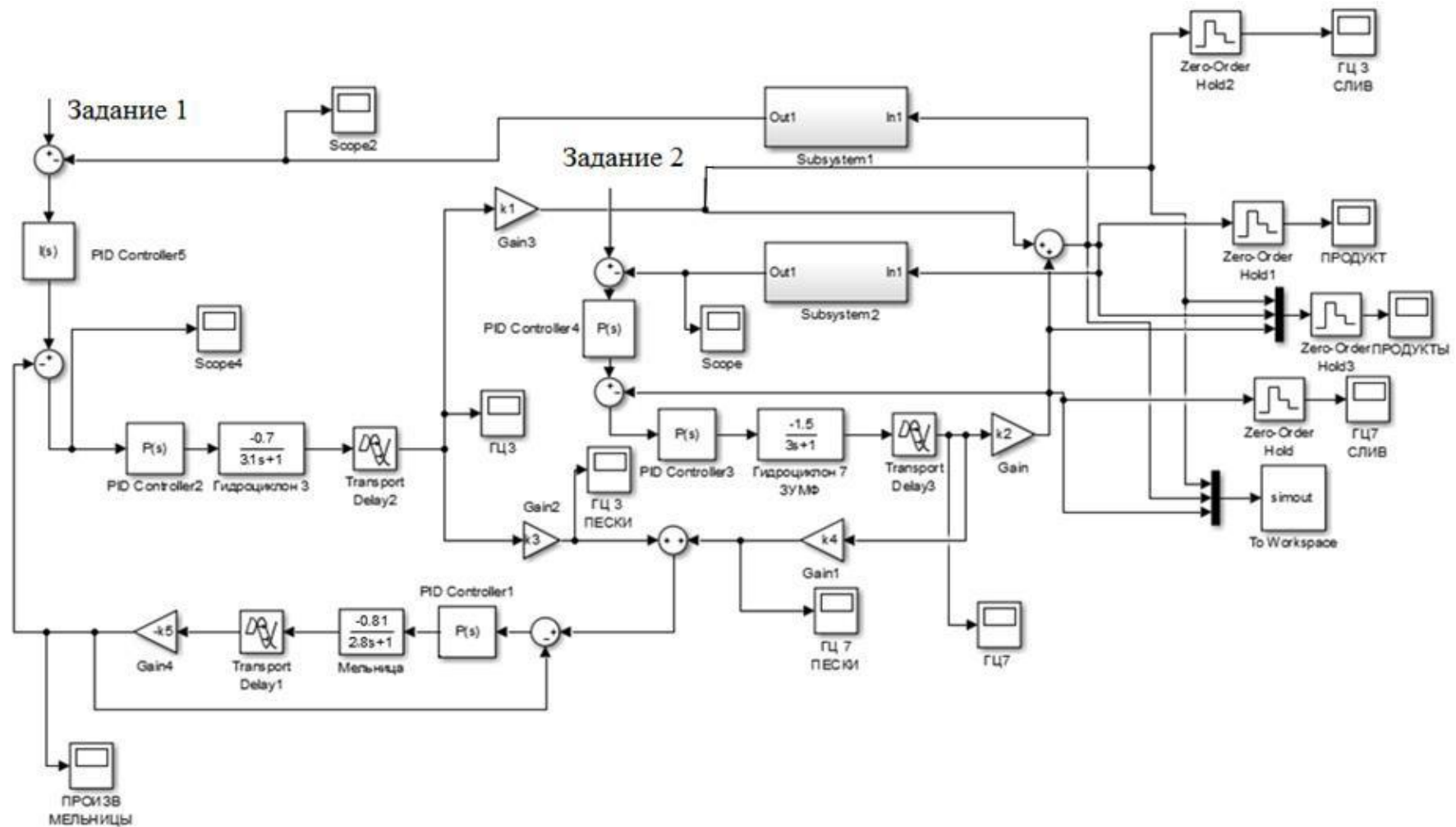


Рисунок 2.9 - Схема моделі для дослідження системи керування з використанням підсистем

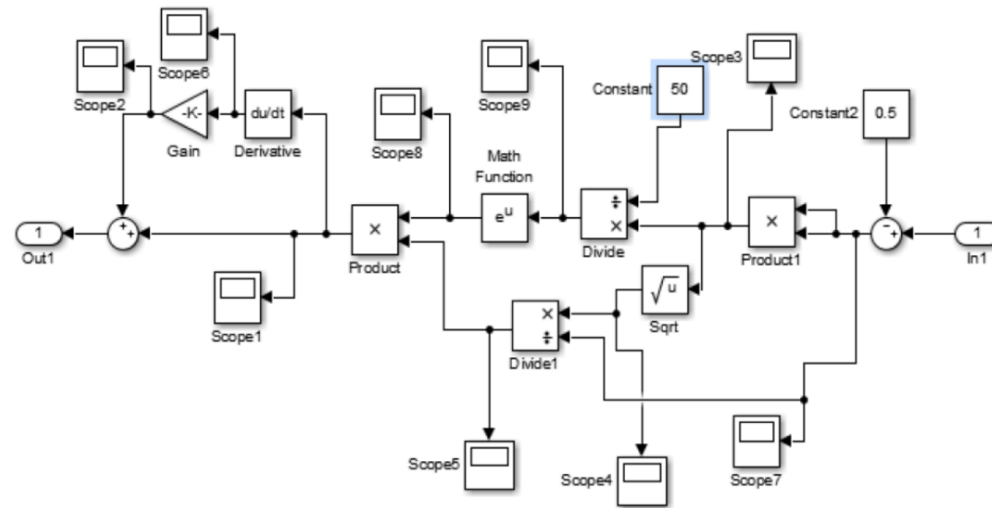


Рисунок 2.10 - Обчислення індексу оцінки якості продукту за поточною крупністю продукту

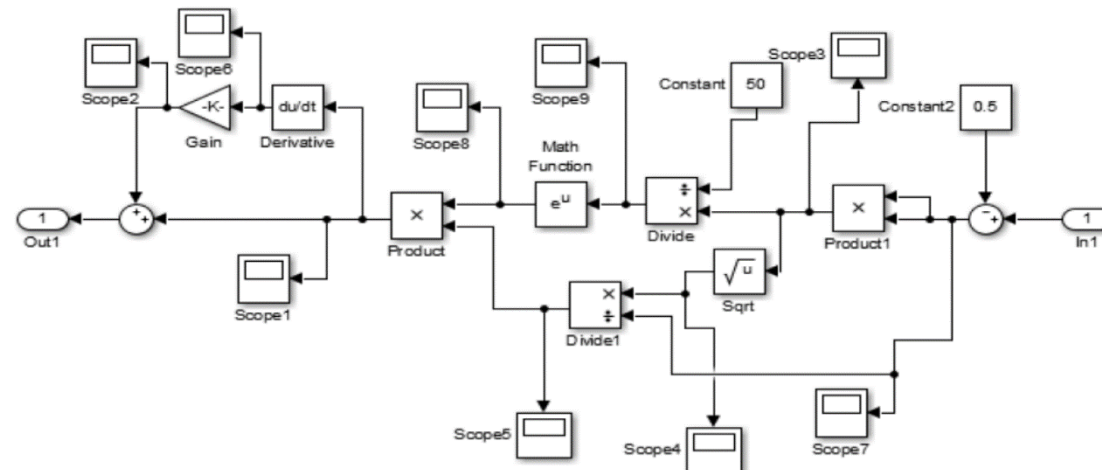
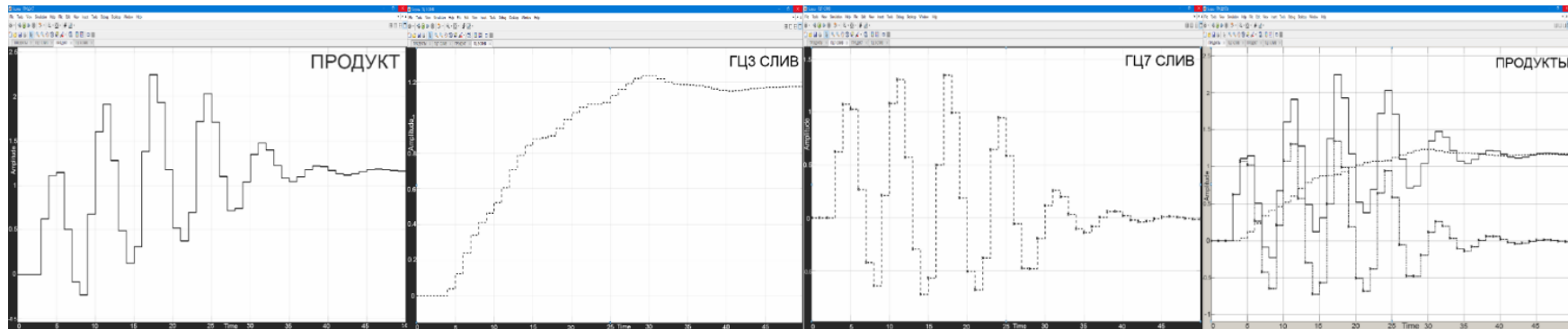


Рисунок 2.11 - Обчислення індексу оцінки якості продукту за поточною густиною продукту



—— - продукт, — — — - гідроциклон №3, - - - - - гідроциклон №7

Рисунок 2.12 - Результаты эксперимента №4 серед Matlab|Simulink

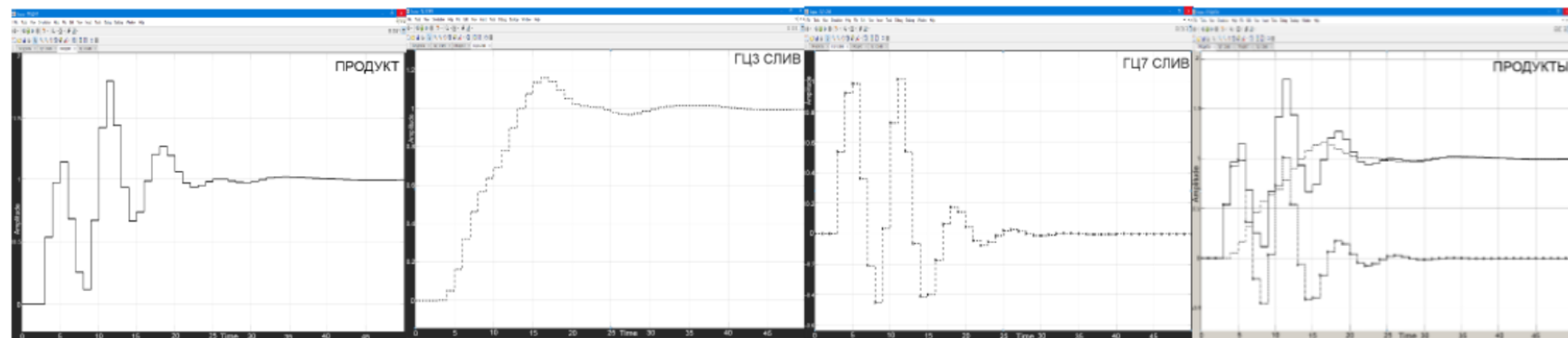


Рисунок 2.13 - Результаты эксперимента №5 серед Matlab|Simulink

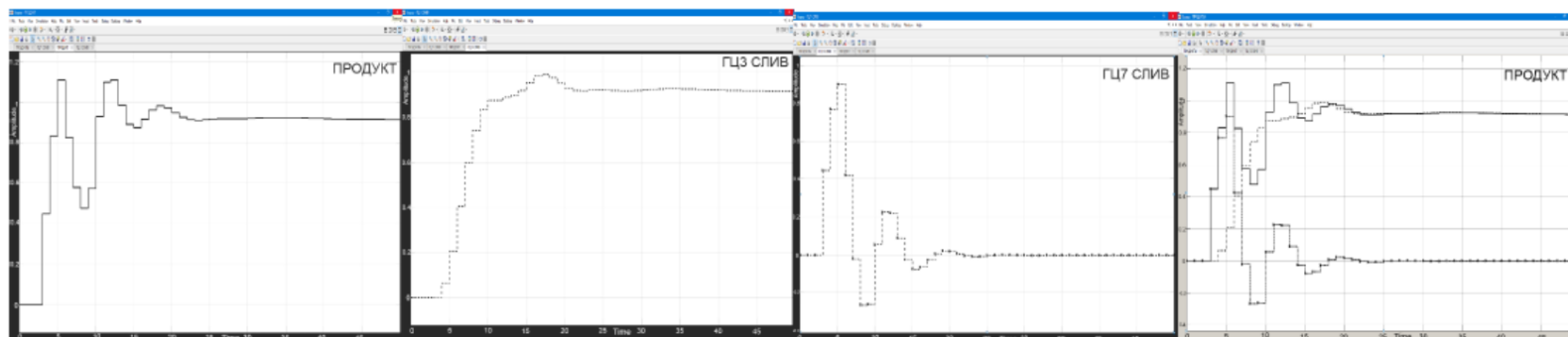


Рисунок 2.14 - Результаты эксперимента №6 серед Matlab|Simulink



Рисунок 2.15 - Результаты эксперимента №7 серед Matlab|Simulink

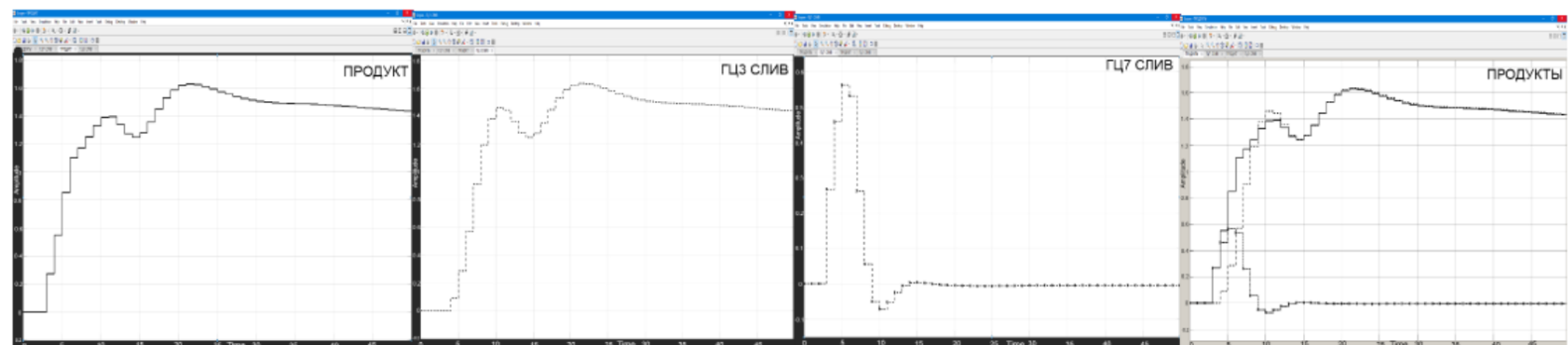


Рисунок 2.16 - Результаты эксперимента №8 серед Matlab|Simulink

Висновки до розділу

Наведено основні аспекти побудови інтелектуальних алгоритмів управління на базі нечіткої логіки, а також елементи та визначення теорії нечітких множин та типи нечітких чисел;

Подано узагальнену структуру та механізм роботи нечіткого логічного регулятора, що використовується при побудові інтелектуальної підсистеми управління для технологічних процесів;

Наведено алгоритм та умови, яких необхідно дотримуватися при побудові БЗ нечіткого логічного регулятора як одного з елементів системи управління технологічним процесом, що важко формується;

Наведено процедуру створення керуючої моделі в нечіткому середовищі у вигляді поліномів на основі ідей планованого експерименту, що дозволяє побудувати ортогональний план ланцюжків причинно-наслідкових зв'язків типу "Якщо.... то...";

Наведено основні положення та способи перевірки адекватності роботи інтелектуальних алгоритмів управління технологічним процесом на базі нечіткої логіки, виконання яких обов'язково при побудові АСУ ТПП за допомогою обраної методики побудови інтелектуальних алгоритмів.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Розробка структурної логічної схеми АСУ з урахуванням інтелектуальних алгоритмів процесу подрібнення

3.1.1 Загальний опис структурної схеми АСУ технологічного процесу подрібнення та призначення її підсистем

Структурна схема, реалізує управління технологічним процесом подрібнення рудних матеріалів комплексі млин - гідроциклон з урахуванням інтелектуальної підсистеми, представлена на рис. 3.1.

Система включає технологічний подрібнювальний комплекс, а також наступні керуючі підсистеми і блоки:

– *I* - підсистема локального автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів. Призначення підсистеми – збір поточних значень та попередня обробка (згладжування, фільтрація, усереднення та ін.) акустичної та вібраційної складової показника об'ємного завантаження млина МШЦ-1А, отриманих від пов'язаних з віброакустичним аналізатором ВАЗМ-1 інформаційно-вимірювальних каналів 1 і 3 зливу гідроциклону та виходу готового класу 4 і 5 відповідно, тиску на вході гідроциклону 6, активної потужності двигуна млина 7.

Крім того, за завданням ієрархічно більш високих підсистем даною підсистемою формуються і реалізуються керуючі впливу на комплекс через виконавчі канали: подача води до млина 8, подача руди до млина 9, подача води в ЗУМПФ 10, частота обертів насоса гідроциклону 11.

– *II* – підсистема захисту обладнання від перевантажень. Основне призначення підсистеми - забезпечити реалізацію алгоритмів, що управляють, для роботи комплексу в найбільш економічних субкритичних режимах без

ризиків виходу в аварійні режими перевантажень. Конкретні величини уставок цих режимів для кожного інформаційного каналу окремо, а також пов'язані з цими режимами протиаварійні заходи у нашій роботі не розглядаються.

Вироблювані їй управляючі сигнали мають найвищий пріоритет у виконанні кожному циклі роботи всього алгоритму управління, тобто. підсистеми III і IV працюють лише після відпрацювання всіх ступенів у підсистемі захисту II та за відсутності ознак виникнення аварійної ситуації.

Обробка вхідної інформації даним блоком, а також вироблення відповідних керуючих впливів повинна проводитися не менш ніж у два рази частіше, ніж вироблення по єдиному всім підсистем керуючого циклу.

– III - підсистема стабілізації параметрів в режимах, що встановилися. Призначення підсистеми – забезпечити за допомогою існуючих засобів локальної автоматики на базі існуючих апаратно-програмних засобів реалізацію контурів регулювання за відхиленням для кожного з технологічних параметрів з урахуванням існуючих пріоритетів та можливостей управління.

– IV – інтелектуальна підсистема управління з БЗ у вигляді полінома. Призначення підсистеми – реалізація способу управління відповідно до критерію ефективності роботи комплексу технологічного процесу подрібнення, досягнення та підтримки його роботи у найбільш ефективних галузях факторного простору. Основою керуючого алгоритму даної підсистеми є БЗ у вигляді аналітичних поліномів, для побудови та перевірки адекватності якої було використано знання та досвід кращих операторів-технологів ОФ.

– V – блок вибору режиму керування. Призначення підсистеми – забезпечити перемикання АСУ технологічного процесу подрібнення в один із наведених нижче режимів залежно від величини поточного значення індикатора об'ємного завантаження млина Z_v та індексу навантаження I_n . Підсистема встановлює належність поточного значення основних параметрів до однієї з областей управління та в залежності від належності поточного стану комплексу однієї з них проводиться вибір відповідного способу управління.

– VI – єдиний графічний інтерфейс користувача. Призначення підсистеми

– відображення всієї повноти інформації про поточний стан технологічного процесу подрібнення, забезпечення введення керуючих впливів при ручному режимі управління, а також введення граничних значень при налаштуванні підсистем II, III, IV.

Загальний контроль та управління комплексом здійснюється оператором – технологом.

3.1.2 Алгоритм взаємодії підсистем АСУ технологічного процесу подрібнення

У процесі управління комплексом млин – гідроциклон на ОФ у різних робочих областях управління реалізується в такий спосіб.

Отримані по інформаційних каналах та оброблені в підсистемі I дані від вимірювальних каналів 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, які відображають поточний стан об'ємного завантаження млина, рівень пульпи в ЗУМПФі, щільність зливу гідроциклону, потужність активу (рис. 3.1) надходять на вхід підсистеми II для встановлення по кожному інформаційному каналу їх належності критичним діапазоном та розрахунку узагальненого індексу навантаження I_n .

На час вступу інформації про вихід технологічних параметрів за встановлені обмеження, тобто. виникненні передаварійної (аварійної) ситуації з будь-якого з інформаційних каналів 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (або інших, що не розглядаються нашою роботою), або індексу навантаження I_n , підсистема II подає в перемикаючий блок V сигнал про переведення комплексу млин-гідроциклон у ручний режим управління та блокування роботи підсистем III, IV.

У разі відсутності аварійної ситуації для технологічного процесу подрібнення на рівні підсистеми II дані про поточний стан подрібнення надходять на вхід підсистеми V для визначення поточної робочої області A), Б), В), Г), Д), яка ідентифікується за основним ($Зв$) та допоміжним (I_n) параметром і перемиканням режимів А А), управлінням в області Б), ..., управлінням в

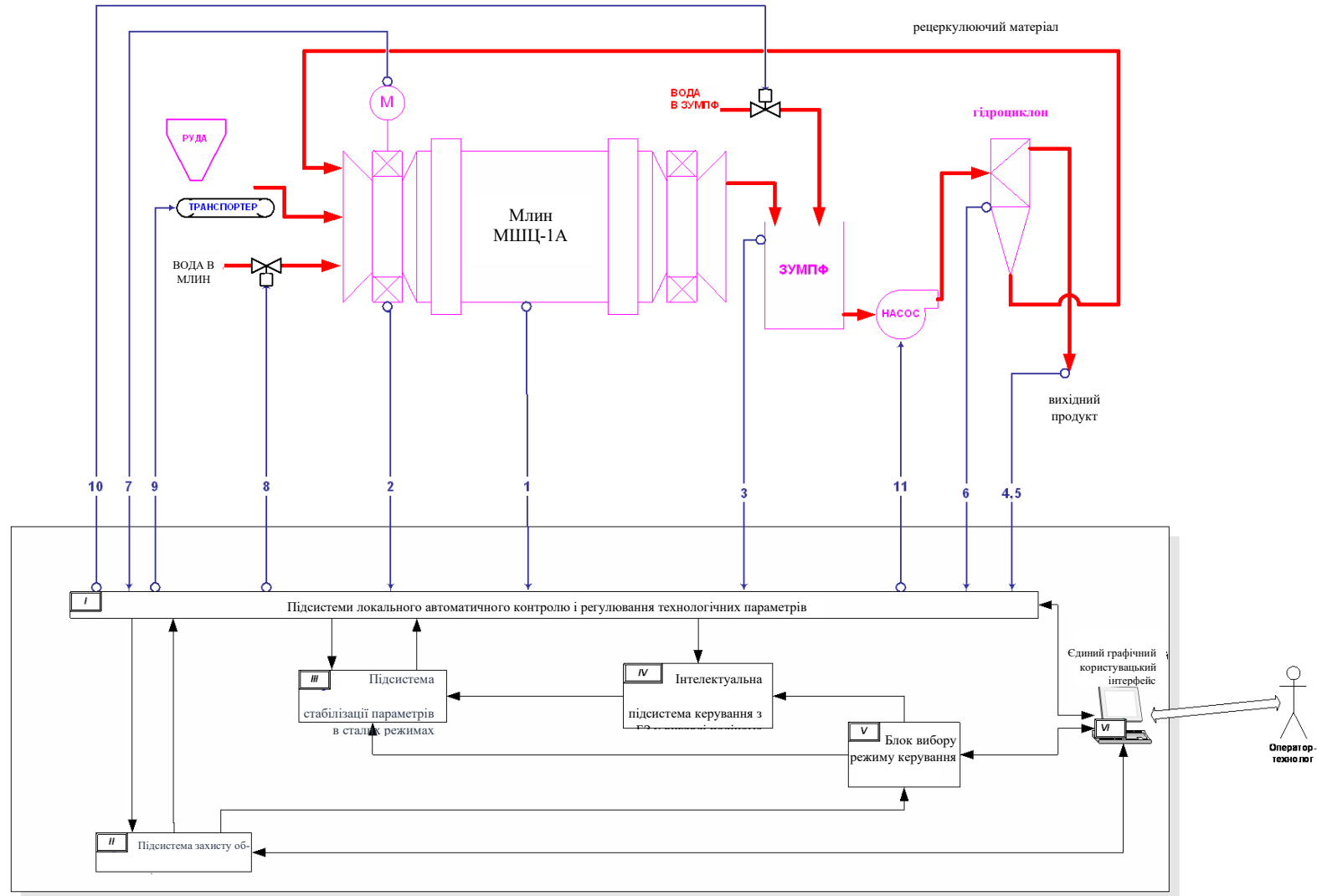


Рисунок 3.1- Структурна схема АСУ технологічного процесу подрібнення рудних матеріалів у комплексі млин – гідроциклон на базі інтелектуальної підсистеми

області *Д*), а також вибору конкретних для поточної технологічної ситуації пріоритетів і можливостей управління параметрами 8, 9, 10, 11 витрати води і руди в млин, витрати води в ЗУМПФ, оборотів насос. Алгоритми вибору пріоритетів за кожним параметром стабілізації для конкретних технологічних ситуацій нашої роботі не розглядається.

При ідентифікованому режимі "управління в області Б" сукупність даних про роботу комплексу млин - гідроциклон від вимірювальних каналів 1, 2, 4, 5, 9, які відображають поточний стан об'ємного завантаження млина Z_v , щільність зливу гідроциклону, швидкість завантаження руди, а також величина узагальненого індексу перевантаження розрахунку за поліномами (3.9, 3.11), в якому кодують вхідні параметри та за рівнянням розраховують уставку швидкості завантаження руди.

Підсистема стабілізації параметрів *III* разом з підсистемою *I* замикає контур управління і забезпечує реалізацію контурів регулювання за відхиленням для параметрів 8, 9, 10, 11 витрати води і руди в млин, витрати води в ЗУМПФ, оборотів насоса гідроциклону з урахуванням встановлених в блоці *V* пріоритетів.

Якщо параметри комплексу млин- гідроциклон відповідають режиму "управління в області А)" або "управління в області Д)", перемикаючий модуль *V* робить вимкнення автоматичного управління за допомогою підсистем *III* і *IV* за поліномами і всю зібрану інформацію переводить на графічну підсистему *VI* оператора-технолога, який забезпечує ведення технологічного процесу подрібнення відповідно до Технологічної інструкції до переходу в ефективну область управління Б).

У разі потрапляння в передперевантажувальну зону В) перемикаючий блок *V* блокує роботу підсистеми *IV* і через підсистеми *III* та *I* забезпечує зниження рівня завантаження руди в млин по керуючому каналу 9 в поточному керуючому циклі на величину інтервалу варіювання змінної X_1 , рівну 10 т/год.

У разі потрапляння в аварійну область Г) перемикаючий блок *V* блокує роботу підсистеми *IV* і через підсистеми *III* і *I* забезпечує припинення

завантаження руди в млин по керуючому каналу 9 і переведення АСУ технологічного процесу подрібнення в ручний режим управління до моменту переходу в ефективну область управління *Б*).

Інформація про поточні значення параметрів технологічного комплексу від підсистеми *I*, а також поточний режим управління від блоку *V* через графічну підсистему *VI* передається оператору-технологу *VII*. Також, за допомогою графічної підсистеми *VI* оператор-технолог *VII* на підставі Технологічних інструкцій здійснює налаштування меж спрацьовування захисних механізмів по кожному інформаційному каналу окремо, а також має можливість керувати комплексом млин – гідроциклон в ручному режимі.

Виконання розроблених підсистемами *III* і *IV* керуючих впливів здійснюється регулюючими органами і виконавчими механізмами підсистеми *I* (керуючі канали 8, 9, 10, 11 подачею води в млин, подачею руди в млин, подачею води в ЗУМПФ, оборотами насоса гідроциклону).

З метою згладжування істотних флуктуацій вхідних параметрів i , відповідно, обчислюваного на їх основі I_p , перед підстановкою у формулу (3.1), для кожного окремого критерію V_j розраховується ковзне середнє значення за час відпрацювання керуючого циклу $t = (6-8)$ хв.

Час обробки керуючого циклу, що відповідає інтервалу між виробленням керуючих впливів, обрано на основі даних попередніх досліджень динамічних режимів комплексів технологічного процесу подрібнення з аналогічним набором обладнання.

Підтвердженням правильності обраної величини є аналіз автокореляційної функції за величиною завантажуваної руди (рис. 3.3), побудованої на основі реальних даних. З аналізу представленої функції випливає, що дві зміни величини завантаження руди, які не впливають одна на одну, повинні бути розділені інтервалом часу не менше 8 хвилин.

Загальна схема розробленого алгоритму управління для інтелектуальної АСУ технологічного процесу подрібнення ОФ в різних робочих підібластях управління наведена на рис. 3.2.

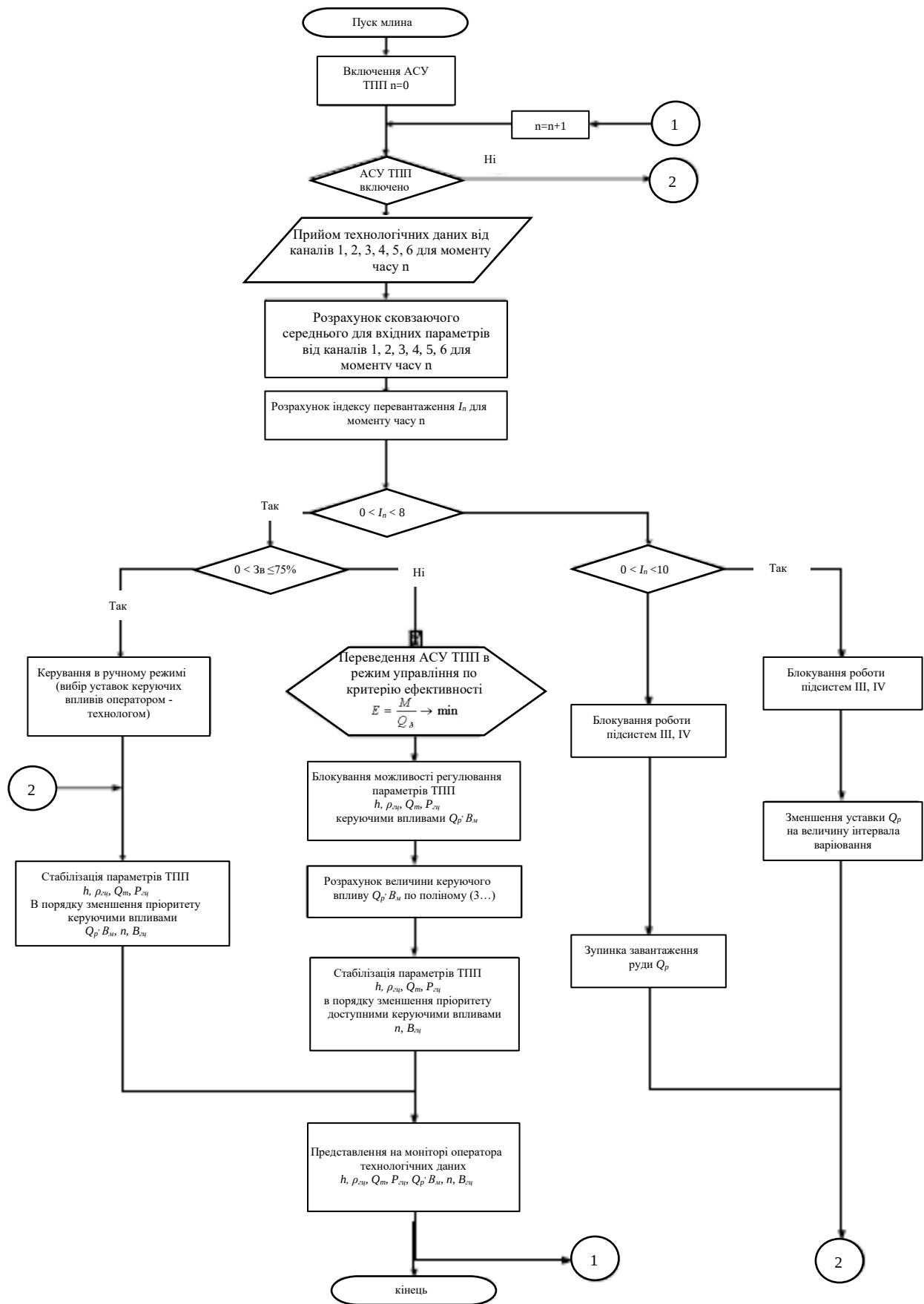


Рисунок 3.2 - Алгоритм розробки керуючих впливів інтелектуальної АСУ технологічного процесу подрібнення ОФ

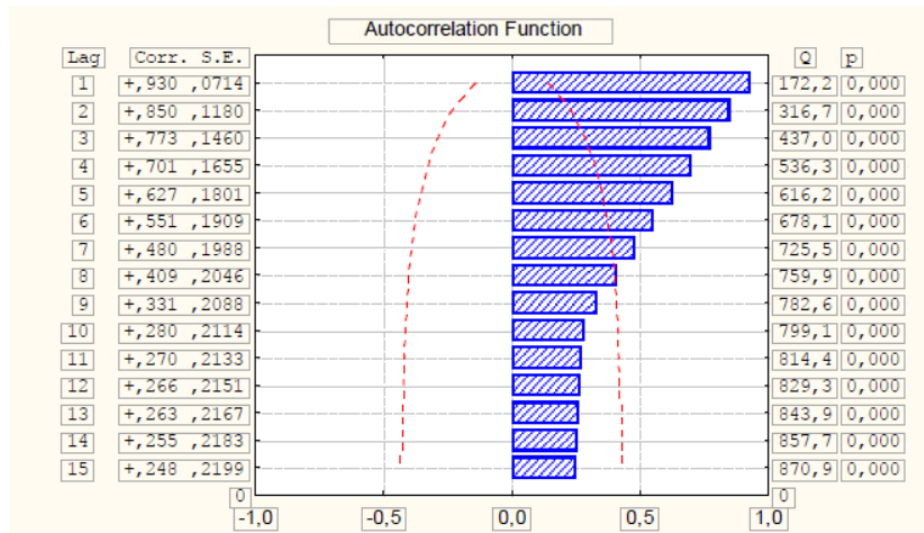


Рисунок 3.3 - Автокореляційна функція завантаження руди в комплекс технологічного процесу подрібнення ОФ

3.2 Апаратно-програмний комплекс аналізу рівня завантаження млина

Внаслідок того, що робота розроблюваної АСУ технологічного процесу подрібнення значною мірою базується на інформації про об'ємне завантаження млина, в даному розділі буде детально розглянуто приклад апаратно-програмної реалізації пристрою для отримання достовірної інформації про величину необхідного параметра.

Основним індикатором величини об'ємного завантаження млина вихідною сировиною, мелючими тілами, і, відповідно, основним елементом АСУ технологічного процесу подрібнення, що розробляється в даній роботі, є віброакустичний аналізатор ВАЗМ-1, який входить до складу підсистеми автоматичного контролю та локального регулювання (рис. 3.1).

Розглянутий апаратно-програмний комплекс частково включає в себе функції підсистеми I в частині інформаційних каналів 1 і 2 і підсистеми VI в частині відображення оперативної інформації про величину об'ємного

завантаження млина.

3.2.1 Загальний опис способу вимірювання об'ємного завантаження млина за допомогою аналізатора ВАЗМ-1

В аналізаторі ВАЗМ-1 реалізовано метод вимірювання об'ємного завантаження млина технологічними компонентами (вихідною сировиною, мелючими тілами, водою, зворотним продуктом) як функції від рівня його шумового поля (за вібраційним і акустичним компонентами).

Вхідними сигналами є рівень вібрації головного підшипника млина і рівень шуму млина (вимірювальний контур 1 і 2 на рис. 3.1 відповідно).

Акустичний датчик (мікрофон) встановлюється в безпосередній близькості від барабана млина, а вібродатчик (акселерометр) - на опорі головного підшипника млина.

Далі вхідні сигнали підсилюються за амплітудою і надходять на звуковий контролер одноплатного комп'ютера Wafer 6820 (у складі аналізатора ВАЗМ-1).

Після звукового контролера оцифровані сигнали обробляються спеціалізованим вбудованим програмним забезпеченням, яке проводить розрахунок амплітудних і спектральних характеристик отриманих сигналів і за заданим алгоритмом, як окремо по вібраційному і акустичному каналах, так і по їх сукупності, формує вихідні сигнали.

Модуль аналогового виходу перетворює отримані цифрові сигнали в аналогові сигнали управління (окремо по кожному з каналів), величина яких (по струму) відповідає комплексному значенню об'ємного завантаження млина. Вихідні струмові керуючі сигнали аналізатора подаються далі на технологічний контролер.

Конструктивно ВАЗМ-1 виконаний у вигляді шафи з необхідним ступенем захисту від впливу навколишнього середовища, в якій встановлені основні компоненти аналізатора (обчислювальний засіб, інтерфейсні модулі, блоки живлення тощо). Основні технічні характеристики аналізатора наведені нижче (таблиця 3.1).

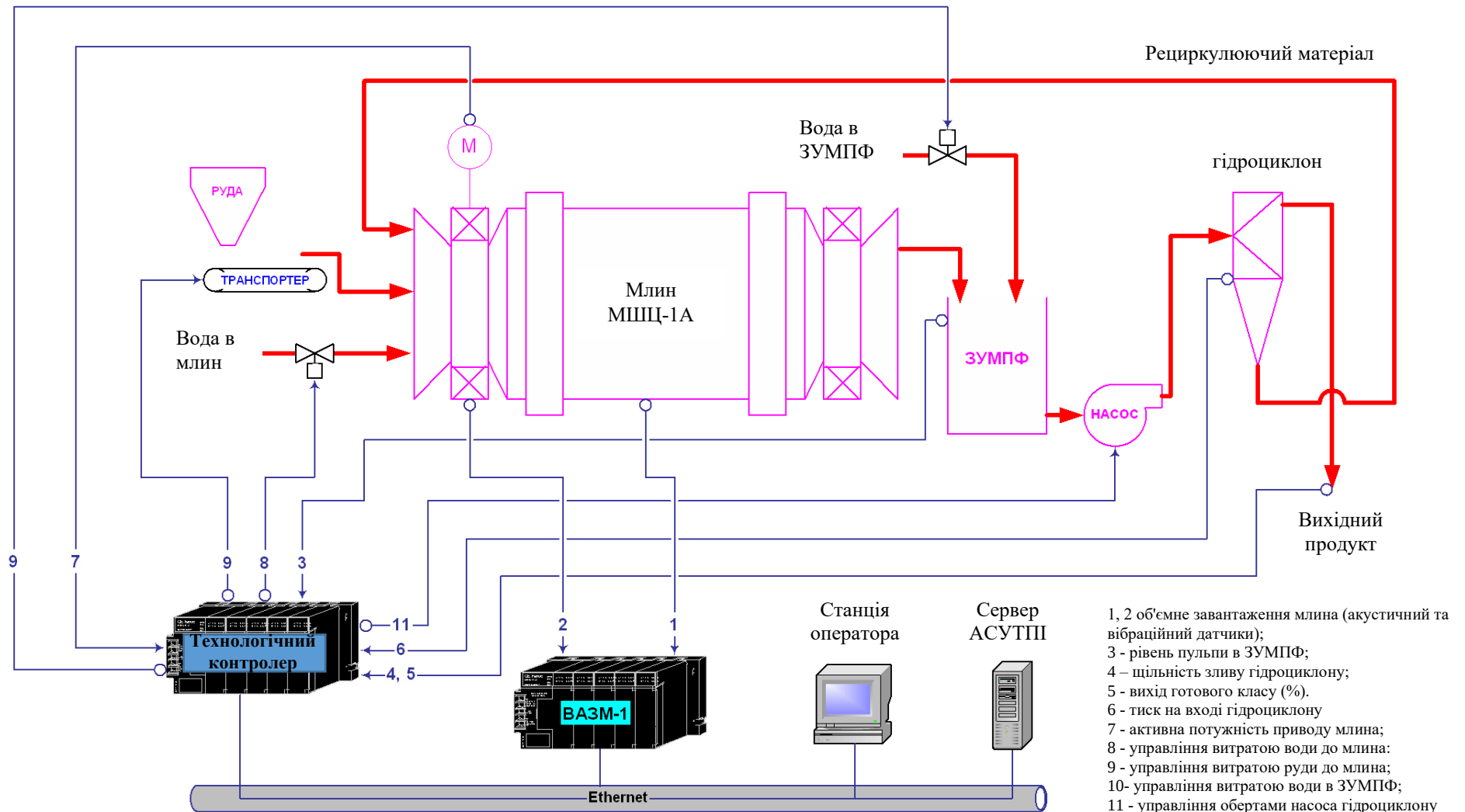


Рисунок 3.4 - Схема апаратної реалізації програмно-технічного комплексу АСУ технологічного процесу подрібнення на ОФ

Розташування та взаємозв'язок датчиків та інших компонентів аналізатора показано на рис. 3.4.

Таблиця 3.1 - Основні технічні характеристики ВАЗМ-1

Найменування характеристики, од. виміру	Значення
Частотний діапазон вимірювання, Гц	20 - 20000
Амплітудний діапазон вимірювання, мВ	5 - 500
Кількість каналів вимірювання	2
Кількість спектральних піддіапазонів вимірювання	5
Діапазон вихідних струмових сигналів, мА	0 - 20; 4 - 20
Інтерфейс каналів зв'язку	Ethernet; RS-232; RS-485

3.2.2 Опис спеціалізованого програмного забезпечення аналізатора

Програмне забезпечення (ПЗ) аналізатора ВАЗМ-1 розроблено на базі програмного пакету LabVIEW (фірма National Instruments) і реалізує такі функції:

- візуальне представлення вхідного сигналу (аналог осцилографа);
- візуальне представлення параметрів спектру вхідного сигналу;
- вимірювання рівня сигналу (інтегральне значення) у повному діапазоні частот (загальний рівень сигналу);
- вимірювання рівня сигналу (інтегральне значення) в п'яти, обраних користувачем, частотних піддіапазонах;
- вимірювання амплітуди максимуму спектру і його частотного положення;
- розрахунок частоти переходу сигналу через нульовий рівень (частоти Райса).

Програмне забезпечення аналізатора формує також архів тимчасових трендів, що відображають динаміку зміни параметрів вхідних сигналів, який

передається на сервер більш високого рівня АСУ технологічного процесу подрібнення. Сформований архів трендів, у сукупності з архівом трендів технологічних параметрів, може бути використаний у структурі АСУ технологічного процесу подрібнення для подальших досліджень при оптимізації параметрів технологічного процесу подрібнення.

Відображення відеокадрів «віртуального приладу» здійснюється на сервері АСУ технологічного процесу подрібнення (рис. 3.4), що пов'язано з необхідністю винесення пристроїв відображення інформації за межі робочої зони об'єкта управління (млина).

Основний відеокадр Spektrum (рис. 3.5) призначений для введення початкових налаштувань аналізатора, тестування працездатності пристрою (перевірка наявності сигналів на вході) і відображення повного спектру вхідних сигналів, що подаються.

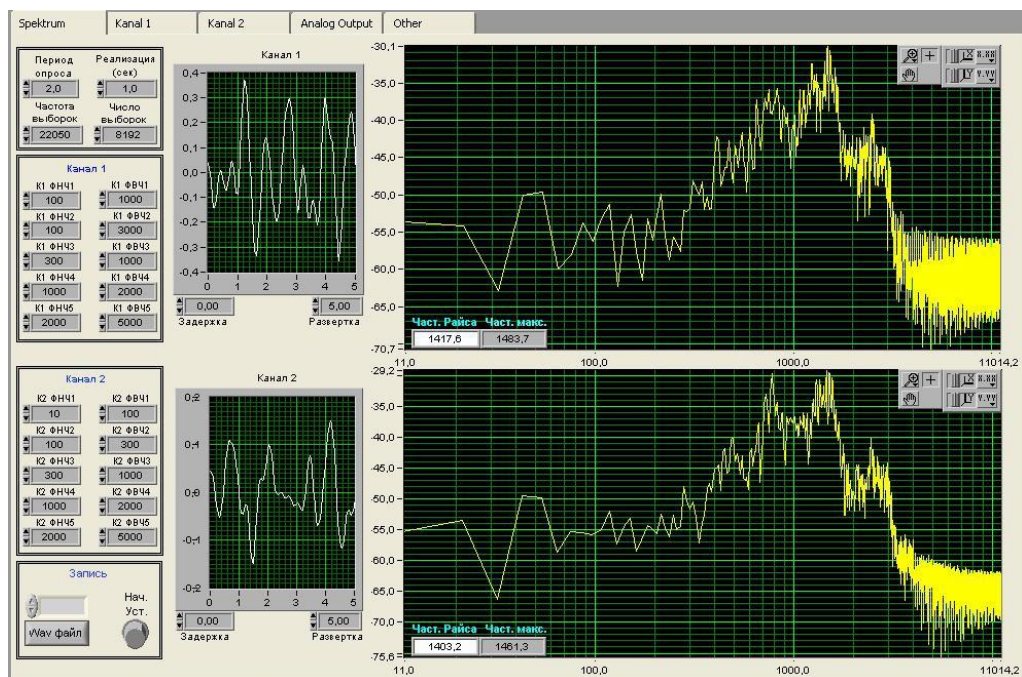


Рисунок 3.5 - Відеокадр Spektrum. Загальний вигляд

Параметрами початкових налаштувань програми є:

– період опитування - інтервал часу (сек), через який ПЗ оновлює вхідні сигнали, що надходять після аналого-цифрового перетворення (АЦП);

- реалізація - період часу (сек), за який усереднюються вхідні дані, що надійшли з АЦП;
- частота вибірки - максимальна частота обробки вхідного сигналу в повному частотному діапазоні спектру;
- число вибірки - кількість точок обробки вхідного сигналу, що знімаються в повному частотному діапазоні спектру.

Конкретні значення зазначених початкових установок визначаються тимчасовими параметрами досліджуваного ТП.

На цій же панелі, за результатами аналізу частотних властивостей сигналу, проводиться вибір і установка частотних меж кожного з п'яти користувацьких частотних піддіапазонів (смуг аналізу) окремо для кожного з каналів.

Відеокадри Kanal 1 і Kanal 2 (рис. 3.6) призначені для відображення динаміки зміни параметрів вхідних сигналів за тривалий період часу (тимчасові тренди вібраційного та акустичного сигналів). Зіставлення динаміки зміни параметрів вхідних сигналів і динаміки зміни технологічних параметрів процесу в часі дозволяє встановити необхідні кореляційні зв'язки і оптимізувати коефіцієнти керуючих алгоритмів для технологічного процесу подрібнення.

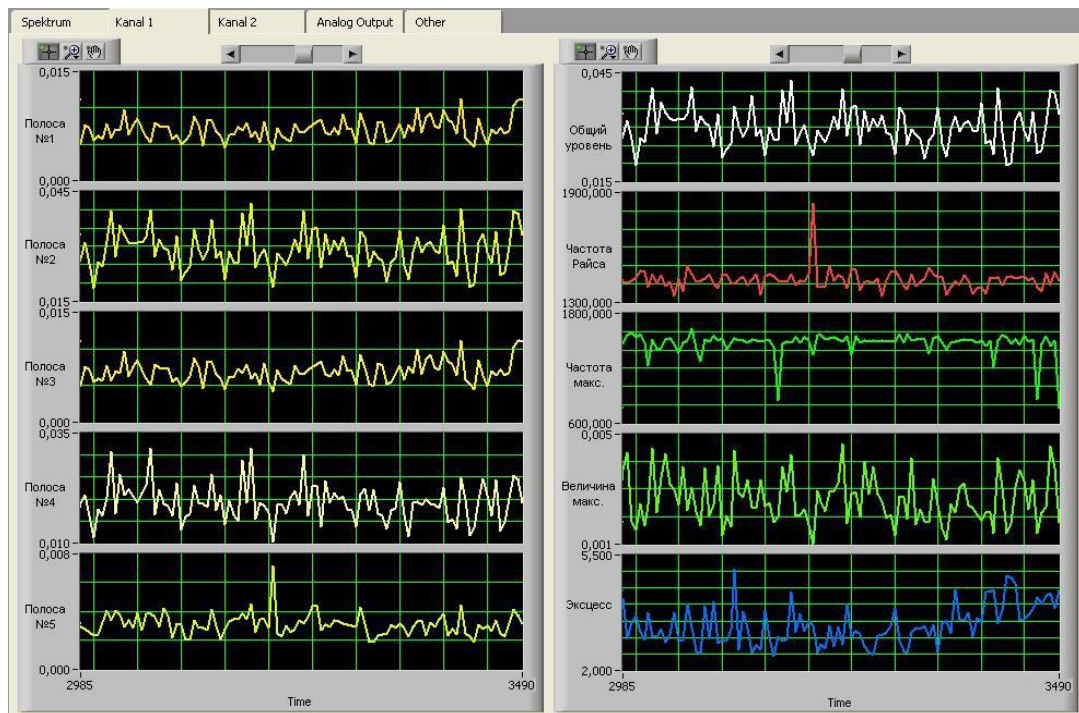


Рисунок 3.6 - Відеокадр Kanal 2. Загальний вигляд

Відеокадр Analog Output (рис. 3.7) призначений для формування вихідних сигналів окремо по кожному з каналів. Також передбачена можливість формування єдиної комплексної величини вихідного сигналу як суми сигналів по каналу 1 і каналу 2, взятих із заздалегідь визначеним ваговим коефіцієнтом. Процедура вибору даного коефіцієнта в нашій роботі не розглядається.

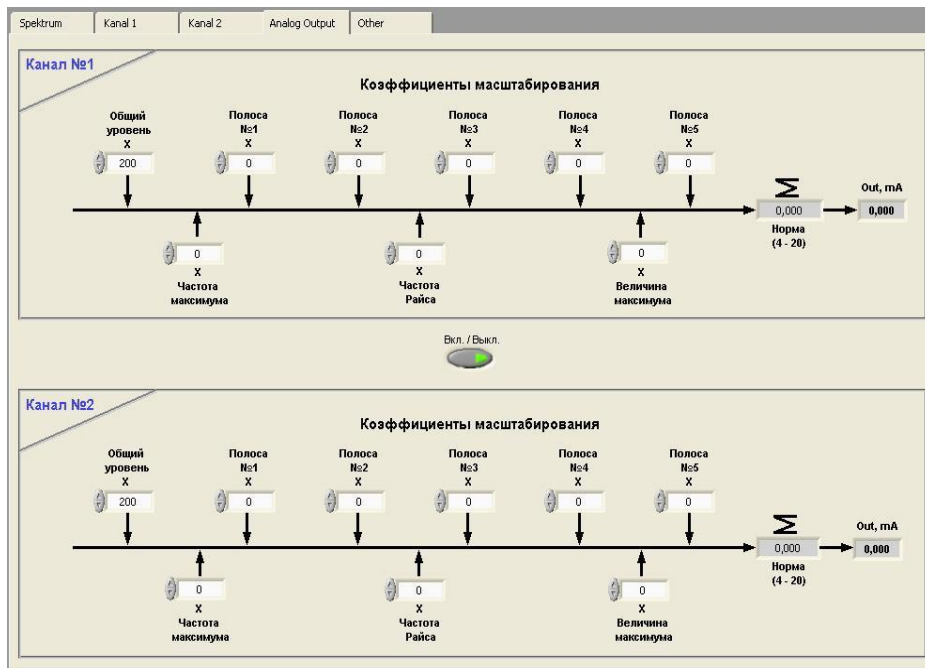


Рисунок 3.7 - Відеокадр Analog Output. Загальний вигляд

3.3 Дослідження моделі інтелектуальної АСУ технологічного процесу подрібнення при різних режимах подрібнення

У цьому розділі розглядається реалізація розробленого алгоритму управління подрібненням рудних матеріалів у комплексі млин – гідроциклон за допомогою АСУ технологічного процесу подрібнення. Нижче наведено опис роботи апаратного та програмно-технічного комплексу (ПТК) в різних конкретних областях факторного простору управління.

ПТК АСУ технологічного процесу подрібнення, схема апаратної реалізації

якого представлена на рис. 3.4, виконаний на базі існуючих на ОФ засобів локальної автоматики, центральну роль в яких відіграє багатофункціональний технологічний контролер марки «Honeywell». ПТК АСУ технологічного процесу подрібнення функціонує наступним чином.

На 431-й хвилині з моменту відстеження процесу почався новий цикл вироблення керуючих впливів, що протікає протягом 8 хвилин. По вимірювальним каналам 1, 2 в аналізатор ВАЗМ-1 надійшли дані про завантаження млина по вібраційній і акустичній складових. За результатами обробки інформації, що надійшла, ВАЗМ-1 видав значення поточного об'ємного завантаження матеріалу в млині $X_4=78$ од і по мережі Ethernet передав ці значення на Технологічний контролер.

Крім того, в контролер по вимірювальним каналам 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 надходять миттєві значення про поточний рівень пульпи в ЗУМПФе, щільність зливу гідроциклону, вихід готового класу, тиск на виході гідроциклону, активну потужність приводу млина, витрату води і руди в млин. Протягом 3 хв (час напівциклу, що дорівнює половині встановленого часу циклу управління - t) миттєві значення по кожному з параметрів попередньо обробляються (фільтруються, усереднюються). Для поточного напівциклу параметри технологічного процесу подрібнення мають такі величини: рівень пульпи в ЗУМПФ $H=0,9$ м, щільність зливу гідроциклону $X_2=30,2$ %тв, вихід готового класу $X_3=65$ % тиск на вході гідроциклону $P_{гц}=0,23$ Мпа, активна потужність млина $M=2148$ кВт, витрата води в млин $V_m=96$ т/год, витрата руди в млин $X_1=292$ т/год. На підставі отриманих величин за розробленим алгоритмом контролер розрахував індекс перевантаження $X_5=4$.

Отримані значення за жодним з параметрів технологічного процесу подрібнення не належать до критичних діапазонів, і контролер приступає до обробки миттєвих значень параметрів технологічного процесу подрібнення другого напівциклу.

За результатами обробки миттєвих значень другого напівциклу параметри технологічного процесу подрібнення прийняли значення: об'ємне завантаження

млина $X_4=82$ од, рівень пульпи в ЗУМПФе $H=1,1$ м, щільність зливу гідроциклону $X_2=31,5$ %тв, вихід готового класу $X_3=65$ %, тиск на вході гідроциклону $P_{гц}=0,24$ Мпа, активна потужність млина $M=2090$ кВт, витрата води в млин $V_m=96$ т/год, витрата руди в млин $X_1=291$ т/год, індекс перевантаження $X_5=4$, які також не виходили за аварійні обмеження. Контролер ідентифікував робочу підобласть управління за основним (In) і допоміжним ($Зв$) параметрами і вибрав режим —управління в області Б)". Сукупність даних про роботу комплексу млин - гідроциклон від вимірювальних каналів X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 по мережі Ethernet надійшла на сервер АСУ технологічного процесу подрібнення для їх кодування у відносні одиниці: $x_1=0,2$, $x_2=0,09$, $x_3=-0,71$, $x_4=1,6$, $x_5=-1,0$ і розрахунку керуючого впливу про зміну величини завантаження руди в млин за поліномами $Y=-11,0$ т/год., що відповідало уставці по завантаженню руди в млин $Q_p=281$ т/год.

Розраховане значення уставки по завантаженню руди в млин по мережі Ethernet надходить на контролер і за допомогою керуючого каналу 9 реалізується для управління технологічним процесом подрібнення.

В іншому випадку, на 26 хвилині від початку відстеження процесу, протягом першого напівциклу управління по вимірювальним каналам 1, 2 надійшла в аналізатор, а ВАЗМ-1 надав дані про величину об'ємного завантаження млина по вібраційній і акустичній складових. Об'ємне завантаження протягом розпочатого напівциклу склало $X_4=78$ од і по мережі Ethernet було передано на технологічний контролер. Також, по закінченні часу напівциклу (3 хв), після попередньої обробки миттєвих значень по кожному з параметрів, контролер визначив наступні величини поточних параметрів технологічного процесу подрібнення: рівень пульпи в ЗУМПФе $H=0,8$ м, щільність зливу гідроциклону $X_2=29,9$ %тв, вихід готового класу $X_3=61$ %, тиск на вході гідроциклону $P_{гц}=0,24$ Мпа, активна потужність млина $M=2162$ кВт, витрата води в млин $V_m=97,6$ т/год, витрата руди в млин $X_1=296$ т/год. На підставі отриманих величин контролер розраховував індекс перевантаження $X_5=0$.

Отримані значення за жодним з параметрів технологічного процесу

подрібнення не належать до критичних діапазонів, і контролер приступав до обробки миттєвих значень параметрів технологічного процесу подрібнення другого напівциклу.

За результатами обробки миттєвих значень другого напівциклу параметри технологічного процесу подрібнення прийняли значення: об'ємне завантаження млина $X_4=71$ од, рівень пульпи в ЗУМПФе $H=0,8$ м, щільність зливу гідроциклону $X_2=29,9\%$ тв, вихід готового класу $X_3=61\%$, тиск на вході гідроциклону $P_{гц}=0,24$ Мпа, активна потужність млина $M=2164$ кВт, витрата води в млин $V_m=96$ т/год, витрата руди в млин $X_1=296$ т/год, індекс перевантаження $X_5=0$, які також не виходили за аварійні обмеження. Контролер ідентифікував робочу підобласть управління за основним (In) і допоміжним ($Зв$) параметрами і вибрав режим —управління в області А)". Відповідно до ідентифікованого режиму контролер блокував можливість автоматичного управління за поліном (3....) і всю зібрану інформацію переводив на станцію оператора-технолога для візуального відображення. Оператор-технолог забезпечував ведення відповідно до Технологічної інструкції до переходу в ефективну область управління Б).

3.4 Алгоритм управління технологічним процесом подрібнення

Нижче зображено блок-схему, що ілюструє алгоритм управління технологічним процесом подрібнення.

Модель об'єкта управління здійснює прогноз гранулометричного складу готового продукту подрібнення, звертаючись до показань, отриманих від технологічних датчиків, таких як датчик продуктивності магістрального насоса-живильника млина, датчик визначальний крупність вихідної сировини і показань експрес-мінералогічного аналізу. Технологічні параметри, що обчислюються за підсумками прогнозу управління з прогнозуючими моделями: питома продуктивність млина за визначальним класом крупності $q=0.071$, коефіцієнт поточної якості процесу подрібнення K та поточне кульове завантаження млина

- всі ці величини надходять у модуль оцінки (блок оцінки поточного стану процесу). Блок оцінки стану забезпечує безперервну оптимізацію якості програмного управління, націленого на наближення регульованих змінних прогнозованої моделі в напрямку відповідних сигналів на горизонті прогнозу. Весь спектр накладених на регульовані та керуючі змінні обмежень береться до уваги під час управління.

Завдання оптимального управління полягає у знаходженні такого керуючого впливу з певного заданого класу, з урахуванням допустимої множини U , яка забезпечить досягнення мети, доставляючи мінімум функціоналу.

Щоб вибрати керуючий вектор потрібно утворити безліч альтернативних рішень управління, враховуючи:

- продуктивність магістрального насоса-живильника млина $Q_{\text{сировини}}$;
- величина відкриття клапана на воду в млиновий зумпф $Q_{\text{води}}$.

Розглядається алгоритм вироблення безлічі альтернативних рішень. Пропонується використовувати такі початкові значення як:

- - продуктивність магістрального насоса-живильника 1400 м³/год;
- величина відкриття клапана на воду в млиновий зумпф $Q_{\text{води}}$ 15%;
- гранулометрична характеристика готового продукту подрібнення (максимальна кількість визначального класу -0.071 мм);
- циркуляційне навантаження млина < 200 т/год.

Параметри управління з прогнозуючими моделями, що вводяться – це задані значення, r , для вивідних параметрів процесу, z , і вимірних вивідних параметрів процесу, y . Вивідні параметри управління з прогнозуючими моделями - керовані змінні, u .

Рисунок 3.8 відображає управління з прогнозуючими моделями, на базі якого знаходиться ітераційна операція з оптимізації з кінцевим інтервалом моделі технологічного процесу.

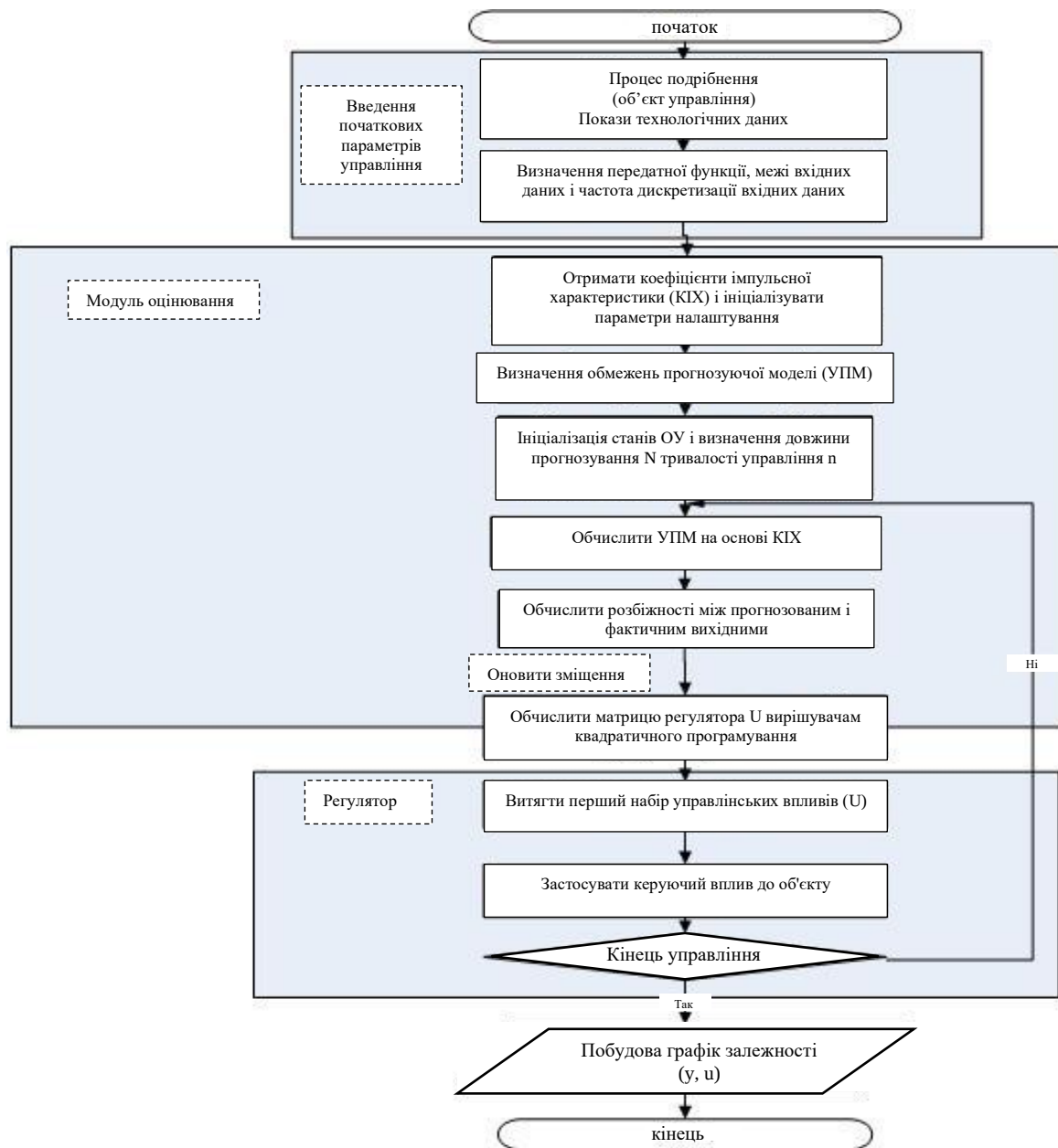


Рисунок 3.8 - Алгоритм управління технологічним процесом подрібнення

Необхідно встановити режим початкової роботи, визначаючи горизонти прогнозування та управління.

Визначаємо кілька технологічних етапів:

1. Моделювання процесу подрібнення.
2. Розраховуємо передатну функцію обмеження при вході та швидкості входу.
3. Налагодження параметрів та визначення обмежень управлінь із

прогнозуючими моделями.

4. Встановлюємо первинний режим для роботи з установкою та визначаємо горизонти управління та прогнозування. Для цього в замкнутій системі здійснюється прорахунок контролера моделі прогнозування та реалізується вибірка регульованих значень.

5. Фіксуємо відхилення прогнозованого значення величин від фактичного значення цих величин при виході. Вибрані значення, що регулюються, підставляємо в систему просторового стану лінійного вигляду.

6. Перехід до першого етапу циклу. Викладки управління з прогнозуючими моделями та повторення технологічного процесу відтворюються до завершення всього моделювання.

Після закінчення моделювання, проводимо розрахунок даних виміряних виходів та регульованих змінних.

Рисунок 3.9 ілюструє алгоритм управління продуктивністю млинів за допомогою регулювання продуктивності магістрального насоса-живильника на базі управління з прогнозуючими моделями. Перший етап полягає у встановленні заданого значення продуктивності (бажана траєкторія поведінки об'єкта) та вимірюванні поточної продуктивності млина. Наступний крок реалізує прогнозування наступних величин продуктивності.

Після вищеописаних дій виконується оптимальне управління, яке було знайдено, а потім вимірюється фактичний стан об'єкта.

Управління гранулометричними характеристиками готового продукту подрібнення здійснюється шляхом регулювання продуктивності магістрального насоса живильника $Q_{\text{вх}}$. У разі надмірної крупності продукту на зливні з гідроциклону продуктивність магістрального насоса живильника знижують, щоб не перевантажувати млин і забезпечити можливість більш тонкого подрібнення. На базі методу управління з прогнозуючими моделями (рисунок 4.9) встановлюється задане значення бажаної траєкторії поведінки об'єкта і вимірюються поточні гранулометричні характеристики готового продукту подрібнення.

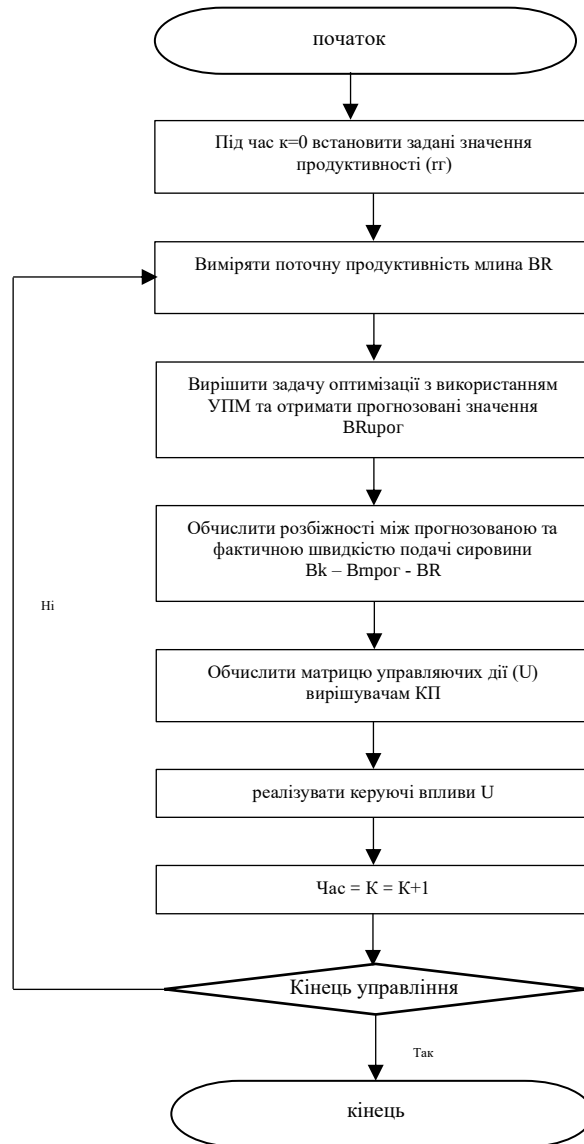


Рисунок 3.9 - Алгоритм керування продуктивністю технологічного процесу

На рис. 3.10 наводиться функціональна схема системи автоматичного керування процесом подрібнення. Прилад виміру крупності виконує вимір крупного складу в режимі безперервної вибірки. В даному випадку основна стратегія управління гранулометричною характеристикою (за Блейном), продуктивністю агрегату мокрого подрібнення і вихідною густиною зливу гідроциклону №7 реалізується за допомогою управління продуктивністю магістрального насоса-живильника і величиною відкриття клапана на воду в зумпф млиновий №5.

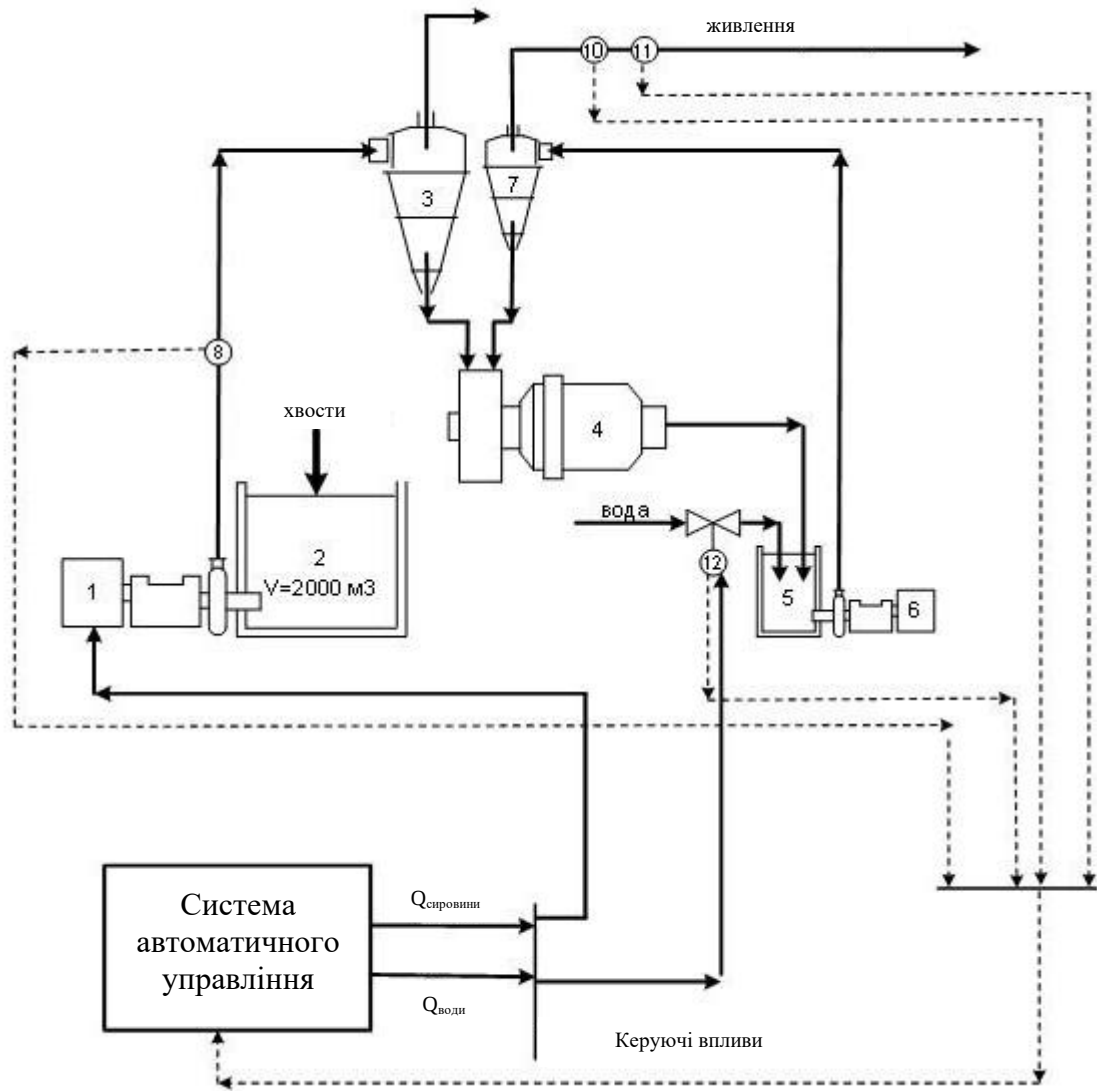


Рисунок 3.10 - Узагальнена функціональна структура алгоритму роботи адаптивної системи управління технологічним процесом подрібнення на основі управління з прогнозуючими моделями

Висновки до розділу

Розроблено АСУ технологічного процесу подрібнення, в основу якої закладені алгоритми управління, що працюють відповідно до локального критерію ефективності подрібнення по зниженню енергетичних витрат на руйнування завантажуваних рудних матеріалів.

Запропонована структура АСУ технологічного процесу подрібнення включає в себе інтелектуальну керуючу підсистему, що використовує аналітичні поліноми в якості бази знань;

Інтелектуальна керуюча підсистема АСУ технологічного процесу подрібнення в якості основного індикатора робочого режиму комплексу млин - гідроциклон використовує дані віброакустичного аналізатора ВАЗМ-1 про ступінь завантаження млина;

Розроблено алгоритм вироблення керуючих впливів інтелектуальною підсистемою АСУ технологічного процесу подрібнення, підсистемою захисту від керуючих впливів і підсистемою стабілізації залежно від належності величини основних технологічних параметрів до одного з встановлених діапазонів.

ВИСНОВКИ

Розглянуто сучасний стан питання автоматичного управління процесами за допомогою цих агрегатів, розглядаючи процеси подрібнення руди в млині як моделювання сукупностей і різних поєднань моделей типових ідеалізованих фізичних процесів, таких як подрібнення рудних матеріалів.

Забезпечення можливості роботи подрібнювального комплексу з урахуванням мінімальних витрат енергії на подрібнення матеріалу, а також підтримання встановлених режимних параметрів та дотримання обмежень подрібнювального комплексу можливе лише при виконанні локальних критеріїв оптимальності процесу подрібнення у самому млині.

Керуючі моделі та алгоритми повинні враховувати ряд технологічних обмежень, властивих процесу подрібнення, такі як необхідність роботи в строго певному діапазоні по виходу готового класу, недопущення навантаження млина за внутрішнім обсягом, а також обмежити витрати електроенергії при роботі технологічного обладнання.

Для вирішення завдань можна використовувати методи на основі нечіткої логіки та теорії планування експерименту та дозволяють побудувати аналітичну базу знань (БЗ) інтелектуальної підсистеми управління.

Наведено основні аспекти побудови інтелектуальних алгоритмів управління на базі нечіткої логіки, а також елементи та визначення теорії нечітких множин та типи нечітких чисел;

Подано узагальнену структуру та механізм роботи нечіткого логічного регулятора, що використовується при побудові інтелектуальної підсистеми управління для технологічних процесів;

Наведено алгоритм та умови, яких необхідно дотримуватися при побудові БЗ нечіткого логічного регулятора як одного з елементів системи управління технологічним процесом, що важко формується;

Наведено процедуру створення керуючої моделі в нечіткому середовищі у вигляді поліномів на основі ідей планованого експерименту, що дозволяє

побудувати ортогональний план ланцюжків причинно-наслідкових зв'язків типу "Якщо.... то...";

Наведено основні положення та способи перевірки адекватності роботи інтелектуальних алгоритмів управління технологічним процесом на базі нечіткої логіки, виконання яких обов'язково при побудові АСУ ТПП за допомогою обраної методики побудови інтелектуальних алгоритмів.

Розроблено АСУ технологічного процесу подрібнення, в основу якої закладені алгоритми управління, що працюють відповідно до локального критерію ефективності подрібнення по зниженню енергетичних витрат на руйнування завантажуваних рудних матеріалів.

Запропонована структура АСУ технологічного процесу подрібнення включає в себе інтелектуальну керуючу підсистему, що використовує аналітичні поліноми в якості бази знань;

Інтелектуальна керуюча підсистема АСУ технологічного процесу подрібнення в якості основного індикатора робочого режиму комплексу млин - гідроциклон використовує дані віброакустичного аналізатора ВАЗМ-1 про ступінь завантаження млина;

Розроблено алгоритм вироблення керуючих впливів інтелектуальною підсистемою АСУ технологічного процесу подрібнення, підсистемою захисту від керуючих впливів і підсистемою стабілізації залежно від належності величини основних технологічних параметрів до одного з встановлених діапазонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Туз А.А., Богатіков В.М. Математична модель технологічного процесу подрібнення апатито-бадделеїтового концентрату в закритому кульовому млині ділянки підготовки харчування флотації Ковдорського ГЗК. Фундаментальні проблеми системної безпеки : матеріали школи-семінару молодих вчених. 2014.
2. Полько П.Г. Удосконалення управління процесом подрібнення рудних матеріалів із застосуванням правил нечіткої логіки : дис. канд. тех. наук: 05.13.06. 2011. 200 с.
3. Авдохін В.М. Основи збагачення корисних копалин. Том 2. Технологія збагачення з корисними копалинами : підручник для вузів. 2006. Т.2. 417 с.
4. Сабанін В.Р., Смирнов Н.І., Рєпін А.І. Автоматичні системи регулювання на основі нейромережових технологій / В.Р. Сабанін. *Теорія та практика побудови та функціонування АСУ ТП* : матер. міжнар. наук. "CONTROL-2003". 2003. С. 45-51.
5. Богатіков В.М. Діагностика станів та управління технологічною безпекою безперервних хіміко-технологічних процесів на основі дискретних моделей : дис. докт. техн. наук : 05.13.06., 2002. 352 с.
6. Єгоров А.Ф., Савицька Т.В. Управління безпекою хімічних виробництв з урахуванням нових інформаційних технологій. 2006. 416 с.
7. Воронін В.В., Констанді Г.Г., Січнев Ю.Е. Діагностування динамічних об'єктів безперервного типу. 2006. 137 с.
8. Кулаков А.Г., Кузнецов П.В., Євшин П.М. Кількісна оцінка безпеки функціонування технологічного процесу. *Праці ІСА РАН*. 2008. Т.39.
9. Willems J.C. / Ric. Aut. 2009. 10. pp. 71-106.
10. Туз А.А. Управління технологічним процесом подрібнення у кульовому млині в циклі підготовки живлення флотації на основі нечітко визначених імпульсних моделей : дис. канд. тех. наук : 05.13.06, 05.17.08. 2017.

11. Марюта О.М., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматичне управління технологічними процесами збагачувальних фабрик : навчальний посібник. 1983. 277 с.
12. Грінман І.Г., Блях Г.І. Контроль та регулювання гранулометричного складу продуктів подрібнення. Алма-Ата: Наука, 2007. 115 с.
13. Автоматизація процесів збагачення руд / Марюта О.М., Давидкович О.С., Гуленко Т.І., Кондратець В.А. К.: Техніка, 1972. 140 с.
14. Марюта О.М. Обґрунтування принципів побудови оптимальних комбінованих САУ на магнітозбагачувальних фабриках. *Вісник Криворізького технічного університету*. 2005. № 6. С. 152-155.
15. Барський Л.А., Козін В.З. Системний аналіз у збагаченні корисних копалин. 2008. 486 с.
16. Процуто В.С. Автоматизовані системи керування технологічними процесами збагачувальних фабрик. 2007. 253 с.
17. Моркун В.С., Цокурєнко О.О., Луценко І.А. Адаптивні системи оптимального керування технологічними процесами. Кривий Ріг: Мінерал, 2005. 261 с.
18. Law, A.M., McComas M.G. How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. 2001. pp. 22-29.
19. Моркун В.С. Ультразвуковий контроль характеристик подрібнених матеріалів та адаптивне управління процесами подрібнення-класифікації руд на його базі : дис. д-ра техн. Наук : 05.13.07 / Криворізький технічний ун-т. Кривий Ріг, 1998. 401с.
20. Авдохін В.М. Основи збагачення корисних копалин. Збагачувальні процеси. Т.1: МДГУ, 2008. 375 с.
21. Автоматизація процесів подрібнення у збагаченні та металургії / Улітенко К.Я., Соколов І.В., Маркін Р.П., Найденов А.П. URL: www.scma.ru/ru/Ulitenko_Avtomatik.pdf. 10 с.
22. Ареф'єв Б.А., Крицький Є.Л., Процуто В.С. Системи екстремального керування подрібнювальними агрегатами: «Колірметінформація». 1994. 36 с.

23. Транспортні системи гірничих підприємств (шахти та збагачувальні фабрики) : навч. посіб. З.Р. Маланчук і др. Рівне, 2020. 158 с.
24. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2003. 272 с.
25. Смирнов В.О. Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик : навч. посіб. Донецьк : Сх. вид. дім, 2002. 296 с.
26. Автоматизація технологічних процесів системи автоматичного керування : навч. посіб. О.В. Барало та ін. Київ. 2010. 557 с.
27. Вент Д.П., Пророків А.Є., Санаєва Г.М. та ін Математичні моделі, що використовуються в задачах діагностики технологічних систем. *Програмні продукти, системи та алгоритми*. 2015. №3.
28. Черкасов В.Ю., Гуцев І.М., Кліневський З.Я. Експертна система управління процесом подрібнення та класифікації на основі нейронних мереж. *Кольорові метали* №6 2004г., с.75-80.
29. Можаяєв А.С., Громов В.М. Теоретичні засади загального логіко-імовірнісного методу автоматизованого моделювання систем. 2000. 145 с.
30. Рябінін І.А. Надійність та безпека структурно-складних систем / *Політехніка*, 2000. 248 с.
31. Захаров В.М., Нечіткі моделі інтелектуальних промислових регуляторів та систем управління. II. Еволюція та принципи побудови. *Технічна кібернетика*, 1993, №4. 189с.
32. Li YF, Huang HZ, Liu Y, Xiao N, Li H. A new fault tree analysis method: fuzzy dynamic fault tree analysis. *Eksplotacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (3): 208-214
33. Qin, S. J. and T. A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*. 11. 2003.
34. J.B. Dugan, K.J. Sullivan, D. Coppit, “Developing a lowcost high-quality software tool for dynamic fault-tree analysis”, *IEEE Transactions on Reliability*, vol 49, March 2000, pp 49-59.

35. King, R.. Modeling and simulation of mineral processing systems, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom. 2001.

36. Маринич І.А., Тронь В.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

37. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

38. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

39. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).

40. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).