

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:

*«Автоматизована система управління технологічним процесом
помолу шихти в цементному виробництві при невизначеності
вихідних даних»*

Виконав ст. гр. АКІТР-24-1м	_____	Новенко Я. В.
Керівник	_____	Маринич І. А.
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 » травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м Новенко Ярославу Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система управління технологічним процесом помолу шихти в цементному виробництві при невизначеності вихідних даних»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 85с., презентація у Microsoft PowerPoint (20 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Маринич І. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.03.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.06.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.08.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ /Маринич І. А./

7. Запевнення: Я, Новенко Ярослав Віталійович, 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 ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Новенко Я. В./

АНОТАЦІЯ

Новенко Я. В. Автоматизована система управління технологічним процесом помолу шихти в цементному виробництві при невизначеності вихідних даних : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 85 с.

Метою роботи є підвищення ефективності та якості процесів подрібнення цементного клінкеру, що працюють в замкнутому циклі, за рахунок організації оперативного управління технологічним процесом за допомогою штучної нейронної мережі в умовах невизначеності вихідних даних.

У першому розділі виконано огляд сучасних технологій і методів керування процесом помолу клінкеру. Показано, що існуючі нейронні та інтелектуальні моделі потребують значних масивів даних і не забезпечують ефективного прийняття рішень у суперечливих умовах. Запропоновано методи із урахуванням поточних технологічних показників замкнутого циклу подрібнення, які дозволяють підвищити енергоефективність та якість помолу клінкеру.

В другому розділі запропоновано трьохетапну процедуру ідентифікації процесу помолу шихти з використанням нормалізації даних, нейронної мережі та регуляризації. Розроблено алгоритм коректного налаштування нейромережі за умов некоректних даних та метод раціонального вибору параметрів завантаження млина на основі зважених цільових обмежень. Це забезпечує ефективне оперативне керування процесом помолу клінкеру.

В третьому розділі досліджено цикл подрібнення як об'єкт управління та розроблено АРМ оператора млина. Запропоновано інтерактивну процедуру прийняття рішень у кульових млинах замкнутого циклу на основі СППР з нейронною мережею в реальному часі.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ЗАМКНУТИЙ ЦИКЛ ПОДРІБНЕННЯ, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, ОПЕРАТИВНЕ УПРАВЛІННЯ, ПОМЕЛ КЛІНКЕРУ, СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ, ЦЕМЕНТНЕ ВИРОБНИЦТВО

ANNOTATION

Novenko Y. V. Automated control system for the technological process of raw mix grinding in cement production under uncertainty of input data : Master's Qualification Thesis : 174 – Automation, computer-integrated technologies, and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 85 p.

The purpose of this work is to improve the efficiency and quality of cement clinker grinding processes operating in a closed circuit by implementing real-time operational control of the technological process using an artificial neural network under conditions of input data uncertainty.

The first chapter provides a review of modern technologies and control methods for the clinker grinding process. It is shown that existing neural and intelligent models require large datasets and do not provide effective decision-making under conflicting conditions. Methods that account for the current technological parameters of the closed-circuit grinding process are proposed, enabling improvements in energy efficiency and clinker grinding quality.

In the second chapter, a three-stage procedure for identifying the raw mix grinding process is proposed, involving data normalization, a neural network, and regularization. An algorithm for properly tuning the neural network under conditions of ill-posed input data is developed, as well as a method for the rational selection of mill loading parameters based on weighted objective constraints. This ensures effective real-time control of the clinker grinding process.

In the third chapter, the grinding circuit is examined as a control object, and an operator workstation (OWS) for the mill is developed. An interactive decision-making procedure for closed-circuit ball mills is proposed, based on a real-time decision support system (DSS) utilizing a neural network.

IDENTIFICATION, CLOSED-CIRCUIT GRINDING, NEURAL NETWORK, OPERATIONAL CONTROL, CLINKER GRINDING, DECISION SUPPORT SYSTEM, CEMENT PRODUCTION

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	11
1.1 Етапи виробництва цементу та основне обладнання цементного заводу.....	11
1.1.1 Подрібнення сировини	11
1.1.2 Випал клінкеру.....	12
1.1.3 Фінішне подрібнення	13
1.2 Огляд основних науково-технічних досягнень в області тонкого подрібнення матеріалів.....	15
1.3 Процес подрібнення замкнутим циклом.....	18
1.4 Підвищення ефективності подрібнення в кульовому млині із замкнутим циклом.....	21
1.5 Постановка задачі дослідження.....	22
Висновки за розділом.....	23
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА СТРУКТУРА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДРІБНЕННЯ ЗАМКНЕНОГО ЦИКЛУ.....	24
2.1 Процедура ідентифікації характеристик процесу помелу клінкеру на основі оптимальної регуляризації задачі.....	24
2.2 Побудова та навчання нейронних мереж.....	31
2.3. Оперативне нейрокерування контуром подрібнення шихти.....	34
2.4 Дослідження системи керування замкненого контуру подрібнення.....	36
2.4.1 Збір та аналіз даних.....	36
2.4.2 Контур подрібнення на дослідному заводі.....	36
2.5 Налаштування нейронної мережі на нормалізованих генеральних даних.....	44
2.6 Процедура прийняття оперативних рішень на основі методу	

	6
обмежень для задачі раціонального завантаження млина.....	49
Висновки за розділом.....	55
РОЗДІЛ 3 АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЗАМКНЕНИМ КОНТУРОМ ПОДРІБНЕННЯ.....	56
3.1 Розробка структури АСУТП.....	56
3.1.1 Рівень технологічного процесу.....	58
3.1.2 Контролерний рівень.....	59
3.1.3. Рівень людино-машинного інтерфейсу.....	60
3.2 Моніторинг процесу подрібнення.....	60
3.3 Автоматизоване робоче місце оператора.....	61
3.4 Процедура прийняття рішень при оперативному управлінні.....	63
3.5 Збір та аналіз даних.....	65
3.6 Результати досліджень з використанням моделей у вигляді нейронної мережі.....	65
3.6.1 Побудова та навчання нейронної мережі.....	66
3.7 Реалізація оперативного нейроуправління помелом клінкеру млином у виробництві цементу	73
Висновки за розділом.....	76
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	80

ВСТУП

Цементна промисловість є однією з найбільш динамічних галузей економіки. При цьому компанії, які займаються виробництвом цементу, приділяють велику увагу зниженню собівартості продукції.

У зв'язку з цим, в умовах постійного зростання тарифів на енергоносії, актуальним завданням є розробка науково обґрунтованих ефективних систем управління, які можуть покращити енергетичні та якісні показники у виробництві цементу.

Таким чином, виробництво цементу є енергоємним процесом [1], що вимагає високих енерговитрат у кількості 850-1100 кВт·год/т виробленого цементу. Теплова енергія від виробництва цементу становить приблизно 90% загального питомого споживання енергії від використання основних джерел палива, від вугілля, мазуту до альтернативних залишкових видів палива, таких як біомаса, відходи тваринництва та викинуті шини. На електроенергію припадає решта 10% від загального питомого енергоспоживання. Вибір джерела палива в першу чергу ґрунтується на вартості. Електрична енергія, що споживається в традиційному процесі виробництва цементу, зазвичай становить 95-110 кВт·год/т. Процес дроблення та подрібнення цементної сировини та готового цементу становить 70% від загальної споживаної електричної енергії. З них на стадію подрібнення клінкеру та інших добавок припадає приблизно від 40 до 50% від загального енергоспоживання.

Незважаючи на високу питому енергоємність, двокамерні трубчасті кульові млини з повітряним класифікатором замкнутого циклу використовуються для остаточного подрібнення цементу вже більше 100 років завдяки їх високій надійності та сприятливим фізико-хімічним властивостям цементного продукту, таким як більш вузький розподіл частинок за розміром.

На жаль, кульові млини мають одні з найнижчих показників енергоефективності серед усіх млинів. Кульові млини зазнають значних втрат енергії (приблизно 98%) у вигляді тепла внаслідок тертя і зіткнення в падаючій

масі куль, які передають вхідну енергію неконцентрованому шару частинок. Для ефективного розщеплення частинок клінкеру необхідні багаторазові впливи.

У зв'язку з високим споживанням енергії та низькою енергоефективністю кульові млини для подрібнення цементу в цементній промисловості постійно шукають нові способи зниження споживання енергії шляхом вдосконалення конструкції млина та конфігурації контуру керування.

Останніми роками використання альтернативних видів палива значно зросло, але потенціал для подальших удосконалень все ще існує. Наприклад, відновлення клінкеру при подрібненні готового цементу шляхом заміни його деякими специфічними матеріалами, що володіють властивостями, схожими з клінкером (такими як вапняк, пуцолан і доменний шлак). У цій сфері вже досягнуто значного прогресу. Однак використання відповідних матеріалів обмежене їх регіональною доступністю.

При подрібненні цементу в кульових млинах враховуються різні параметри, такі як: подача матеріалу, швидкість обертання млина, швидкість сепаратора, повторне подрібнення (зернистість), звук млина, тонкість готового виробу, питома споживана потужність і т.д.

Актуальність теми. Міжнародний огляд цементу показав, що у світі спостерігається лінійне зростання попиту на цемент, і очікується, що він збільшиться в найближчі роки. Тому дослідники і фахівці повинні приділяти особливу увагу оптимізації енергоспоживання процесів під задані специфікації продукції. У цих умовах завдання зниження споживання електроенергії вступає в протиріччя з якісними показниками кінцевого продукту, з одного боку, з іншого - знижує собівартість і покращує екологічні показники, що призводить до суперечливих формулювань завдань оперативного управління. У зв'язку з цим розробка методів і алгоритмів оперативного управління процесами подрібнення в суперечливих умовах з урахуванням вимог, спрямованих на зниження енерговитрат в кульових млинах замкнутого циклу, є актуальним завданням.

Енерговитрати тісно пов'язані із забезпеченням якісних показників одержуваного продукту - цементу. Такими показниками є: тонкість помелу,

зернистість, подача гіпсу та ін. Крім того, оператор млина повинен підтримувати подачу гіпсу, швидкість сепаратора, зернистість, питоме споживання енергії, звук млина та швидкість двигуна млина в межах допусків процесу під час процесу подрібнення.

В результаті оперативне управління млином є завданням дослідження операцій, яка повинна вирішуватися різноманітними показниками в суперечливих умовах. Поліпшення одного показника призводить до погіршення інших показників. Для вирішення такої проблеми недоцільно використовувати згортку критеріїв якості, так як втрачається технічний сенс показників. У зв'язку з цим проблемою є відстеження кожного показника окремо в режимі реального часу в режимі реального часу.

Ще одним викликом є завдання виявлення характеристик млина в режимі реального часу. Коефіцієнт передачі млина нелінійно залежить від розміру частинок матеріалу, що подрібнюється, тому виникає проблема побудови адекватної моделі млина, яка з одного боку повинна бути скоригована за середніми характеристиками, з іншого боку, вона повинна контролювати поточні характеристики млина. Побудова такої моделі є складною задачею. У літературі використання нейронних мереж в даний час вважається перспективним. Однак тут виникає проблема оперативного обліку особливостей процесу, які швидко змінюються в динаміці подрібнення.

Мета та завдання дослідження. На основі аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури можна зробити певні висновки та сформулювати мету і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності та якості процесів подрібнення цементного клінкеру, що працюють в замкнутому циклі, за рахунок організації оперативного управління технологічним процесом за допомогою штучної нейронної мережі в умовах невизначеності вихідних даних.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз ефективності технологічних процесів подрібнення клінкеру в кульових млинах цементного виробництва.

- Провести нормалізацію загального набору даних в технологічному процесі подрібнення клінкеру цементного виробництва на основі виділення найбільш спільних даних підсистем.
- Виконати ідентифікацію технологічного процесу подрібнення клінкеру в цементному виробництві на основі оптимального узгодження рішень загальної нейронної мережевої моделі та локальних моделей процесу з суперечливими вихідними даними.
- Запропонувати процедури прийняття ефективних рішень на основі оптимального узгодження значень показників процесу подрібнення в суперечливих умовах.
- Виконати апробацію розробленої системи підтримки прийняття рішень в задачах оперативного управління подрібненням цементного клінкеру в кульових млинах замкнутого циклу

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань були використані такі методи: обчислювальне моделювання, сучасна теорія управління, нейромережевий апарат, а також методи проектування систем автоматичного управління.

Практичне значення роботи полягає у підвищенні ефективності процесу подрібнення клінкеру за заданими показниками якості завдяки використанню розробленої штучної нейронної мережі для операційної ідентифікації процесу подрібнення в умовах невизначеності даних та спеціального інтерактивного алгоритму для прийняття рішень щодо операційного управління в суперечливих умовах.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Етапи виробництва цементу та основне обладнання цементного заводу

Нижче, для огляду енерговитрат і функціональних характеристик процесу виробництва цементу, процес розділений на різні функціональні етапи, в яких використовується спеціальне обладнання.

1.1.1 Подрібнення сировини

Процес дроблення складається з набору дробарок різної тонкості для уточнення розміру частинок для подальшої переробки. У більшості випадків контур дроблення складається з первинної, вторинної та третинної дробарки

Ця схема поступово зменшує розмір частинок вапняку за рахунок процесу дроблення, просіювання та повторного дроблення.

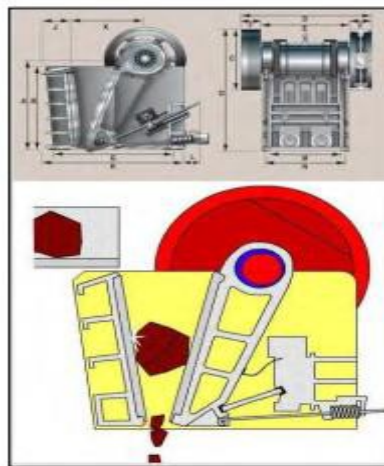


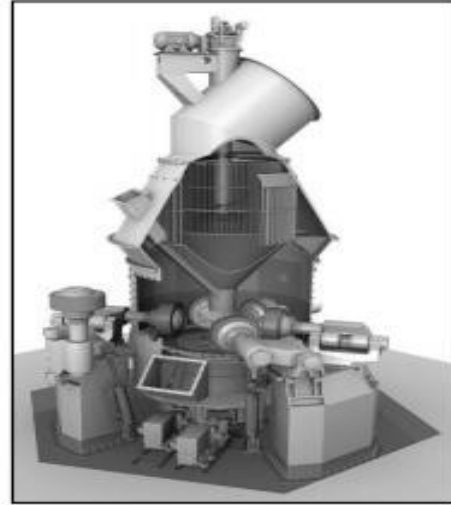
Рисунок 1.1 – Робота щоквої дробарки

Необроблений вапняк відновлюється та транспортується з купи сировини до шліфувального контуру, відомого як сировинний млин, де розмір частинок зменшується до тонко контрольованого порошку, відомого як сире борошно. Як

сировинні млини використовуються різні типи млинів, включаючи кульові млини та вертикальні роликові млини.



а)



б)

Рисунок 1.2 - Горизонтальний кульовий млин (а) до вертикального валкового млина (б)

На даному етапі енерговитрати складають 20% від загальної енергії виробництва цементу.

1.1.2 Випал клінкеру

Процес прожарювання відбувається у великій обертовій трубці, яка називається піччю. Піч являє собою металеву трубу з керамічним футеруванням з постійним діаметром від двох до шести метрів. Довжина цих труб також може варіюватися від сорока до вісімдесяти метрів. Сировина подається в обертову піч з температурою від 1300 до 1550 °С. Ця температура спікання створює новий продукт, який визначається як клінкер, показаний на рисунку 1.3.

Незважаючи на те, що піч є найбільшим рухомим обладнанням на цементному заводі, вона використовує лише 25% енергії заводу [2].

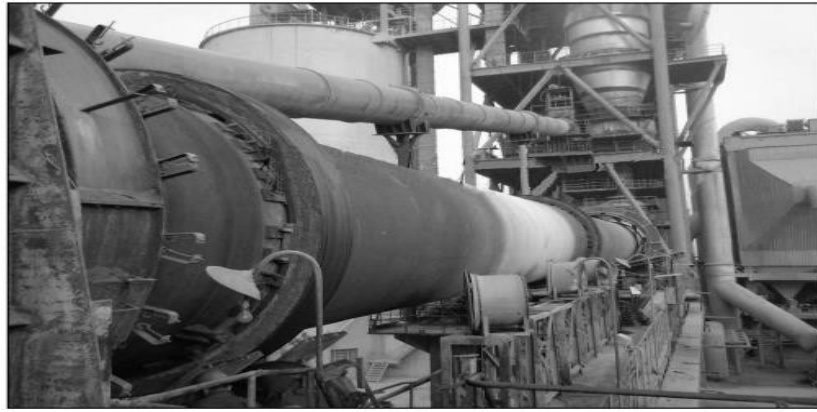


Рисунок 1.3 - Обертові печі для цементної промисловості



Рисунок 1.4. Клінкер (ліворуч) і готовий цемент (праворуч)

1.1.3 Фінішне подрібнення

Кінцевий цементний продукт зазвичай отримують шляхом подрібнення клінкеру, як правило, з 5% гіпсу. Метою процесу подрібнення є отримання дрібнодисперсного порошку з розміром прохідних частинок 80% (d80) 30-40 мкм.

Шліфувальні системи в цементній промисловості відіграють важливу роль у розподілі частинок за розміром і формою частинок. Це впливає на реакційну здатність клінкеру і температурну залежність дегідратируючого гіпсу, який подрібнюється разом з клінкером. Ці фактори впливають на такі властивості цементного розчину, як потреба у воді, початковий і кінцевий час схоплювання, розвиток міцності [3].

Вже більше 100 років кульові млини використовуються в якості основного обладнання для подрібнення готового цементу. Кульові або трубчасті млини будують діаметром до 6,0 м і довжиною до 20 м. Завдяки високій експлуатаційній надійності і доступності кульові млини залишаються найбільш поширеною оздоблювальною одиницею на цементних заводах [4]. При виробництві портландцементу зазвичай використовуються двокамерні кульові млини, як показано на рисунку 1.5. У першій камері відбувається грубе подрібнення, а в другій камері виходить матеріал тонкого помелу.



Рисунок 1.5 – Т-ребристий кульовий млин з двома відділеннями. А-відсік 01, В-відсік 01/02 і мембранний сепаратор [4].

Кульовий млин із замкнутим циклом керується ефективним класифікатором на основі сепаратора. Це особливо актуально, коли є фаза, в якій комбінації мають низький робочий індекс сполучних речовин або подрібнюючих матеріалів, схильних до агломерації через ефект подрібнення. Тираж ваги коливається від 100% до 600% в залежності від необхідної тонкості продукту, в залежності від розкладання нової сировини, і достатньої міцності цементу [4 - 6].

1.2 Огляд основних науково-технічних досягнень в області тонкого подрібнення матеріалів

Розглянемо сучасний стан автоматизації управління замкнутим циклом подрібнення.

В даний час на практиці процеси подрібнення все ще часто виконуються вручну або в обмежених межах, використовуючи прості однозмінні регулятори [8]. Протягом останніх десятиліть було запропоновано кілька підходів до управління, в тому числі методи лінійного багатопараметричного контролю [10,11]. Останнім часом зусилля дослідників були зосереджені на контролерах, які можуть запобігти засміченню млина. Лінійні контролери, засновані на лінійному наближенні процесу подрібнення, стабільні і ефективні тільки в межах заданої номінальної робочої точки. Існуючі порушення (наприклад, зміни в подрібнюваності сировини) можуть привести млин до нової робочої точки, де контролер не зможе стабілізувати установку.

У спробі вирішити цю проблему в недавньому дослідженні була розроблена спрощена нелінійна модель шліфувального контуру, яка здатна реалістично відтворювати явище засмічення і контролера зворотного зв'язку стану на основі нелінійної прогностичної стратегії управління [12]. Незважаючи на те, що запропонована система має більшу площу стійкості в порівнянні з лінійними контролерами, ризик засмічення не був повністю усунутий. У більш пізніх роботах [3], використовуючи модель шліфувального контуру, запропоновану в [4], він запропонував надійний нелінійний регулятор умов-зворотний зв'язок, який здатний запобігти засміченню млина.

Методи управління з використанням класичних контролерів, запропоновані в [15-17], можуть бути ефективними тільки в тому випадку, якщо співвідношення між змінними може бути правильно визначено і змодельовано. Добре відомо, що подрібнення матеріалу залежить від багатьох факторів, включаючи геометрію млина, швидкість, розподіл кульок за розміром, здатність матеріалу до подрібнення та розмір частинок. У зв'язку з властивістю складності

процесу розробка точної моделі схеми подрібнення цементу є непростим завданням, тому динамічне моделювання процесів подрібнення все ще залишається відкритим напрямком [6].

У [8] запропоноване нейроадаптивне управління контуром подрібнення цементу. Нейромережева модель схеми подрібнення цементу використовується для прогнозування витрати продукту та завантаження на млині на крок вперед. В роботі вирішується тільки проблема засмічення млина.

У роботі [9] використовується контроль з прогнозуванням на крок вперед. Прогноз здійснюється за допомогою нейронної мережі. Тюнінг нейронної мережі базується на управлінні ковзним режимом (Sliding Mode Control, SMC). Цей метод нечутливий до зовнішніх збурень і невпевненостей. Однак управління, засноване на використанні ковзних режимів, має закон релейного управління при швидкому перемиканні режимів, що викликає появу високочастотних перешкод.

Контролери управління процесом подрібнення утворюють перший рівень автоматизації процесу подрібнення. Другий рівень автоматизації процесу подрібнення реалізований у вигляді програмного забезпечення робочого місця (АРМ) оператора млина. В даний час другий рівень автоматизації в основному реалізує функції контролю робочих параметрів процесу подрібнення.

Як правило, функції управління робочими параметрами виконуються в ручному режимі за допомогою відповідних органів управління. Тому розробка і застосування автоматизованих систем підтримки прийняття рішень (АПС) для управління технологічними процесами в режимі реального часу є одним з перспективних напрямків автоматизації управління складними технологічними процесами [10].

На системному рівні автоматизації управління процесами дроблення сировини в цементному виробництві, на відміну від рівня контролерів, одним з актуальних завдань тут в даний час є розробка систем підтримки прийняття рішень для оперативного управління процесами.

В цілому для завдань управління процесами широкого плану, в тому числі і технологічними процесами, завдання автоматизованого забезпечення прийняття керуючих рішень постала досить рано в 70-80-х рр. Це було пов'язано з появою автоматизованих робочих місць операторів і робочих місць операторів на основі комп'ютерної техніки. Поява персональних комп'ютерів і робочих станцій на системному рівні автоматизованих систем управління дозволило ставити нові завдання по управлінню процесами. Якщо завданнями базового рівня автоматизації (рівня контролерів) були вимірювання, стабілізація і автоматичне регулювання робочих параметрів, то на системному рівні автоматизації, в зв'язку з розвитком обчислювальної техніки, вже можна було ставити і вирішувати завдання техніко-економічного рівня - підвищення ефективності процесу, наприклад, мінімізація витрат ресурсів при заданих показниках якості продукції.

При виробництві в'яжучих речовин для різних будівельних сумішей і виробів одним з найбільш енерговитратних є процес дроблення і подрібнення сировини, на які витрачається близько 10% всієї енергії на ці етапи обробки [7]. У той же час витрата енергії значно зростає при збільшенні дисперсності одержуваного продукту [8].

Відомо [7-10], що витрата електроенергії, Дж/т, становить:

- для дроблення - 10 - 21;
- для тонкого помелу - 360-3600.

Тому актуальним є вдосконалення управління процесом тонкого подрібнення з метою зниження електричної ємності процесу [8].

У розвинених країнах подрібнення цементу в основному проводиться в барабанних кульових млинах із замкнутим циклом. Сімейство сучасних барабанних кульових млинів, що випускаються зарубіжними компаніями Японії, Німеччини, Чехії, США і Данії, представлено різними параметрами, в тому числі більш ніж 60 типорозмірами [9].

В [10] він показує, що використання вертикального млина при двоступеневому подрібненні дозволяє знизити питому витрату енергії на 19%. Ця установка працювала перед кульовим млином. Вертикальний млин пристосований для подрібнення цементного клінкеру продуктивністю до 300 т/год.

В результаті досліджень, проведених в Німеччині, було встановлено, що вертикальний млин може використовуватися для попереднього подрібнення клінкеру перед тонким подрібненням в трубчастому млині, капітальні інвестиції в будівництво дволикового млина на 25% вище, ніж у кульового млина, а питома витрата енергії на 10 відсотків нижче. 20% [10, 11]. Аналогічний висновок робиться і в працях [12-13].

Слід зазначити, що зарубіжні автори суперечать один одному в своїх висновках: в одних роботах [13, 14] вказується, що вертикальні млини при шліфуванні клінкеру працюють гірше, ніж кульові, а в інших роботах [15, 16] навпаки. Наприклад, в роботах [17-20] вертикальний млин рекомендується використовувати тільки на першому етапі подрібнення, а в кульову млин слід подавати клінкер розміром менше 20 мм.

Таким чином, з наведеного аналізу [14, 15, 18] випливає, що для подрібнення сировини найчастіше використовуються вертикальні млини. У зв'язку з високим абразивним зносом і низькою погодинною продуктивністю дані клінкерні млини не рекомендуються.

Найбільш типовим прикладом у вітчизняній цементній промисловості є барабанні кульові млини, що застосовуються як для одноступеневого, так і для двоступеневого подрібнення у відкритому і закритому контурах. Таким чином, дослідження даного млина по контролю і оптимізації процесів подрібнення різних цементів, в певних умовах існуючих і проєктованих заводів, безсумнівно, є справжнім викликом для цементної промисловості [11].

1.3 Процес подрібнення замкнутим циклом

Основними компонентами схеми виробництва цементу замкнутого циклу є живильник, млин, елеватор і сепаратор (рис. 1.6). У роботах описаний технологічний процес виробництва цементу в замкнутому циклі [12].

Поки млин виконує роботу подрібнення, сепаратор видаляє дрібніші частинки з випуску млина та запобігає їх розтріскуванню, тим самим заощаджуючи енергію. Економія електричної енергії відбувається за рахунок того, що сепаратор відсіває дрібну фракцію на вході в кульову млин, тим самим запобігаючи подрібненню дрібної фракції. Відсіваючи дрібну фракцію в процесі подрібнення, сепаратор створює вільний простір усередині млина, дозволяючи більшій кількості свіжого клінкеру надходити в млин, і таким чином підвищує продуктивність. Робота схеми характеризується декількома параметрами, які ретельно контролюються на заводі [11].

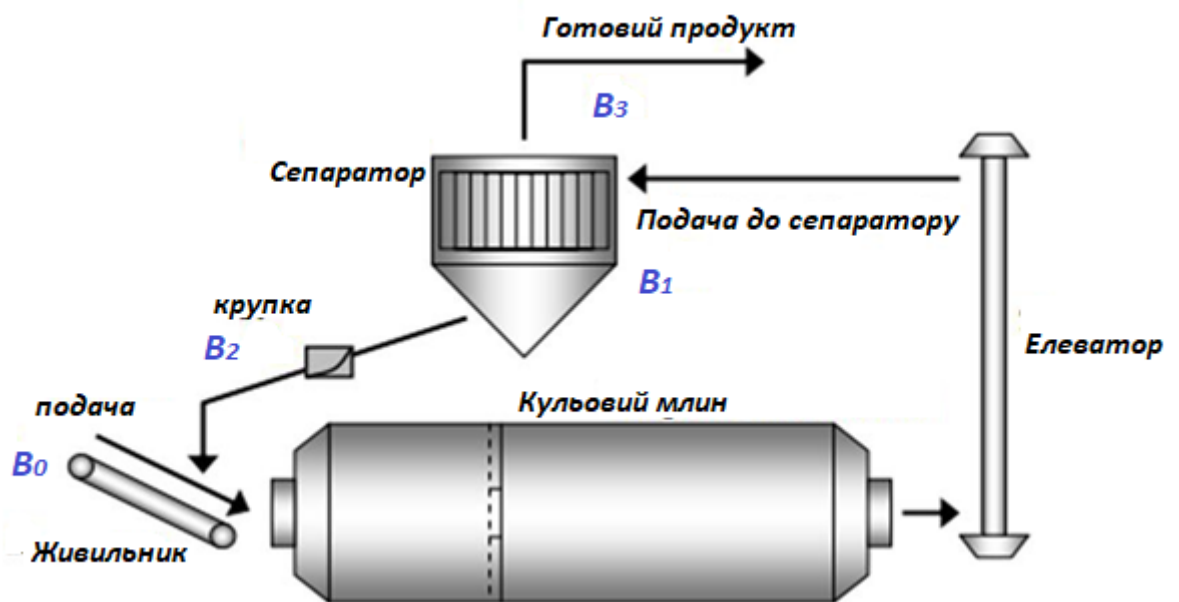


Рисунок 1.6 - Замкнутий контур подрібнення

Норма свіжої сировини, V_0 , є мірою продуктивності і дорівнює витраті готового продукту (цементу), V_3 . У зв'язку з балансом мас ці дві величини повинні бути рівними, так як в ланцюзі не відбувається накопичення або

утворення нового матеріалу. У стаціонарному режимі швидкість подачі також визначає ступінь заповнення млина, що впливає на ефективність подрібнення трубчастого кульового млина. Ваги повинні регулярно калібруватися, щоб забезпечувати надійні та точні сигнали швидкості подачі клінкеру та добавок.

Споживана потужність двигуна млина є показником завантаженості млина. Чим більше матеріалу потрапляє в млин, тим складніше двигуну обертати млин і тим вище витрата енергії. Будучи найбільш енергоємним компонентом цементного заводу в цілому і шліфувального контуру зокрема, утилізація потужності млина на тонну виробленого цементу також є кінцевим показником ефективності процесу подрібнення [13].

Для того, щоб оцінити стан заповнення відсіків млина за допомогою звукової інформації під час роботи, біля кожного відсіку встановлені відповідні мікрофони. Незважаючи на загальний шум, який супроводжує процес скреготу, ці чутливі мікрофони здатні вловлювати зміни в звучанні млина. Порожній млин видаватиме гучніший звук, тоді як збільшена кількість клінкеру гаситиме шум, спричинений шліфувальним середовищем, і призведе до нижчих значень у децибелах.

Потужність двигуна елеватора – ще один показник завантаженості млина. У цьому випадку продуктивність млина дорівнює значенню V_3 , який складається із загальної маси як свіжих потоків сировини (V_0), так і бракованих потоків сепаратора (V_2).

Частота обертання ротора сепаратора є важливим параметром в контролі характеристик тонкості цементу [13-14]. Збільшення частоти обертання ротора підвищує тонкість кінцевого продукту і збільшує витрату відбракованого речовини V_2 , так як більше частинок буде повертатися назад на млин. Система приводу ротора має власну потужність, яка визначає максимально можливу частоту обертання ротора [14].

Повітря, що проходить через сепаратор, зазвичай подається окремим вентилятором і управляється заслінкою з дистанційним керуванням. Достатня кількість повітря в зоні класифікації має вирішальне значення для адекватного

розділення, оскільки процес класифікації відбувається, коли частинки матеріалу повністю підвішені в повітрі. Більший потік повітря всередині сепаратора буде переносити більші частинки в неглибокий потік. Це зменшить тонкість виробу і зменшить витрати відбраковки V_2 .

Витрати відбраковки V_2 є важливим параметром процесу замкнутого циклу подрібнення і зазвичай вимірюється витратоміром. При постійній швидкості подачі свіжої сировини V_0 будь-які зміни швидкості відбраковування V_2 вплинуть на продуктивність млина V_3 . Це призведе до зміни співвідношення продуктивності до швидкості подачі свіжої сировини, що визначається як навантаження на переробку. Нарешті, тонкість подрібненого продукту має значний вплив на експлуатаційні характеристики цементу.

1.4 Підвищення ефективності подрібнення в кульовому млині із замкнутим циклом

Кінцеве подрібнення цементу є найбільш енергоємною частиною виробничого процесу, тобто подрібнення цементного клінкеру, на який витрачається майже 40% електричної енергії [6-7]. По середній споживаній потужності станції (основного обладнання для виробництва цементу)

Споживання 110 кВт·год/т (електроенергії) можна розбити на кожен основний процес споживання, як показано на рисунку 1.7. Контури подрібнення цементу ефективніше працюють в замкнутих контурах. Тепер, завдяки впровадженню високоефективних розмірних сепараторів, можна отримати більш точний продукт за розміром частинок, що поліпшить якість цементу. Конфігурація сепаратора може бути влаштована по-різному, але зазвичай вона пов'язана зі збереженням тепла шляхом повернення або рециркуляції чистого гарячого повітря в процесі подрібнення.

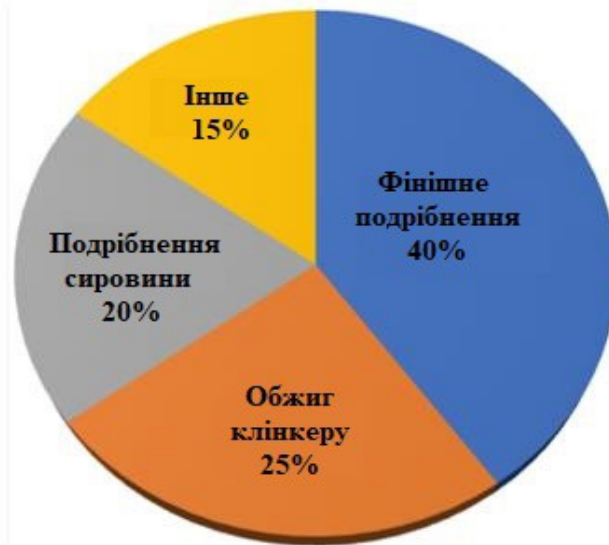


Рисунок 1.7 - Розподіл енергії між обладнанням для виробництва цементу

Як зазначалося раніше, незважаючи на те, що піч є найбільшим рухомим обладнанням на цементному заводі, вона не є найбільш енергоємним обладнанням, вона використовує лише 25% енергії заводу. Найбільш енергоємним процесом виробництва цементу є фінішне подрібнення, на яке витрачається в середньому 40% від загальної енергії, необхідної для виробництва тони цементу [2, 5]. Таке високе значення можна виправдати тим, що значна кількість енергії, що подається двигуном млина, виділяється у вигляді тепла, що створюється при терті в середовищі подрібнення. Крім того, потреба в енергії подрібнення гіперболізовано зростає зі збільшенням розміру частинок цементу [2].

Застосування СППР для управління режимами роботи цементного млина викликає серйозні труднощі, пов'язані з необхідністю виявлення процесу подрібнення.

Коефіцієнти передачі млина знаходяться в нелінійній залежності від розміру частинок матеріалу, що подрібнюється, тому виникає проблема побудови адекватної моделі, яка, з одного боку, повинна коригуватися за середніми характеристиками, з іншого боку, повинна стежити за поточними характеристиками млина. Побудова такої моделі є складною задачею. У

літературі використання нейронних мереж в даний час вважається перспективним. Основна перевага запропонованого методу полягає в тому, що немає необхідності заздалегідь розробляти точну фізичну модель подрібнюючого контуру. Замість цього нейронна мережа буде налаштована для об'єкта в режимі онлайн на основі статистики роботи.

1.5 Постановка задачі дослідження

Вище був представлений огляд моделей і методів управління і використання нейронних мереж. З метою підвищення енергоефективності та якості помолу клінкеру в замкнутому циклі подрібнення були розглянуті такі підходи, як нелінійне прогнозне управління, нейроадаптивне управління, управління нечіткою логікою, управління ковзним режимом, управління експертною системою та ін.

Недоліками розглянутих способів:

- Наведені вище моделі на основі нейронних мереж вимагають великих статистичних даних протягом тривалого періоду.
- В автоматизації процесу подрібнення відсутні процедури прийняття рішень за багатьма показниками в суперечливих умовах.

У роботі запропоновані наступні методи вирішення поставлених завдань з усуненням перерахованих недоліків:

- Метод виявлення шаблонів замкнутого циклу подрібнення на основі двох типів статистичних даних:
 - Загальна статистика;
 - Локальна статистика в поточний момент часу на основі методу регуляризації.
- Метод прийняття ефективних рішень, заснований на явному представленні поточних значень показників при суперечливих умовах.

Висновки до розділу:

У першому розділі було проведено огляд сучасного стану наукових досліджень у сфері світової цементної промисловості, приділяючи особливу увагу технологіям процесу помолу та підходам до підвищення енергоефективності та якості цементу. Проаналізовано сучасні моделі керування замкнутими циклами подрібнення, серед яких нелінійне прогнозне керування, нейроадаптивні методи, системи на основі нечіткої логіки, управління ковзним режимом та експертні системи.

Огляд показав, що, незважаючи на значний прогрес у застосуванні інтелектуальних методів, існують суттєві обмеження. Зокрема, моделі на основі нейронних мереж потребують великих обсягів статистичних даних, зібраних протягом тривалого часу, що ускладнює їх застосування в реальних виробничих умовах. Крім того, в автоматизації процесу подрібнення відсутні ефективні механізми прийняття рішень за множиною показників у ситуаціях, коли вони є суперечливими.

Для подолання виявлених недоліків у роботі запропоновано низку підходів. Перший - метод виявлення шаблонів замкнутого циклу подрібнення на основі двох типів статистичних даних: загальної довгострокової статистики та локальних даних поточного стану із застосуванням регуляризації. Другий - метод прийняття ефективних рішень, що базується на явному урахуванні поточних значень технологічних показників у суперечливих умовах.

Таким чином, проведений аналіз дозволив сформулювати обґрунтовані напрями вдосконалення систем керування процесом помолу клінкеру, що забезпечують підвищення енергоефективності, стабільності технологічного режиму та якості готового цементу.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТА СТРУКТУРА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДРІБНЕННЯ ЗАМКНЕНОГО ЦИКЛУ

2.1 Процедура ідентифікації характеристик процесу помелу клінкеру на основі оптимальної регуляризації задачі

Порядок розв'язання проблеми ідентифікації складається з таких етапів:

- формування та нормалізація загального набору даних про технологічний процес подрібнення клінкеру;
- побудова нейромережевої нелінійної моделі технологічного процесу подрібнення на нормалізованій загальній вибірці даних;
- Побудова оперативної корекції рішень моделей нейронних мереж на локальних вибірках даних на основі оптимальної регуляризації розв'язання задач на поточний момент часу.

Структурна схема процесу виробництва цементу замкнутого циклу наведена на рисунку 2.1.

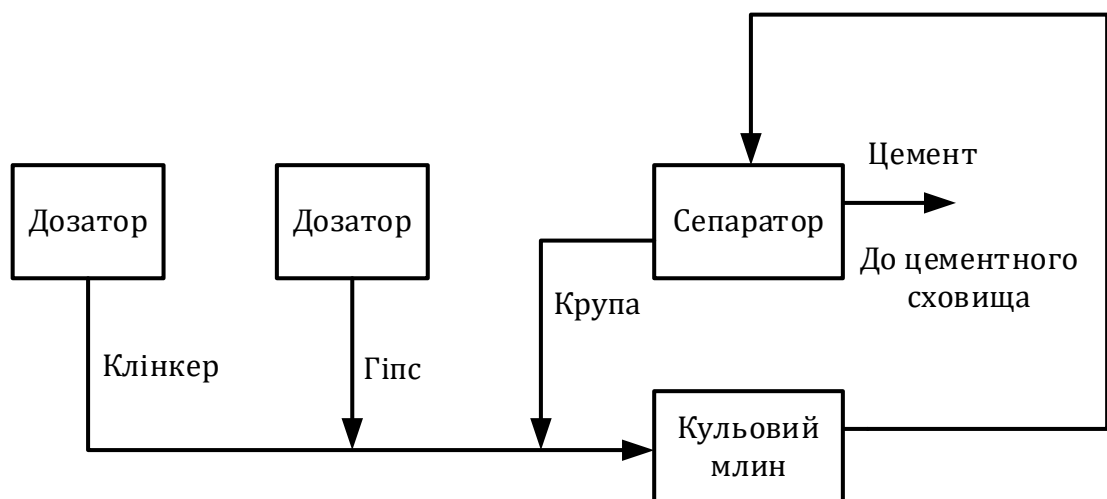


Рисунок 2.1 - Структурна схема помелу клінкеру

Показники, що використовуються для оцінки якості та ефективності управління процесом подрібнення клінкеру:

- Крупа – обсяг сировини, що надійшов для повторного помелу в млині;
- Споживання електроенергії;
- Блейн є показником тонкості помелу сировини;
- Звук млина – показник, пропорційний рівню завантаження млина;
- Частота обертання двигуна млина
- Циркулююче навантаження - це маса циркулюючої крихти.

Для вирішення задачі оперативного управління млином будемо використовувати математичні моделі каналів управління у вигляді передавальних функцій з наступними входами і виходами:

Входи:

- поставка сировини, т/год;
- частота обертання сепаратора, об/хв

Виходи:

- блейн, см²/г;
- споживання електроенергії, кВт·год/т;
- звук млина, дБ;
- швидкість обертання двигуна млина, об/хв;
- крупи, т/ч.

Динамічна модель для кожного виводу виглядає так:

$$y_i = K_{1i}h_{1i} + K_{2i}h_{2i}, i = 1, 2, \dots, 5; \quad (2.1)$$

$$h_{1i} = \left(e^{-\tau_{1i}s} / (1 + T_{11,i}s)(1 + T_{12,i}s) \right) u_1; \quad (2.2)$$

$$h_{2i} = \left(e^{-\tau_{2i}s} / (1 + T_{21,i}s)(1 + T_{22,i}s) \right) u_2. \quad (2.3)$$

де y_i – вихідні показники, u_1, u_2 – вхідні параметри; K_{1i}, K_{2i} – коефіцієнти передачі від вхідних параметрів до вихідних показників відповідно. Динаміка розглянутих процесів у часі описується тут за величинами $h_{1i}(t), h_{2i}(t)$. Ці

значення в статистиці збігаються зі статичними значеннями вхідних параметрів: $h_{1i,ct} = u_{1,ct}$, $h_{2i,ct} = u_{2,ct}$. В динаміці процеси $h_{1i}(t), h_{2i}(t)$ характеризуються часом запізнення τ_{1i}, τ_{2i} і сталими часу $T_{11,i}, T_{12,i}, T_{2,i}, T_{21,i}$, відповідно.

Згідно з інструкцією технологічного процесу, майстер млина після виконання коригувальних дій на основі зміни вхідних параметрів повинен переконаватися в тому, що корекція процесу пішла в правильному напрямку. Така умова обумовлена високим ступенем невизначеності характеристик млина і служить цілям забезпечення безпеки та ефективності управління робочим режимом. Беручи до уваги цю граничну умову, ми не будемо в майбутньому розглядати відносно швидкі перехідні процеси робочих параметрів. Будуть розглядатися тільки відносно повільні нестационарні процеси, які мають нестационарні передавальні числа:

$$\{K_{1i,s}, K_{2i,s}; i = 1, 2, \dots, 5; s \in S_T\}, \quad (2.4)$$

де S_T – безліч статистичних спостережень за робочими параметрами і показниками млина в процесі його роботи.

Визначення коефіцієнтів передавального коефіцієнта (2.4) проводиться в три етапи:

1. формування загального набору регулярних даних про режими роботи і показники стану;
2. побудова моделі взаємозв'язку між вхідними параметрами та вихідними показниками режимів роботи шляхом налаштування нейронної мережі на загальному наборі даних;
3. побудова уточненої моделі взаємозв'язку між вхідними та вихідними показниками на локальній вибірці даних.

Перший етап полягає в зборі всієї інформації про режими роботи млина. Це дані режимів роботи, технологічні випробування, норми експлуатації обладнання, технологічні інструкції. Вся ця інформація зводиться у вигляді таблиць, номограм, формул, які в сукупності дають загальне уявлення про

функціонування млина.

Загальна сукупність даних суперечлива, оскільки інформація з різних джерел зазвичай містить дані різного ступеня достовірності з різних причин. Підхід до нормалізації даних в даній роботі полягає в тому, що серед розглянутих даних стоїть завдання виявити регулярні дані, які відповідають певним характеристикам. Тут використовується наступний критерій регулярності даних.

Ознака закономірності: дані в межах певних допусків відображають загальний характер їх взаємозв'язку, встановленого в рамках відповідної галузі технологічних знань. Формально це співвідношення можна визначити як дискримінанту функції:

$$\underline{y_i} \leq f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2) \leq \overline{y_i}, \quad i = \overline{1, 5}; \quad (2.5)$$

$$\underline{u_1} \leq u_1 \leq \overline{u_1}, \quad (2.6)$$

$$\underline{u_2} \leq u_2 \leq \overline{u_2} \quad (2.7)$$

де $\underline{y_i}, \overline{y_i}$ – нижня і верхня межі допустимих значень дискримінантної функції, $\underline{u_1}, \underline{u_2}; \overline{u_1}, \overline{u_2}$ – нижня і верхня межі допустимих значень вхідних параметрів; $\mathbf{c}_i$ – вектор структурних параметрів залежності $f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2)$.

У загальному випадку залежності (2.5) можуть мати різну природу: лінійну, квадратичну, логарифмічну і т.д. Наприклад, лінійна залежність буде виглядати так:

$$f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2) = c_{i0} + c_{i1}u_1 + c_{i2}u_2.$$

Порядок розпізнавання регулярних даних виглядає наступним чином. На генеральній вибірці даних S_T формується система нерівностей:

$$\underline{y_{i,s}} - f_i(\mathbf{c}_i; u_{1,s}, u_{2,s}) \leq 0: \mu_{i,s}; \quad (2.8)$$

$$f_i(\mathbf{c}_i; u_1, u_2) - \overline{y_i} \leq 0: v_{i,s}; \quad (2.9)$$

$$i = \overline{1, 5}; \quad s \in S_T. \quad (2.10)$$

де $\mu_{i,s}, v_{i,s}$ – характеристичні функції відповідних нерівностей, приймають

булеві значення 1, 0. Коли характерні функції нерівностей дорівнюють 1, то нерівності виконуються. В іншому випадку вони не виконуються.

Поставлене завдання полягає у визначенні допустимих значень векторів структурних параметрів $\mathbf{c}_i$, визначаючих максимальну спільну підсистему нерівностей (2.8-2.10) за критерієм

$$\max_{\{\mathbf{c}_i\}} \left(\sum_i \sum_s (\mu_{i,s} + \nu_{i,s}) \right). \quad (2.11)$$

Розв'язок задачі (2.11) здійснюється в інтерактивному режимі, в якому межі нерівностей (2.8-2.10) максимально розширюються без втрати ознаки регулярності даних. В результаті буде отримана максимальна спільна підсистема регулярних даних S_p . Дана множина S_p буде підмножиною генеральної сукупності даних $S_p \subseteq S_r$.

Розв'язок задачі (2.8-2.11) здійснюється на основі поєднання градієнтного методу знаходження рішення з алгоритмом перебору.

Градієнтний метод знаходження розв'язку ґрунтується на рекурентному відношенні наступного типу

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{i,k} &= \mathbf{c}_{i,k-1} - \gamma \left(\sum_i \sum_s \left(-(e_{1,k-1})^+ + (e_{2,k-1})^+ \right) \right) \text{grad} f_i(\mathbf{c}_{i,k-1}; u_{1,s}, u_{2,s}), \\ e_{1,k-1} &= \overline{y_{i,s}} - f_i(\mathbf{c}_{i,k-1}; u_{1,s}, u_{2,s}), \\ e_{2,k-1} &= f_i(\mathbf{c}_{i,k-1}; u_1, u_2) - \overline{y_i} \end{aligned}$$

На основі градієнтного методу знайдено початкову суглобову підсистему нерівностей. Далі вона послідовно розширюється шляхом послідовного з'єднання несумісних нерівностей. Якщо при цьому зв'язку несумісна нерівність стає кооперативною, то вона включається в розширену спільну підсистему нерівностей. Рішення систем нерівностей проводиться до тих пір, поки не буде отримана найбільша з'єднана підсистема.

У простому випадку, коли тестуються тільки двійкові відносини параметрів типу:

$$y = c_0 + c_1 u,$$

Розв'язок можна отримати аналітичним шляхом на основі методу найменших квадратів.

У цьому випадку штатні дані задовольняють наступним умовам

$$\left(\underline{y}_i \leq y_{i1,s}(u_{1,s}) \leq \overline{y}_i \right) \cup \left(\underline{y}_i \leq y_{i2,s}(u_{2,s}) \leq \overline{y}_i \right), \quad i = \overline{1,5}; \quad s \in S_{\Gamma};$$

де

$$y_{i1,s} = c_{0,i1} + c_{1,i1}u_{1,s}, \quad y_{i2,s} = c_{0,i2} + c_{1,i2}u_{2,s}.$$

Невідомі коефіцієнти залежностей обчислюються за загальними формулами методу найменших квадратів:

$$\Delta u_s = u_s - u_{\text{ср}}; \quad c_0 = y_{\text{ср}}; \quad c_1 = \sum_s \Delta y_s \Delta u_s / \sum_s \Delta u_s \Delta u_s$$

На другому етапі нейронні мережі, які в загальному випадку є нелінійними, налаштовуються на нормалізованій загальній вибірці даних

$$y_i^{HC} = F_i^{HC}(\mathbf{w}_i^{HC}; u_1, u_2), \quad i = 1, 2, \dots, 5; \quad (2.12)$$

де $\mathbf{w}_i^{HC}$ – настроювані ваги нейронних мереж.

На третьому етапі проводиться корекція нейромережових рішень на локальних зразках даних.

Локальні вибірки даних – це масиви мережових помилок із заданими локальними входами:

$$\{\Delta y_{i,s}; u_{1,s}, u_{2,s}; s \in I_L\}_t, \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (2.13)$$

$$\Delta y_{i,s} = y_{i,s}^{\phi} - y_{i,s}^{HC}, \quad s \in I_L, \quad (2.14)$$

де $\Delta y_{i,s}$ – відхилення фактичних значень вихідних показників у s -ом реальному спостереженні $y_{i,s}^{\phi}$ від результатів розрахунку значень вихідних показників $y_{i,s}^{HC}$ за допомогою нейронних мереж для значень вхідних даних $u_{1,s}, u_{2,s}$.

Допустимо, що факторні корекції є лінійними:

$$\Delta y_i^{\text{кор}} = a_{i0}u_0 + a_{i1}u_1 + a_{i2}u_2, \quad i = 1, 2, \dots, 5; \quad u_0 = 1. \quad (2.15)$$

У цьому випадку середньоквадратичні похибки корекції мають вигляд

$$E_{\text{кор } i}^2 = 0.5 \sum_s (\Delta y_{i,s}^{\text{кор}} - a_{i0}u_{0,s} - a_{i1}u_{1,s} - a_{i2}u_{2,s})^2, \quad i = 1, 2, \dots, 5. \quad (2.16)$$

Завдання полягає у визначенні невідомих коефіцієнтів a_{i0}, a_{i1}, a_{i2} залежностей (2.15) за критеріями мінімальних стандартних помилок (2.16).

Особливість задачі полягає в тому, що вона вирішується на локальній вибірці даних. У той же час інформація, яку несе з собою місцева вибірка, може виявитися недостатньою для однозначного вирішення проблеми. Тому для стійкого і однозначного вирішення проблеми введемо додаткову умову поправочних коефіцієнтів у вигляді регулярної межі.

$$R_{\text{кор}}^2 = 0,5 \sum (a_0^2 + a_1^2 + a_2^2). \quad (2.17)$$

В результаті постановка задачі мінімізації похибки корекції трансформується в проблему мінімізації складного критерію

$$Q_R = (1 - \alpha_R) E_{\text{кор}}^2 + \alpha_R R_{\text{кор}}^2. \quad (2.18)$$

Відповідно до відомих умов оптимальності для методу найменших квадратів оптимальний розв'язок тут визначається на основі розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$(1 - \alpha_R) \sum_{j=0}^2 c_{ij} a_j + \alpha_R a_i = (1 - \alpha_R) d_i, \quad i = 1, \dots, 5 \quad (2.19)$$

$$c_{ij} = \sum_s u_{i,s} u_{j,s}; \quad d_i = \sum_s \Delta y_{i,s} u_{i,s}.$$

Проблемним питанням тут є вибір коефіцієнта регуляризації α_R .

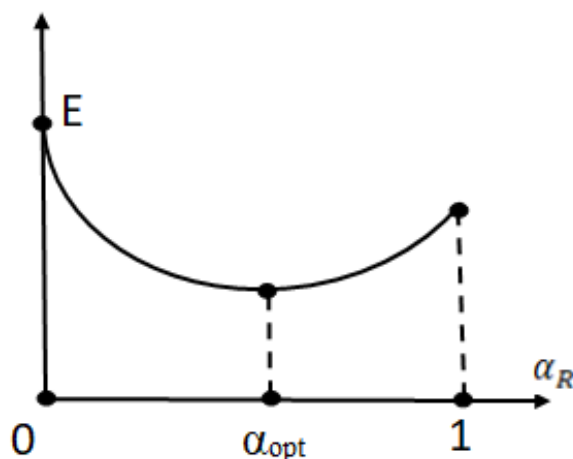


Рисунок 2.2 - Вибір коефіцієнта регуляризації

Коефіцієнт регуляризації має прямий вплив на точність прогнозу. Так при $\alpha_R = 0$ розв'язок задачі (2.18), (2.19) вироджується в метод найменших квадратів без регуляризації. Цей метод дає мінімальну похибку представлення залежностей (2.15) тільки на навчальній вибірці даних. Однак зразок навчання тут місцевий. Для оцінки прогностичних властивостей отриманого рішення додатково потрібна локальна вибірка даних верифікації, яка не має відношення до навчальної. У зв'язку з локальним характером навчальної вибірки тут можна постулювати підвищену похибку в перевірочній вибірці з цим рішенням. Однак саме похибка в перевірочній вибірці служить оцінкою прогностичних властивостей отриманої коригувальної залежності.

З іншого боку, $\alpha_R = 1$, рішення буде тривіальним і дорівнюватиме нулю. У цьому випадку верифікаційна вибірка буде представляти рішення з нейронної мережі, налаштованого на майстер-зразок за критерієм мінімальної похибки.

Тут є протиріччя. Тому вибір значення коефіцієнта регуляризації повинен здійснюватися на компромісній основі, наприклад, коли заданий коефіцієнт регуляризації досягає мінімального значення похибки на локальній перевірочній вибірці. Це оптимальне рішення проблеми вибору коефіцієнта регуляризації.

2.2 Побудова та навчання нейронних мереж

На початковому етапі побудови алгоритмів виявлення значень параметрів моделі в реальному часі використовувалися стандартні нейромережеві програми з самого початку для оцінки номінальних значень параметрів на великих обсягах даних. З цією метою були створені нейронні мережі, кожна з яких складається з чотирьох підмереж. У кожній підмережі узагальнювалася статистика по кожному з виходів моделі, а нейронні мережі будувалися і тренувалися в графічному інтерфейсі Matlab "Neural Network Toolbox". Цей пакет додатків використовується для побудови нейронних

мереж прямого поширення, що складаються з двох шарів. Для прихованого шару використовується функція активації сигмоїда, а для вихідного шару - лінійна функція активації. Число нейронів у всіх підмережах однаково і дорівнює двом.

В якості навчальної вибірки ми використовуємо статистичні дані за тривалий період. Фрагмент таких даних представлений в таблиці 2.1. Вихідні дані поділяються на три набори: навчальна вибірка, валідаційна вибірка та тестова вибірка, у відсотковому співвідношенні 70%, 15%, 15% відповідно.

Таблиця 2.1 - Фрагмент статистичних даних

Подача, т/г	Швидкість сепаратору, об/хв.	Гіпс, %	Питома витрата електроенергії кВт*г/т	Повернення крупки, т/г	Звук млина.	Мотор, %	Блейн (D')
120	150	4,1	38	59	82	79,3	16,8
120	148	4	38,1	63	83,3	79,1	16,9
120	148	4	38,3	68	81,9	79,3	16,7
120	148	3,8	38	69	82,7	79,3	16,6
120	145	4	41	67	85,4	75,8	16,5
120	142	4	43	68	90	75	17
120	140	4,1	41,2	68	87,7	76,7	16,9
120	138	4,1	39	56	86,9	81,7	16,7
120	135	4,1	39,1	62	84	80,4	16,7
120	135	3,6	42	40	83,4	78,8	18,5

Для навчання даних нейронних мереж в умовах задачі ідентифікації використовується нелінійний алгоритм Левенберга-Марквардта. Алгоритм дозволяє оптимізувати параметри моделі нелінійної регресії. Для оцінки якості оптимізації використовується середня квадратична похибка моделі на

навчальній вибірці. Оптимізація параметрів відбувається шляхом послідовного наближення заданих початкових умов до шуканого локального оптимуму.

Завдання полягає у визначенні вагових коефіцієнтів, які відповідають мінімальній похибці мережі

$$E_D = \sum_{s=1}^N (y_s - f(w, x_s))^2 \quad (2.20)$$

При цьому на кожному кроці ітерації уточнюється значення вектора вагових коефіцієнтів – $w := w + \Delta w$, з урахуванням умови.

$$f(w + \Delta w, x) \approx f(w, x) + J \Delta w, \quad (2.21)$$

де J – матриця коефіцієнтів лінеаризації функції $f(w, x)$, у точці w .

Приріст Δw впливає з необхідної умови мінімальної функції

$$E_D = |y - f(w + \Delta w)|^2 \quad (2.22)$$

де

$$f(w + \Delta w) = [(f(w + \Delta w, x_1), \dots, f(w + \Delta w, x_N))]^T. \quad (2.23)$$

В результаті, щоб знайти Δw необхідно розв'язати систему нелінійних рівнянь

$$\Delta w = (J^T J)^{-1} J^T (y - f(w)). \quad (2.24)$$

Матриця $J^T J$ може значно вироджуватися. Щоб усунути цей недолік, я ввів параметр регуляризації $\lambda \geq 0$. В результаті вираз (2.24) перетворюється наступним чином

$$\Delta w = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (y - f(w)), \quad (2.25)$$

де I – одинична матриця.

На кожній ітерації алгоритму присвоюється параметр регуляризації. Якщо значення помилки E_D швидко зменшується, потім з невеликим значенням λ алгоритм вироджується в алгоритм Гаусса-Ньютона.

Алгоритм настройки мережі з використанням коефіцієнта (2.25) на загальну сукупність даних дозволяє отримати середні значення вагових коефіцієнтів ω_{cp} . На їх основі нейронна мережа може бути використана для

оцінки середніх значень вихідної функції мережі за заданими вхідними даними

$$y_{cp}^* = f(\omega_{cp}, x) \quad (2.26)$$

Для вирішення завдань оперативного управління, поряд із середнім значенням вихідної функції, доцільно також знати поточну оцінку відхилення вихідної функції Δy^* від середньої оцінки y^* :

$$y^* = y_{cp}^* + \Delta y^* \quad (2.27)$$

Ця проблема може бути вирішена за допомогою додаткової нейронної мережі, орієнтованої на оцінку поточних відхилень вихідної функції від середніх значень.

Після навчання нейронної мережі необхідно визначити якість налаштування нейронної мережі. Одним із таких критеріїв є відхилення значення на виході нейронної мережі від значення з тестових даних, яке відповідає значенню на вході нейронної мережі. Цей показник можна оцінити з використанням гістограми розподілу помилок нейронної мережі

2.3. Оперативне нейрокерування контуром подрібнення шихти

Розглянуте оперативне нейрокерування контуром подрібнення моделюється в середовищі MATLAB/Simulink з використанням вбудованого пакету Neural Network та набору інструментів. Пропонований метод дуже зручний для користувача, і оператори можуть бачити результати за допомогою графіків для кращого керування системою.

Основна мета оперативного нейрокерування контуром подрібнення - максимально наблизити установку до проєктних значень шляхом розрахунку оптимальних заданих значень відповідно до властивостей подачі та умов роботи млина.

Переваги оперативного нейрокерування контуром подрібнення:

1. Оперативне нейрокерування може контролювати декілька параметрів одночасно, тоді як оператор диспетчерської не може контролювати декілька параметрів за такий короткий час і обробляти змінні одночасно.

2. Оперативне нейрокерування оновлюється щогодини відповідно до робочих даних млина.

3. Оперативне нейрокерування підтримує продуктивність млина дуже близько до її проєктних значень [20] (з точки зору пропускної здатності) за допомогою оперативного моніторингу його робочого стану. Але люди-оператори завжди турбуються про стан перевантаження млина, тому вони зазвичай експлуатують млин нижче його оптимальних проєктних значень [16].

Нейронні мережі мають цілу низку властивостей, привабливих з погляду їх практичного використання на процесах подрібнення та класифікації:

- Висока швидкодія завдяки використанню паралелізму обробки інформації;
- Толерантність до помилок: працездатність зберігається при пошкодженні значної кількості нейронів;
- Здатність до навчання: програмування обчислювальної системи замінюється навчанням [19].

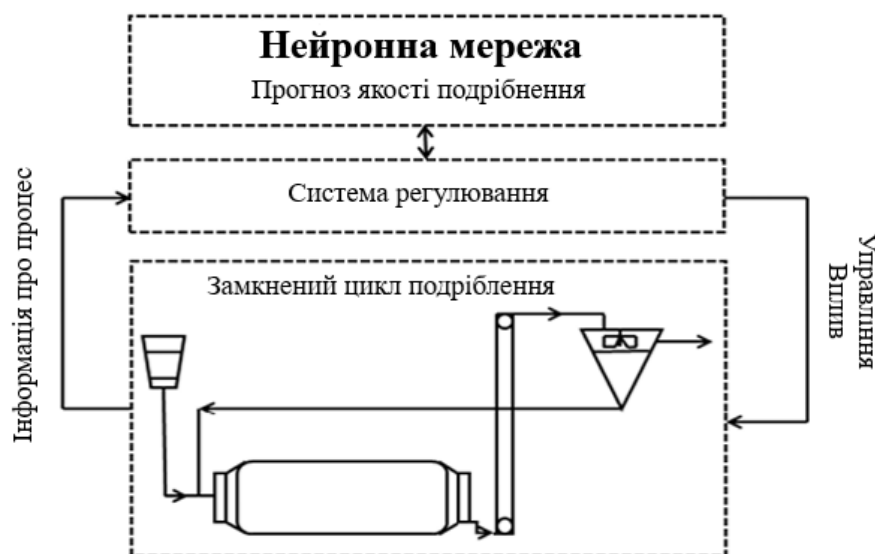


Рисунок 2.3. Структура системи управління процесом помелу замкнутого циклу

Ефективне керування процесом має велике значення для збільшення пропускної здатності контуру подрібнення та якості кінцевого продукту, оскільки призводить до значного зниження виробничих витрат [17]. Зворотний зв'язок у таких системах керування використовується для виправлення неточностей, пов'язаних із зовнішнім втручанням та неточністю математичної моделі об'єкта керування. Регулятор покладається на емпіричну модель процесу для прогнозування подальшої поведінки змінних стану на основі попередніх значень [23].

2.4 Дослідження системи керування замкненого контуру подрібнення

2.4.1 Збір та аналіз даних

Визначення комп'ютерної моделі для контуру подрібнення, аналіз матеріальних потоків, є важливим етапом. Експеримент для вибірки з матеріальних потоків контуру подрібнення було виконано на дослідному заводі. Було проведено аналіз процесу помелу на зміну швидкості потоку, швидкості обертання ротора класифікатора, повернення крупки, питомої витрати електроенергії, співвідношення гіпсу в клінкері, швидкості обертання двигуна млина, та визначена тонкість помелу за Блейном (D').

2.4.2 Контур подрібнення на дослідному заводі

У роботі проведено дослідний експеримент з оцінки якості подрібнення клінкеру в системі: двокамерний трубний млин із сепаратором. Дані за результатами циклу подрібнення в замкненому контурі представлені в таблиці 2.1.

Для тестування моделей нейронних мереж в якості вхідного параметра u використовуємо швидкість подачі гіпсу (u_1) і швидкість сепаратора (u_2). Регулюючи ці параметри за допомогою нейронної мережі, ми підвищуємо якість продукту та стабільність роботи млина при виробництві цементу. Для цього

необхідно розглядати залежність гіпсу та швидкості сепаратора з іншими параметрами.

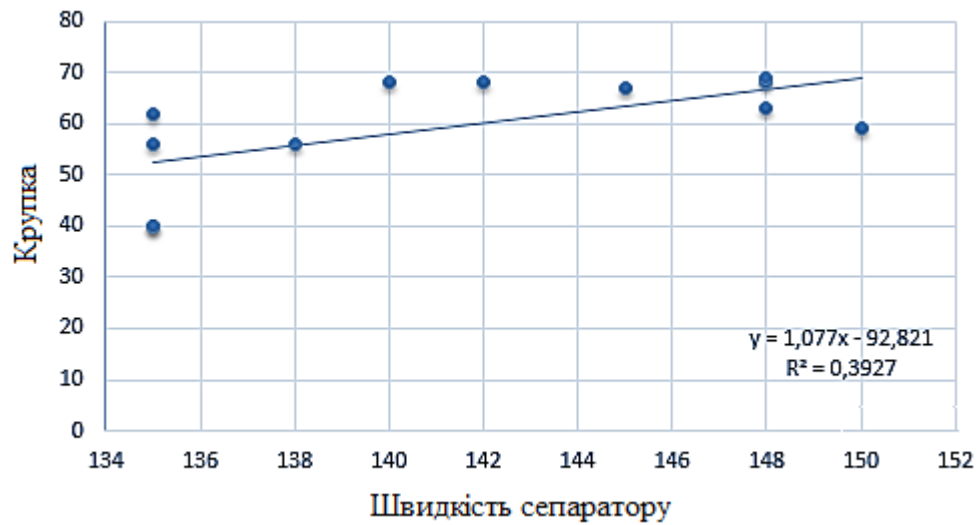


Рисунок 2.4 – Графік залежності виходу крупки від швидкості сепаратора

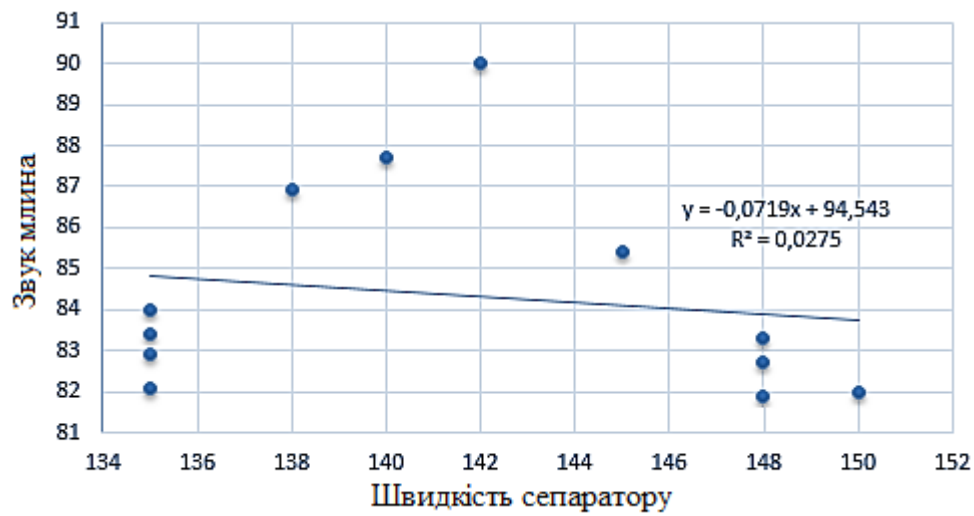


Рисунок 2.5 – Графік залежності звуку млина від швидкості сепаратора

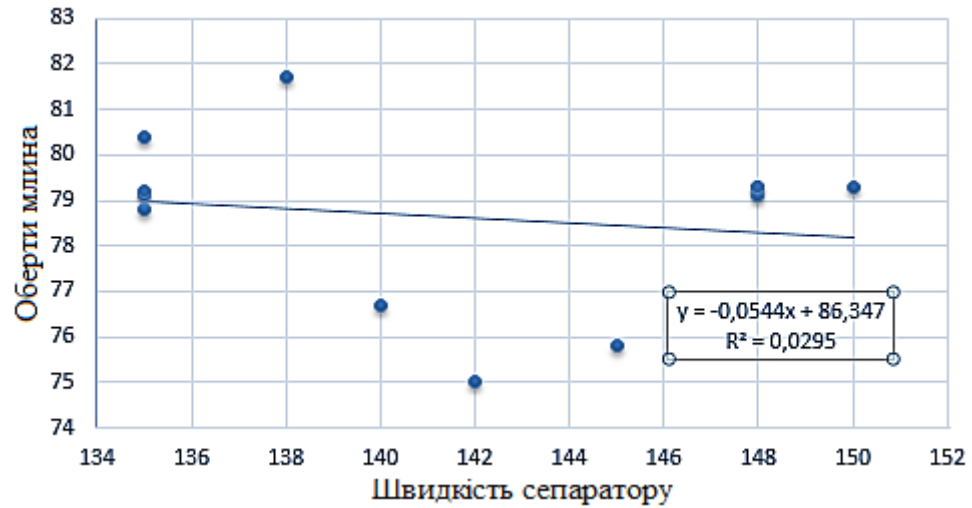


Рисунок 2.6 – Графік залежності оборот млина від швидкості сепаратора

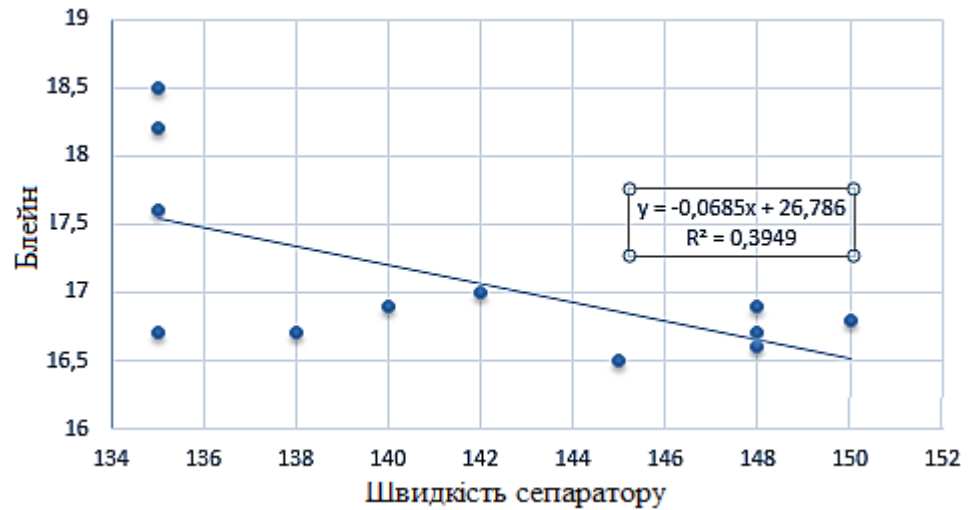


Рисунок 2.7 – Графік залежності Блейн (D') від швидкості сепаратора

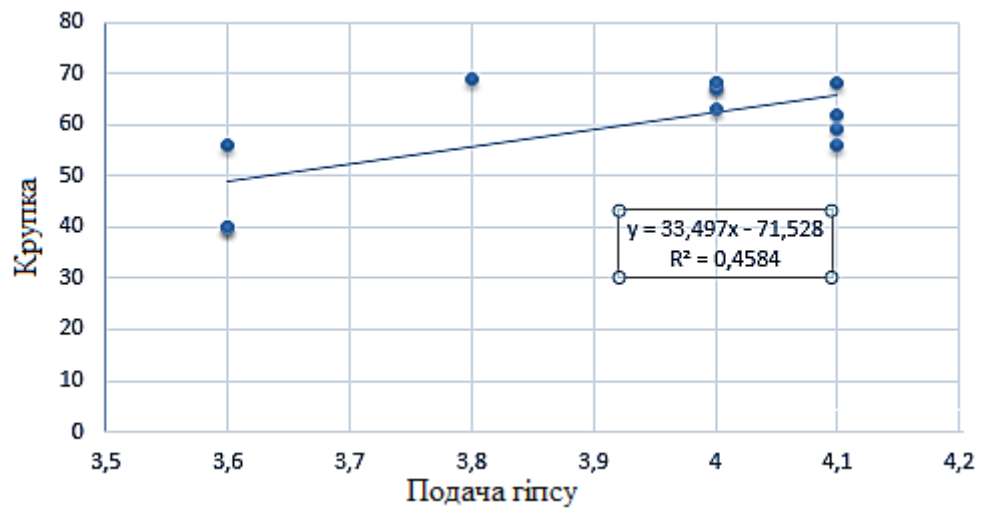


Рисунок 2.8 – Графік залежності виходу крупки від величини подачі гіпсу

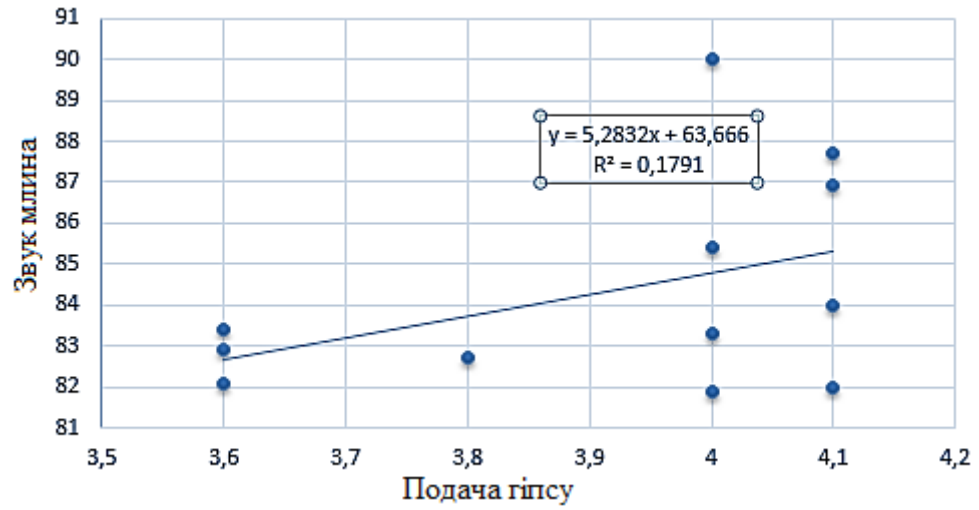


Рисунок 2.9 – Графік залежності звуку млина від подачі гіпсу

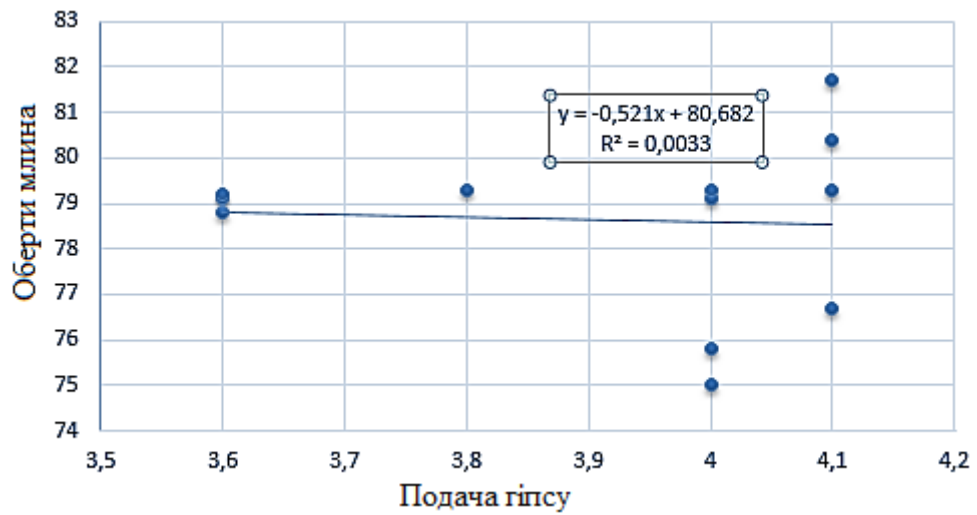


Рисунок 2.10 – Графік залежності перевертати млина від подачі гіпсу

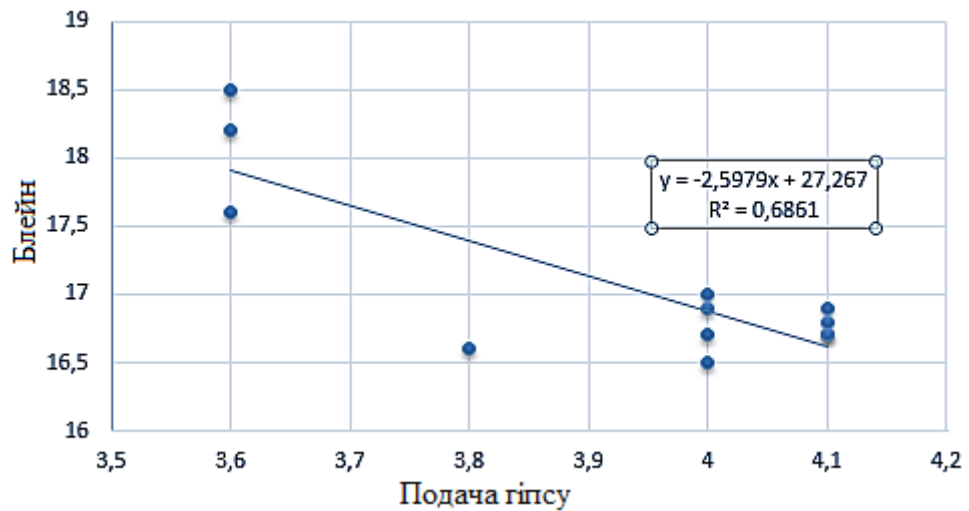


Рисунок 2.11 – Графік залежності Блейн (D') від подачі гіпсу

Значення регресії R вимірюють кореляцію між результатами та цілями. Значення R , що дорівнює 1, означає тісні відносини, 0 - випадкові відносини. Як видно з графіків, значення R на всіх графіках не перевищує 0.68. Це означає, що реальні дані без нормалізації не залежать одне від одного.

Нормалізація:

Важливо, щоб дані були нормалізовані. В іншому випадку, важливі змінні процесу не потраплять у потрібний діапазон, і мережа їх не використає. Для нормалізації даних у дослідженні використовується метод найменших квадратів. У попередній таблиці показані реальні дані, отримані у виробництві, таблиця 2.2 - дані після нормалізації.

Окремий випадок розв'язання задачі побудови дискримінантних функцій.

$$(\underline{y_i} \leq y_{i1,s}(u_{1s}) \leq \overline{y_i}) \cup (\underline{y_i} \leq y_{i2,s}(u_{2s}) \leq \overline{y_i}) \quad (2.28)$$

$$y_{i1} = a_1 + b_1 u_1, \quad y_{i2} = a_2 + b_2 u_2, \quad (2.29)$$

$$a_i = \frac{\sum y_i \sum u_s^2 - \sum u_s \sum u_s y_i}{N \sum u_s^2 - \sum u_s \sum u_s} \quad (2.30)$$

$$b_i = \frac{N \sum u_s^2 y_i - \sum u_s \sum y_i}{N \sum u_s^2 - \sum u_s \sum u_s} \quad (2.31)$$

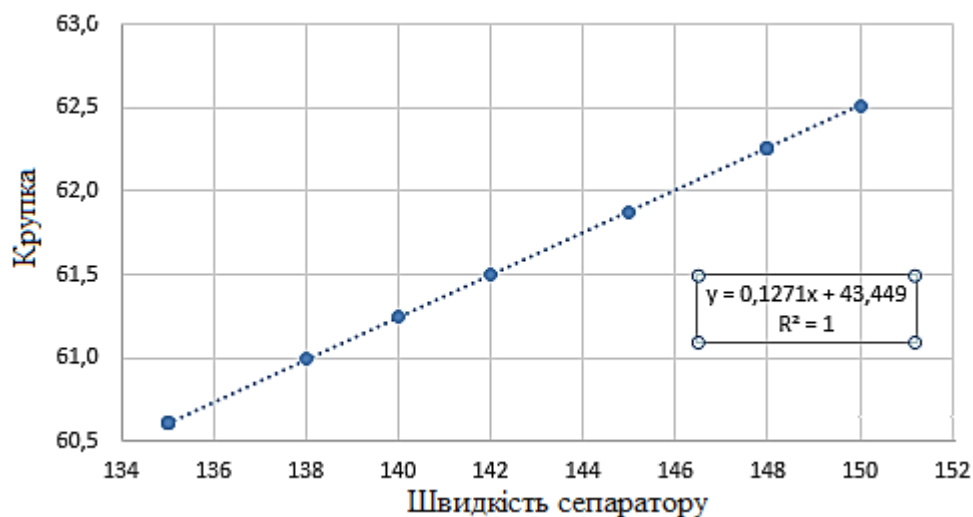


Рисунок 2.12 – Графік залежності крупки від швидкості сепаратора після нормалізації даних

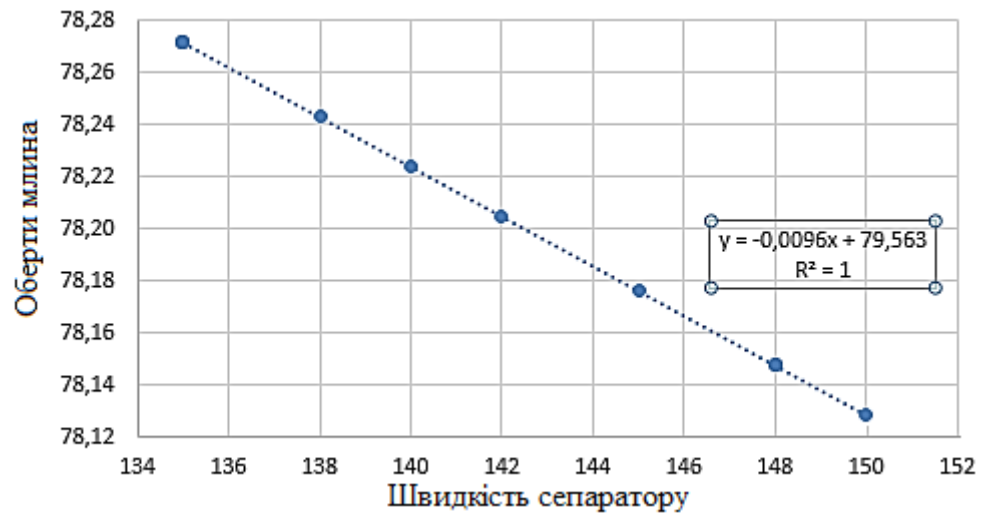


Рисунок 2.13 – Графік залежності оборот млина від швидкості сепаратора після нормалізації даних

Таблиця 2.2 – Дані після нормалізації

Подача т/год	Швидкість сепаратора об/хв	Гіпс %	Питома витрата електроенергії кВт*год/т	Повернення крупки т/год	Звук млина	Мотор %	Блейн (D')
120	150	4,1	39,75	62,5	78,13	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	3,8	39,78	62,3	78,15	83,21	17,44
120	145	4	39,83	61,9	78,18	83,28	17,44
120	142	4	39,89	61,5	78,20	83,32	17,44
120	140	4,1	39,92	61,2	78,22	83,37	17,44
120	138	4,1	39,96	61,0	78,24	83,44	17,44
120	135	4,1	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44
120	135	3,6	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44

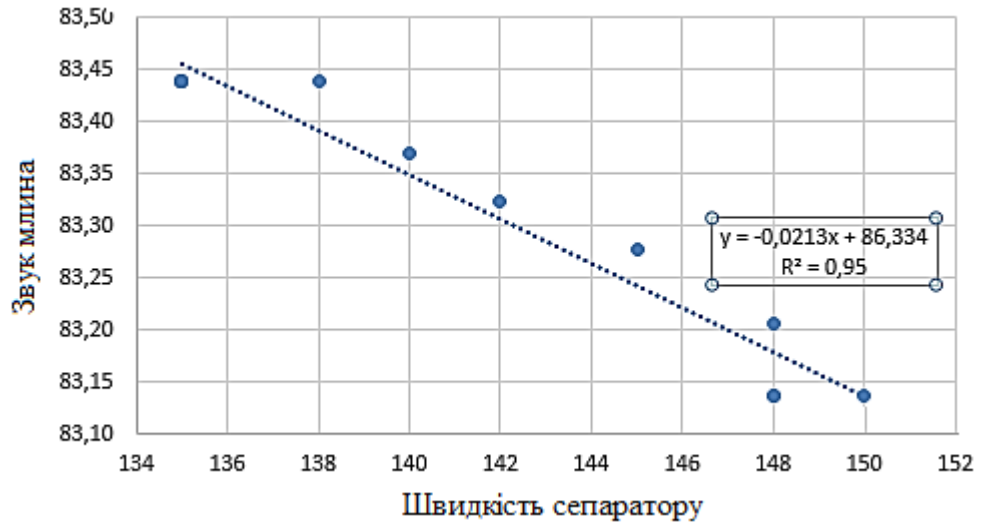


Рисунок 2.14 – Графік залежності звуку млина від швидкості сепаратора після нормалізації даних

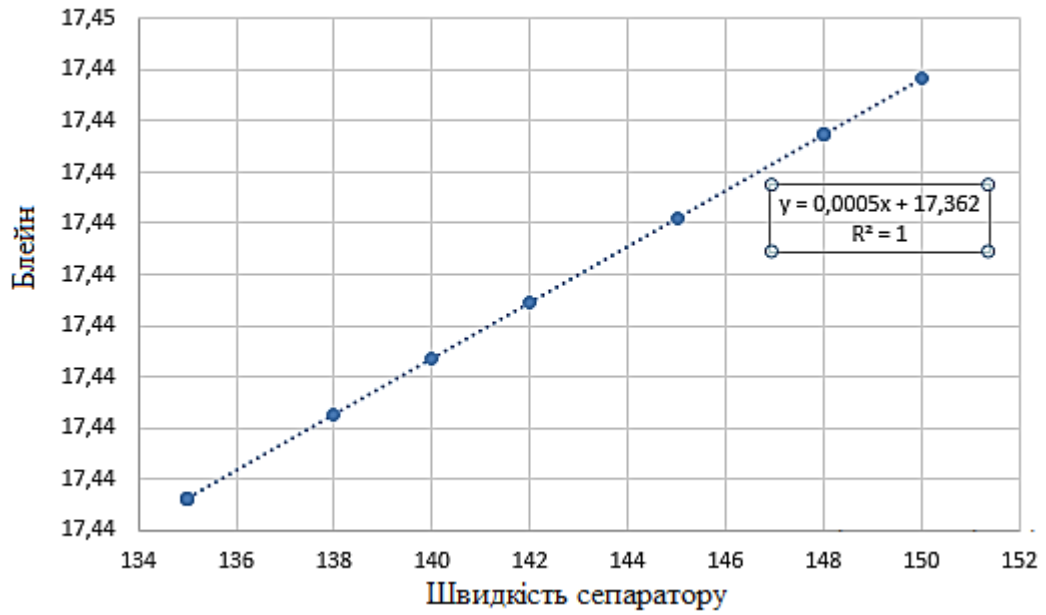


Рисунок 2.15 – Графік залежності ступеня тонкості помелу (Блейн, D') від швидкості сепаратора після нормалізації даних

Розглядаємо залежність подання гіпсу з іншими параметрами помелу після нормалізації даних

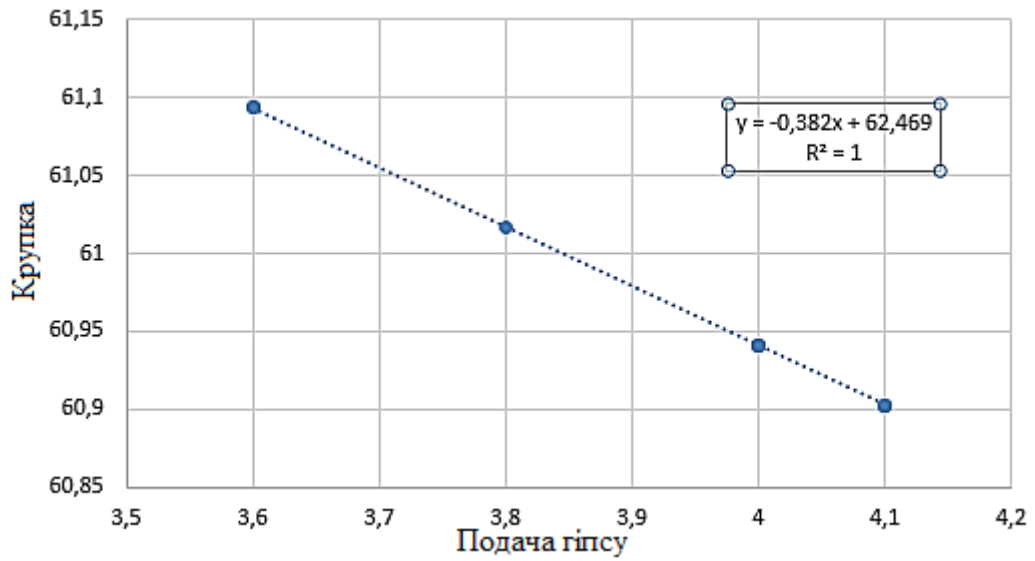


Рисунок 2.16 – Графік залежності крупки від подачі гіпсу після нормалізації даних

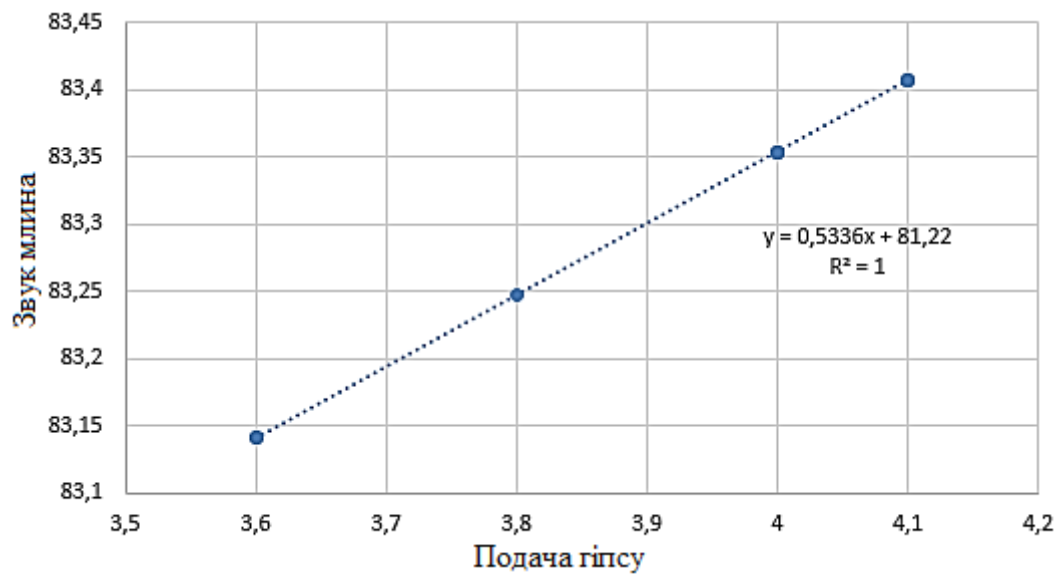


Рисунок 2.17 – Графік залежності звуку млина від подачі гіпсу після нормалізації даних

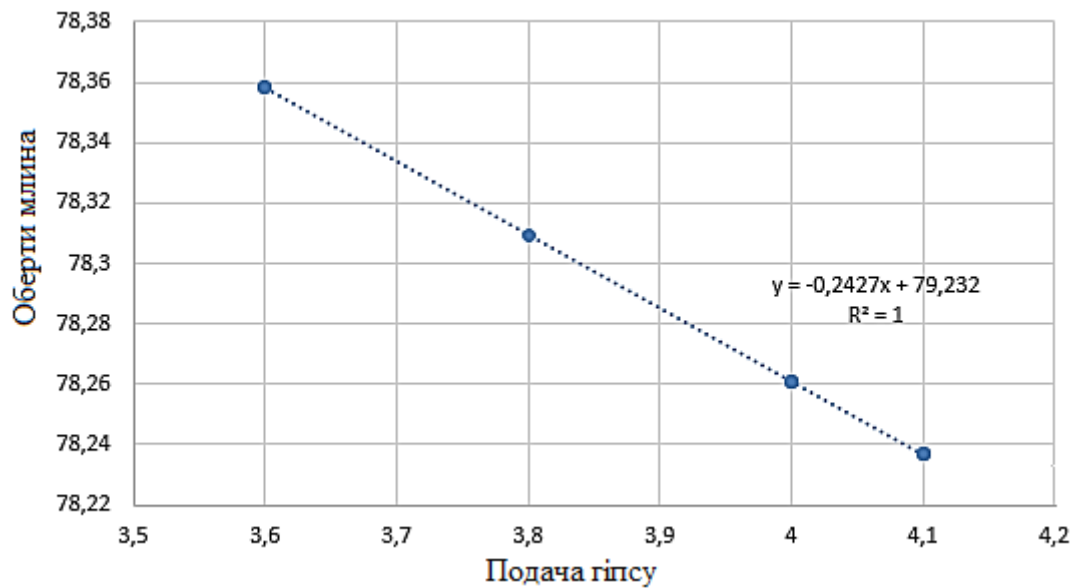


Рисунок 2.18 – Графік залежності перевертати млина від подачі гіпсу після нормалізації даних

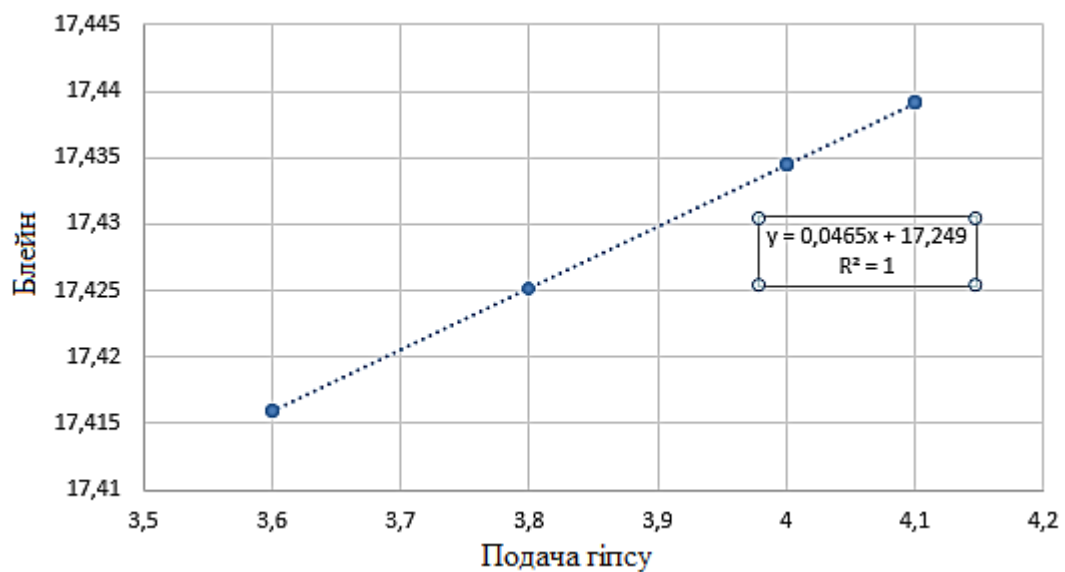


Рисунок 2.19 – Графік залежності ступеня тонкості помелу (Блейн, D') від подачі гіпсу після нормалізації даних

2.5 Налаштування нейронної мережі на нормалізованих генеральних даних

Другим етапом запропонованої методики є налаштування нейронної мережі на нормалізованих генеральних даних. Для вирішення цієї задачі можуть

бути використані різні нейронні мережі. У даній роботі пропонується алгоритм налаштування мережі на основі модифікованого методу зворотного поширення помилки, який враховує наявність двох статистичних даних: генеральної сукупності даних та локальних поточних даних.

Постановка задач ідентифікації реальних об'єктів на основі використання нейронних мереж із врахуванням локальної поточної статистики у загальному випадку є некоректною. Це виникає, наприклад, у випадку, якщо необхідна інформація для стійкого вирішення задачі відсутня в навчальній вибірці даних. Така постановка задачі є типовою для задач оперативного керування.

У задачах оперативного керування нестационарними об'єктами, параметри яких можуть змінюватися в суттєвих межах протягом короткого проміжку часу, необхідний спеціальний алгоритм налаштування. У цих випадках необхідно проводити регуляризацию постановки задачі налаштування нейронної мережі. Подібний алгоритм може бути побудований, наприклад, на основі розв'язання задачі мінімізації наступного квадратичного критерію точності:

$$\min_{\{w_{kj}\}} Q_T, \quad Q_T = (1 - \alpha_R) E_{bux}^2 + \alpha_R Q_R \quad (2.32)$$

$$Q_R = 0,5 \sum_k \sum_j (w_{kj} - w_{kj}^{cp})^2 \quad (2.33)$$

де $E_{вих}^2$ - середньоквадратична помилка нейронної мережі, Q_R -регуляризуюча функція, w_{kj} - поточні настроювані ваги нейронної мережі, w_{kj}^{cp} - усереднені значення ваг, які визначаються на великій вибірці даних при номінальних технічних умовах, α_R - питома вага квадратичних відхилень поточних значень ваг w_{kj} нейронної мережі від їхніх номінальних значень w_{kj}^{cp} . $\alpha_R \in [0, 1]$.

$E_{вих}^2$ - середньоквадратичну помилку нейронної мережі будемо представляти у вигляді:

$$E_{bux}^2 = 0,5 \sum_k (y_{0k} - y_k)^2 \quad (2.34)$$

де y_{0k} - необхідний (бажаний) вихідний сигнал мережі; y_k - спостережуваний вихідний сигнал.

Припустимо, що комбінований вхід до нейронного елемента мережі здійснюється на основі звичайного підсумовування:

$$a_k = \sum_j w_{kj} x_j \quad (2.35)$$

де w_{kj} - вагові коефіцієнти передачі сигналів із j -го НЕ (нейронного елемента) в k -ий НЕ; x_j - вихідні сигнали j -го НЕ.

Для налаштування НМ (нейронної мережі) необхідно оцінювати похідну помилки мережі за варіаціями ваг, що налаштовуються. З цією метою обчислення помилки мережі будемо здійснювати за формулою складного диференціювання:

$$\frac{\partial E_{bux}^2}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E_{bux}^2}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial a_k} \frac{\partial a_k}{\partial w_{kj}} \quad (2.36)$$

З (2.36) випливає:

$$\frac{\partial E_{bux}^2}{\partial y_k} = -(y_{0k} - y_k) \quad (2.37)$$

Покладемо вихідні функції НЕ (нейронного елемента) у загальному вигляді:

$$y_k = f_k(a_k) \quad (2.38)$$

Звідси:

$$\frac{\partial y_k}{\partial a_k} = f'_k(a_k) \quad (2.39)$$

З (2.37) випливає:

$$\frac{\partial a_k}{\partial w_{kj}} = x_j \quad (2.40)$$

Позначимо:

$$\delta_k = \frac{\partial E_{bux}^2}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial a_k} \quad (2.41)$$

З (2.39) та (2.41) випливає:

$$\delta_k = -f'_k(a_k)(y_{0k} - y_k) \quad (2.42)$$

У підсумку частинна похідна за вагами, що налаштовуються, матиме вигляд:

$$\frac{\partial E_{bux}^2}{\partial w_{kj}} = \delta_k x_j \quad (2.43)$$

Для налаштування ваг скористаємося градієнтним методом. У цьому випадку формула корекції ваг матиме вигляд:

$$\Delta w_{kj} = -\gamma \delta_k x_j \quad (2.44)$$

Формула корекції ваг (2.44) використовується для вихідних НЕ (нейронних елементів) мережі. Для прихованих елементів мережі ця формула не застосовна, оскільки для них не визначена величина помилки мережі. У методі зворотного поширення помилки для прихованих елементів мережі використовується спеціальна формула для оцінки величини δ мережі:

$$\delta_j = f'_j(a_j) \sum_k \delta_k w_{kj} \quad (2.45)$$

Сенс формули (2.45) полягає в тому, що оцінка δ_j для j -го НЕ приймається як зважена сума оцінок δ_k для k -го шару НЕ, що йде за ним. При цьому вага кожної оцінки δ_k приймається пропорційною вазі сигнального зв'язку w_{kj} . На цій основі помилка вихідного шару, так би мовити «відображається» на попередній прихований шар. У цьому і полягає суть методу зворотного поширення помилки.

У підсумку формула корекції ваг для прихованих шарів матиме вигляд:

$$\Delta w_{ji} = -\gamma \delta_j x_i \quad (2.46)$$

Загалом процедура корекції ваг має ітераційний характер, поширюючись по шарах від виходу нейронної мережі до її входу.

Налаштування нейронної мережі за критерієм (2.45) відбувається у два етапи.

На першому етапі формується база даних великої вибірки, що відповідає номінальним режимам функціонування об'єкта керування, що розглядається. Тут необхідно зазначити, що об'єкти керування, наприклад, у техніці, як правило, характеризуються великою передісторією вивчення. Ці знання складаються з даних, отриманих на основі раніше проведених експериментальних та

теоретичних досліджень, практики експлуатації, фізичних законів, моделювання та інших джерел достовірної інформації. Припустимо, що ці дані в сукупності є достатньо повними та визначають у сукупності коректну постановку задачі налаштування нейронної мережі. У цьому випадку налаштування нейронної мережі здійснюється при значенні коефіцієнта регуляризації $\alpha_R = 0$, наприклад, за вище розглянутим критерієм.

$$\min_{\{w_{kj}\}} E_{bux}^2, \quad E_{bux}^2 = 0,5 \sum_k (y_{0k} - y_k)^2 \quad (2.47)$$

де y_{0k} - необхідний (бажаний) вихідний сигнал мережі, y_k - спостережуваний вихідний сигнал. У результаті налаштування визначаються номінальні значення ваг w_{kj}^{cp} нейронної мережі.

На другому етапі налаштування нейронної мережі здійснюється вже в оперативному режимі на поточних даних за критерієм (2.45). З цією метою використовується градієнтний метод мінімізації критерію (2.45) за рекурентними формулами:

$$w_{kj,s} = w_{kj,s-1} - \gamma \frac{\partial Q_T(w_{kj,s-1})}{\partial w_{kj}}, \quad s = 1, 2, \dots \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial Q_T(w_{kj,s-1})}{\partial w_{kj}} = (1 - \alpha_R) \frac{\partial E_{bux}^2(w_{kj,s-1})}{\partial w_{kj}} + \alpha_R (w_{kj,s-1} - w_{kj}^{cp}) \quad (2.49)$$

Критичним моментом тут є обчислення величини $E_{вих}^2$ - середньоквадратичної помилки нейронної мережі.

Оскільки обсяг оперативних даних є обмеженим, то середньоквадратична помилка визначається на основі виразу:

$$E_{bux}^2 = 0,5 M_t \left\{ \sum_k (y_{0k} - y_k)^2 \right\} \quad (2.50)$$

де M_t - оператор усереднення оперативних даних у часі. Оператор усереднення (2.48) може бути реалізований різними способами.

Так, оператор усереднення може бути реалізований за формулою:

$$M_t\{\Delta y(t_r)\} = \frac{1}{n_f} \sum_t \Delta y(t_{r-t}) \quad (2.51)$$

або рекурентним виразом:

$$M_t\{\Delta y(t_r)\} = \frac{n_f}{n_f + 1} M_t\{\Delta y(t_{r-1})\} + \frac{1}{n_f + 1} \Delta y(t_r), \quad r = 1, 2, \dots \quad (2.52)$$

У будь-якому випадку частинна похідна від (2.48) з урахуванням (2.37) – (2.42) матиме вигляд:

$$\frac{\partial E_{bux}^2}{\partial w_{kj}} = M_t \left\{ - \sum_k (y_{0k} - y_k) \frac{\partial y_k}{\partial w_{kj}} \right\} = M_t \left\{ - \sum_k (y_{0k} - y_k) f'(a_k) x_j \right\} \quad (2.53)$$

Як і раніше, вводимо позначення:

$$\delta_k = -f'_k(a_k)(y_{0k} - y_k) \quad (2.54)$$

У підсумку для (2.37) будемо мати:

$$\frac{\partial E_{bux}^2}{\partial w_{kj}} = M_t\{\delta_k x_j\} \quad (2.55)$$

За аналогією з (2.45) – (2.48) тут можуть бути введені співвідношення для проміжних шарів мережі:

$$w_{ji,s} = w_{ji,s-1} - \gamma \frac{\partial Q_T(w_{ji,s-1})}{\partial w_{ji}}, \quad s = 1, 2, \dots \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial Q_T(w_{ji,s-1})}{\partial w_{ji}} = (1 - \alpha_R) \frac{\partial E_{bux}^2(w_{ji,s-1})}{\partial w_{ji}} + \alpha_R (w_{ji,s-1} - w_{ji}^{cp}) \quad (2.57)$$

Рекурентні співвідношення (2.56-2.57), якщо вони збігаються, дають коректне вирішення розглянутої задачі в оперативному режимі.

2.6 Процедура прийняття оперативних рішень на основі методу обмежень для задачі раціонального завантаження млина

Процедура прийняття оперативних рішень з технічної точки зору математично формулюється як задача узгодження технічних умов, які математично представляються у вигляді системи нерівностей:

$$y_i^{min} \leq y_i \leq y_i^{max} \quad (2.58)$$

$$y_i = f_i(x), \quad i \in I_{\text{геп}} \quad (2.59)$$

Якщо система нерівностей (2.56) – (2.59) є сумісною, то поставлена задача узгодження технічних умов є розв'язуваною. У протилежному випадку технічні умови є несумісними, і задача їхнього узгодження у звичайному сенсі не має розв'язку. Постановка задачі узгодження технічних умов (2.56) – (2.57) у цьому випадку вважається суперечливою.

Виділимо із системи обмежень (2.56) ті технічні умови, які суттєво перешкоджають розв'язанню поставленої задачі. З цією метою призначимо технічним умовам (2.56) певні ваги, які відображають ступінь важливості задоволення відповідної умови [24, 25]:

$$\begin{aligned} y_i^{min} \leq y_i \leq y_i^{max} : \alpha_i \\ \alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i \in I_{\text{геп}}} \alpha_i = 1, i \in I_{\text{геп}} \end{aligned} \quad (2.60)$$

де α_i - ваги технічних умов, $I_{\text{геп}}$ - індексна множина умов (2.58).

Введемо показник, який характеризує ступінь сумісності технічних умов (2.58):

$$C = \sum_{i \in I_{\text{геп}}} \alpha_i \mu_i \quad (2.61)$$

де μ_i - характеристична функція i -ї технічної умови $\mu_i=1$, якщо технічна умова $y_i^- \leq y_i \leq y_i^+$ виконується, і $\mu_i = 0$ у протилежному випадку).

З огляду на співвідношення (2.57) показник (2.59) визначений на векторі значень режимних параметрів x :

$$C(x) = \sum_{i \in I_{\text{геп}}} \alpha_i \mu_i(x) \quad (2.62)$$

На основі введеного показника (2.60) узгодження системи зважених технічних умов (2.58) – (2.59) можна представити як розв'язання екстремальної задачі [27]:

$$\max_{(x)} C(x) \quad (2.63)$$

Якщо система зважених технічних умов (2.56) – (2.57) сумісна, то:

$$\max_{(x)} C(x) = C(x_{dop}) = 1 \quad (2.64)$$

при цьому ваги технічних умов на розв'язок не впливають.

Інакше відбувається справа з несумісною системою технічних умов. У цьому випадку розв'язок екстремальної задачі (2.61) виділяє максимально-сумісну підсистему технічних умов:

$$y_i^{min} \leq y_i \leq y_i^{max} : \alpha_i, \quad i \in I_{her}^{max_{her}} \quad (2.65)$$

для яких $\mu_i(x_{доп}) = 1$. Тут $I_{her}^{max_{her}}$ - індексна множина виділеної максимально-сумісної підсистеми технічних умов [29].

Сенс максимально-сумісної підсистеми (2.62) полягає в тому, що вона визначає допустимий розв'язок задачі, що задовольняє найбільш важливим умовам. При цьому умови, які суперечать отриманому розв'язку, з критерієм (2.61) виключаються за ознакою $\mu_i = 0$.

Узгодження суперечливих технічних умов розв'язуваної задачі може бути отримано з використанням різних підходів [30].

Найпростіше узгодження розглянутих умов здійснюється на основі методу поступок (поступових поступок). При цьому, наприклад, як допустимі приймаються значення режимних параметрів об'єкта керування, які отримуються в результаті розв'язання задачі (2.61):

$$y_{i,dop} = f_i(x_{dop}), \quad i \in I_{her}/I_{her}^{max} \quad (2.66)$$

У загальному випадку процедура узгодження технічних умов розв'язуваної задачі може здійснюватися в інтерактивному режимі, коли на кожному кроці узгодження здійснюються певні поступки за обмеженнями (2.58), а також змінюються ваги обмежень. При цьому, відповідно, розв'язується задача (2.61), яка формально дає відповідь на питання: чи є узгоджувана постановка задачі суперечливою, чи ні? У підсумку зазначена процедура призводить до узгодженої постановки задачі вибору рішення. У загальному випадку розв'язання суперечностей здійснюється на основі інтерактивної процедури прийняття рішень [31].

Стосовно розв'язання задачі оперативного керування млином, особливість задачі вибору параметрів завантаження млина полягає в тому, що кількість керуючих факторів є невеликою, а кількість обмежень значно перевищує число керуючих факторів.

Дійсно, в якості керуючих факторів ми будемо розглядати величину подачі гіпсу u_1 та число обертів сепаратора u_2 . Вихідними параметрами є множина показників: питома витрата електроенергії, крупка, звук млина, швидкість обертання млина, Блейн.

Обмеження на показники:

$$a_i \leq y_i(u_1, u_2) \leq b_i \quad (2.67)$$

На основі побудови емпіричних залежностей з використанням методу найменших квадратів та нейронних мереж можна отримати:

$$y_i = h_i(u_1, u_2) \quad (2.68)$$

З урахуванням (2.67) і (2.68) можна отримати:

$$a_i \leq h_i(u_1, u_2) \leq b_i, \quad i \in 1, \dots, 5 \quad (2.69)$$

У підсумку раціональний вибір параметрів завантаження млина полягає у формальному розв'язанні системи нерівностей (2.67).

Для розв'язання система нерівностей приводиться до канонічної форми:

$$h_i(u_1, u_2) - b_i \leq 0 \quad (2.70)$$

$$a_i - h_i(u_1, u_2) \leq 0 \quad (2.71)$$

Формально нерівність (2.68) можна записати в наступному вигляді:

$$f_i(u_1, u_2) \leq 0 \quad (2.72)$$

У загальному випадку система нерівностей (2.69) є несумісною. Тому розв'язання задачі вибору раціональних параметрів завантаження млина математично зводиться до розв'язання системи несумісних нерівностей:

$$f_i(u_i) \leq 0, \quad i \in I_{\text{нер}} \quad (2.73)$$

де $I_{\text{нер}}$ - множина значень індексів нерівностей відповідно; u_1 - вектор шуканих параметрів; $f_i(u_1)$ - монотонні, неперервні та диференційовані функції. Необхідно визначити максимально сумісну підсистему нерівностей (2.70) за критерієм:

$$\max_{(u_1, u_2)} C(u_1, u_2), \quad C(u_1, u_2) = \Phi(\mu(u_1, u_2)) \quad (2.74)$$

де μ - вектор, складений із характеристичних функцій μ_i нерівностей ($\mu_i = 1$, якщо i -а нерівність виконується, в протилежному випадку $\mu_i = 0$); $\Phi(\mu)$ - монотонна, позитивно визначена числова функція булевих змінних μ .

У частковому випадку критерій (2.71) має вигляд:

$$C(u_1, u_2) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \mu_i(u_1, u_2) \quad (2.75)$$

де α_i - вагові коефіцієнти, що задовольняють умовам:

$$\forall_i \alpha_i \geq 0 \quad \sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1 \quad (2.76)$$

Розв'язання системи нерівностей (2.71) за критерієм (2.73) дозволяє виділити серед усіх максимально сумісних підсистем системи (2.71) таку підсистему, яка має максимальну сумарну вагу. Іншими словами, у даному випадку виділяється максимально сумісна підсистема, найбільш важлива з точки зору розв'язуваної предметної задачі. При рівних вагах розв'язання задачі (2.73), (2.71) виділяє максимально сумісну підсистему з максимальною кількістю нерівностей. У загальному випадку, коли розглядається задача (2.71-2.72), відповідний розв'язок дозволяє виділити максимально сумісну структуру нерівностей, оптимальну за узагальненим критерієм (2.71) [32].

Змістовна інтерпретація розглянутого вище алгоритму пошуку оптимальних рішень у суперечливих умовах полягає в наступному:

На початковому етапі особа, яка приймає рішення (ОПР), формулює набір технічних умов, яким має задовольняти шуканий розв'язок. Розуміючи, що не всі бажані умови можуть бути виконані, ОПР формулює пріоритети, що визначають бажаність виконання окремих умов, а також загальну цільову функцію, яка кількісно виражає ступінь виконання поставлених умов у цілому.

З математичної точки зору цільова функція являє собою відображення:

$$\mu \xrightarrow{\Phi_1} C, \mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T \quad (2.77)$$

де

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y \in D_j; \\ 0, & \text{якщо } y_j \notin D_j; \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.78)$$

Тут кожна i -а умова описується вектором своїх параметрів y_i . Сама технічна умова представляється у вигляді області допустимих значень параметрів D_i . Характеристична функція умови μ_i визначає факт належності вектора параметрів y_i відповідній області допустимих значень D_i .

Далі, ґрунтуючись на методі гілок та меж, здійснюється глобальний пошук оптимального рішення поставленої задачі. Однак отримане рішення в загальному випадку може не виправдовувати очікування ОПР. Частина поставлених умов при цьому не буде виконана і реальне значення цільової функції буде менше очікуваного. Тому отриманий розв'язок u_i^{opt} буде частковим.

Подальший розвиток процесу розв'язання задачі може здійснюватися на основі двох підходів:

Перший підхід ґрунтується на переведенні недосягнутих обмежень у розряд часткових цільових функцій. У результаті може бути поставлена задача оптимізації, в якій обмеженнями виступають виконані обмеження, а в якості цільової функції використовується узагальнена цільова функція, складена з часткових цільових функцій недосягнутих обмежень. У результаті розв'язання подібної задачі оптимізації будуть визначені величини обмежень, необхідні для не протирічимо постановки задачі вибору рішень.

Необхідно відзначити, що в загальному випадку кожне обмеження відображає певний аспект розгляду реального об'єкта оптимізації, за яким стоять спеціальні теорії та технічні рішення. Тому постановка задачі зняття часткових обмежень призводить до відповідних задач спеціальних науково-практичних досліджень.

Другий підхід ґрунтується на наступному.

Після отримання часткового розв'язку ОПР (Особа, яка приймає рішення) прагне досягти невиконаних обмежень у тому вигляді, в якому вони були

поставлені, і зосередити на цій меті свою увагу. У результаті зміниться структура пріоритетів ОПР, відповідно зміниться і цільова функція задачі:

$$\mu \xrightarrow{\Phi_2} C \quad (2.79)$$

Розв'язання поставленої задачі зі зміненою структурою цільової функції дозволить отримати наступний оптимальний розв'язок u_2^{opt} , для якого вже будуть виконуватися умови, що раніше не виконувалися. Однак і цей розв'язок у загальному випадку також буде частковим, оскільки не всі умови поставленої задачі будуть виконуватися [12, 23].

Процес зміни структури цільової функції та повторні розв'язання задачі можуть ітеративно повторюватися доти, доки на сукупності отриманих часткових розв'язків $\{u_1^{\text{opt}}, u_2^{\text{opt}}\}$ не будуть виконані всі поставлені умови.

Подальший рух вперед ґрунтується на неформальному змістовному вивченні цієї сукупності часткових розв'язків з метою дослідження можливості їхнього логічного об'єднання у цілісну систему. У загальному випадку отримані часткові розв'язки суперечать один одному, характеризуються несумісними властивостями. Тому об'єднати їх можна лише на абстрактному рівні шляхом відсторонення від несумісних властивостей та висунення на цій основі спільної об'єднувальної ідеї. Подальша розробка висунутої ідеї повинна спиратися на всю сукупність знань в розглядуваній предметній області та являти собою складну інтелектуальну операцію синтезу конкретного рішення. В результаті подібної інтерактивної процедури можна дійти синтетичного рішення, що логічно об'єднує властивості, які на початку були несумісними [25].

Висновки до розділу:

Запропоновано процедуру ідентифікації процесу помелу шихти в цементному виробництві, що складається з трьох етапів: на першому етапі відбувається нормалізація генеральної сукупності даних, на другому етапі - налаштування нейронної мережі на нормалізовану генеральну сукупність даних, на третьому етапі - корекція отриманого рішення задачі на основі методу

регуляризації. Подібний підхід дозволяє вирішувати некоректно поставлені задачі в оперативному керуванні з використанням нейронних мереж.

Для налаштування нейронної мережі при некоректних вихідних даних запропоновано алгоритм зворотного поширення помилки з використанням регуляризації некоректно поставлених задач, що дозволяє коректно вирішувати задачу ідентифікації залежностей параметрів і показників помелу в оперативному режимі.

Запропоновано рішення задачі раціонального вибору параметрів завантаження млина із застосуванням процедури прийняття оперативних рішень методом зважених цільових обмежень.

РОЗДІЛ 3

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЗАМКНЕНИМ КОНТУРОМ ПОДРІБНЕННЯ

3.1 Розробка структури АСУТП

Процес подрібнення є одним із центральних процесів, які визначають техніко-економічні показники роботи цементного заводу. Достатньо сказати, що близько 15-20% загального обсягу інформації при вирішенні завдань автоматизованого управління цементним виробництвом припадає на процес подрібнення. В процесі автоматизованого подрібнення потрібно вирішувати ряд нижче перелічених завдань.

1. Автоматизований контроль технологічних параметрів циклу подрібнення:

- швидкість сепаратора;
- звук млина в процесі подрібнення;
- гранулометричний склад продукту подрібнення (якості за Блейном);
- швидкість обертання двигуна млина;
- завантаження млина дробильним середовищем;
- питома витрата електроенергії.

2. Автоматизоване управління циклом подрібнення:

- стабілізація технологічних параметрів циклу;
- оптимізація роботи циклу: (максимальний вихід готового продукту, що задовольняє показникам якості та мінімум споживання електричної енергії).

Перш за все необхідно зазначити, що багато підприємств цементної промисловості на даний час охоплені автоматизацією в основному першого рівня і обмежуються вирішенням завдань за допомогою введення контурів стабілізації:

- витрати сировини у млинах;

– пропорцій параметрів подрібнення за рахунок подачі гіпсу та регулювання швидкостей обертання сепаратора.

У понад 90% випадків на цьому і обмежується автоматизація процесу подрібнення. Вирішення завдань підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу в цілому можна досягти за рахунок заходів щодо автоматизації процесу помелу на другому рівні. Це досягається за рахунок регулювання подачі гіпсу та швидкості обертання сепаратора на основі вирішення багатокритеріальної задачі за допомогою спеціалізованої СППР (Системи підтримки прийняття рішень).

Заходи щодо підвищення ефективності управління процесом подрібнення шихти у млині поділяються на 3 рівні:

- рівень - технологічного процесу;
- контролерний рівень - контроль і управління технологічним процесом;
- рівень людино-машинного інтерфейсу, СППР.

На рисунку 3.1 схематично представлені рівні автоматизації технологічного процесу помелу.

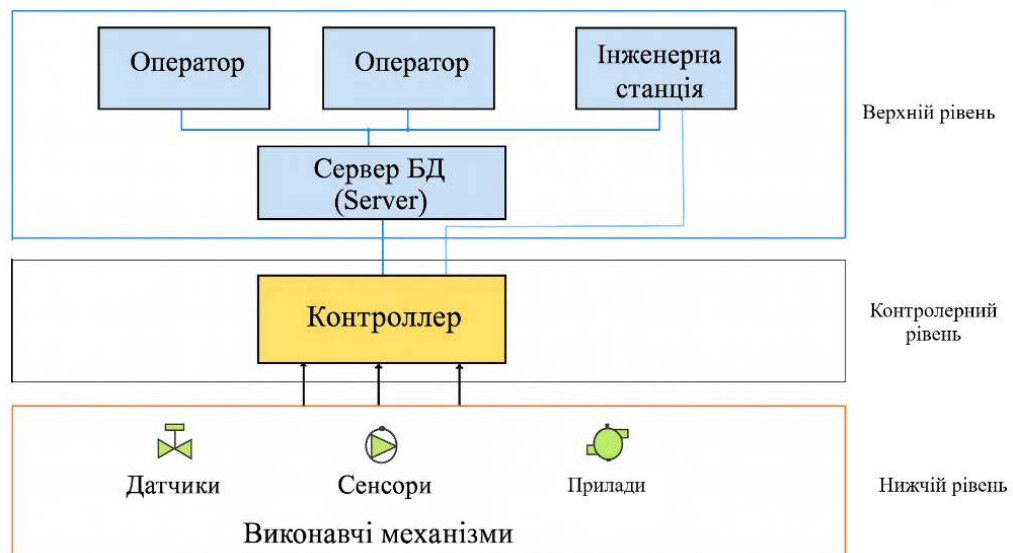


Рисунок 3.1 – Рівні АСУ ТП

3.1.1 Рівень технологічного процесу

На нульовому рівні автоматизації (рівень технологічного процесу) використовуються виконавчі механізми.

Обладнанням даного рівня є первинні перетворювачі, датчики, сенсори, прилади та механізми.

На рисунку 3.2. наведена загальноприйнята схема помелу цементу, що складається з кульового млина, елеватора, сепаратора, бункерів і дозаторів. Принцип роботи здійснюється наступним чином: потік сировини (звичайний клінкер або гіпс) надходить у кульовий млин. Для вимірювання вагового потоку використовуються тензодатчики.

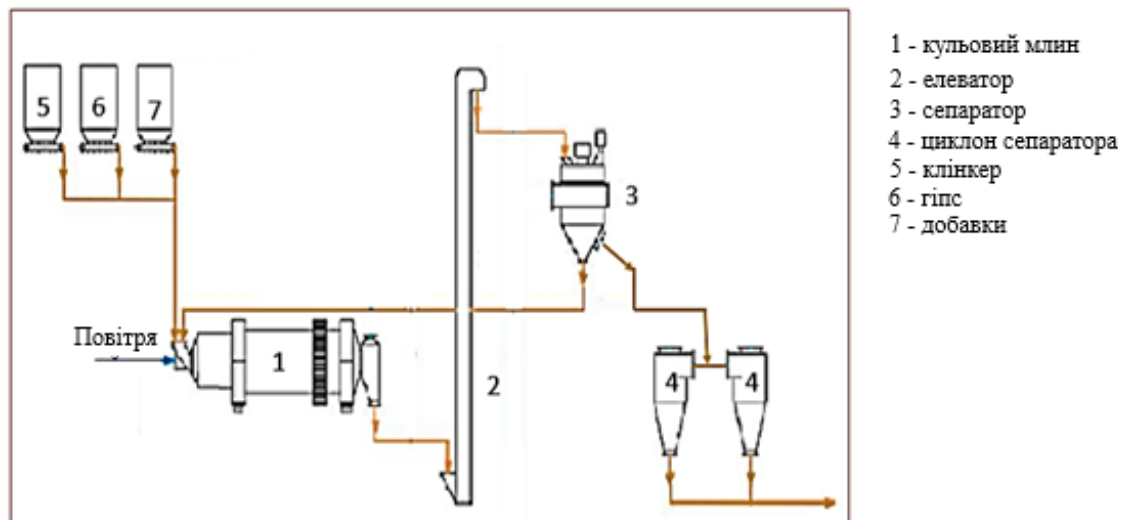


Рисунок 3.2 – Замкнений цикл подрібнення

Отримана інформація про вагу передається до сервера для подальшої обробки.

Сировина, що надійшла в кульовий млин, подрібнюється за допомогою куль в результаті руйнування частинок. В ході руйнування видаються звуки, які вловлюються так званими датчиками «електронні вуха».

Обертання млинів здійснюється за рахунок електродвигунів. Враховуючи, що електродвигун є однією з основних частин кульового млина, необхідність

контролю витрати електроенергії та швидкості обертання стоїть на пріоритетному місці, для чого передбачено вимірювальний прилад.

Подрібнений матеріал за допомогою елеватора транспортується до сепаратора. Своєю чергою, в сепараторі подрібнений матеріал розділяється на дві фракції. Більш крупні фракції повертаються в кульовий млин для повторного помелу, а тонкі фракції виходять в якості готової продукції.

Щогодини з готового продукту беруть пробу в лабораторії для визначення якості цементу, і результати вносяться в електронну таблицю.

Таблиця 3.1 - Дані аналізу лабораторії щодо % гіпсу в цементі

Зона	Значення		8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	ср
3+	3,3	3,45												
2+	3,0	3,29												
1-	2,5	2,99	2,73		2,64		2,84		2,79		2,83		2,72	2,76
2-	2,2	2,49												
3-	1,95	2,19												
Ввід значення			2,73		2,64		2,84		2,79		2,83		2,72	2,76

Пояснення зон контролю:

- Червона зона ($3\pm$) - якщо результат аналізу потрапляє в даний рядок, то оператору необхідно зупиняти виробництво і внаслідок нестачі або надлишку гіпсу у складі готового продукту уточнювати причину.
- Сіра зона ($2\pm$) - при попаданні результату аналізу в даний рядок оператор зменшує або збільшує подачу гіпсу в млині.
- Зелена зона (1-) - означає, що подача гіпсу стабільна в межах допуску.

3.1.2 Контролерний рівень

Контролер використовується для регулювання подачі матеріалів. Як уже згадувалося, матеріал, що подається до кульового млина, складається з: клінкеру (75%). гіпс (5%) та інші добавки (20%) (наприклад, для виробництва портландцементу). Коли змінюється один із параметрів, контролер повинен автоматично коригувати відсоткове співвідношення з іншими параметрами.

3.1.3 Рівень людино-машинного інтерфейсу

На рівні людино-машинного інтерфейсу візуалізуються необхідні дані про значення параметрів процесу подрібнення. Внаслідок цих робіт додатково необхідно використовувати спеціалізовану систему підтримки для прийняття рішень щодо операційного управління режимами роботи млина (DSS процесу помелу). На цьому рівні інформація про процес подрібнення подається у вигляді відповідної екранної форми, оператори спостерігають за процесом подрібнення, і якщо потрібні зміни, вони вводять зміну в систему.

3.2 Моніторинг процесу подрібнення

Автоматичне керування та моніторинг є частиною автоматизованої системи управління процесами. Процеси подрібнення контролюються в режимі реального часу, датчики використовуються як пристрій для моніторингу. Він включає регулювання потоку в гіпсі, швидкість сепаратора, повторного подрібнення, питому споживання енергії, звук млина, обертання двигуна млина та якість продукції (Блейн).

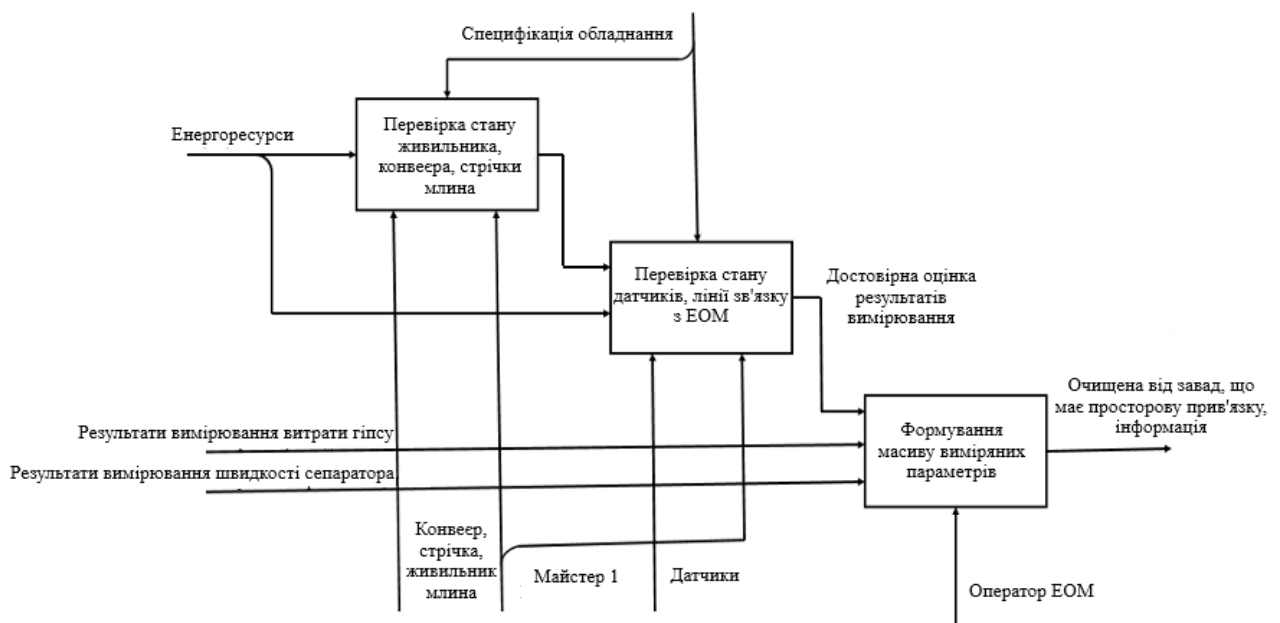


Рисунок 3.3 – Моніторинг процес подрібнення

Моніторинг подається не лише як збірка інформації про стан об'єкта, а й як контроль робочих параметрів технологічного процесу.

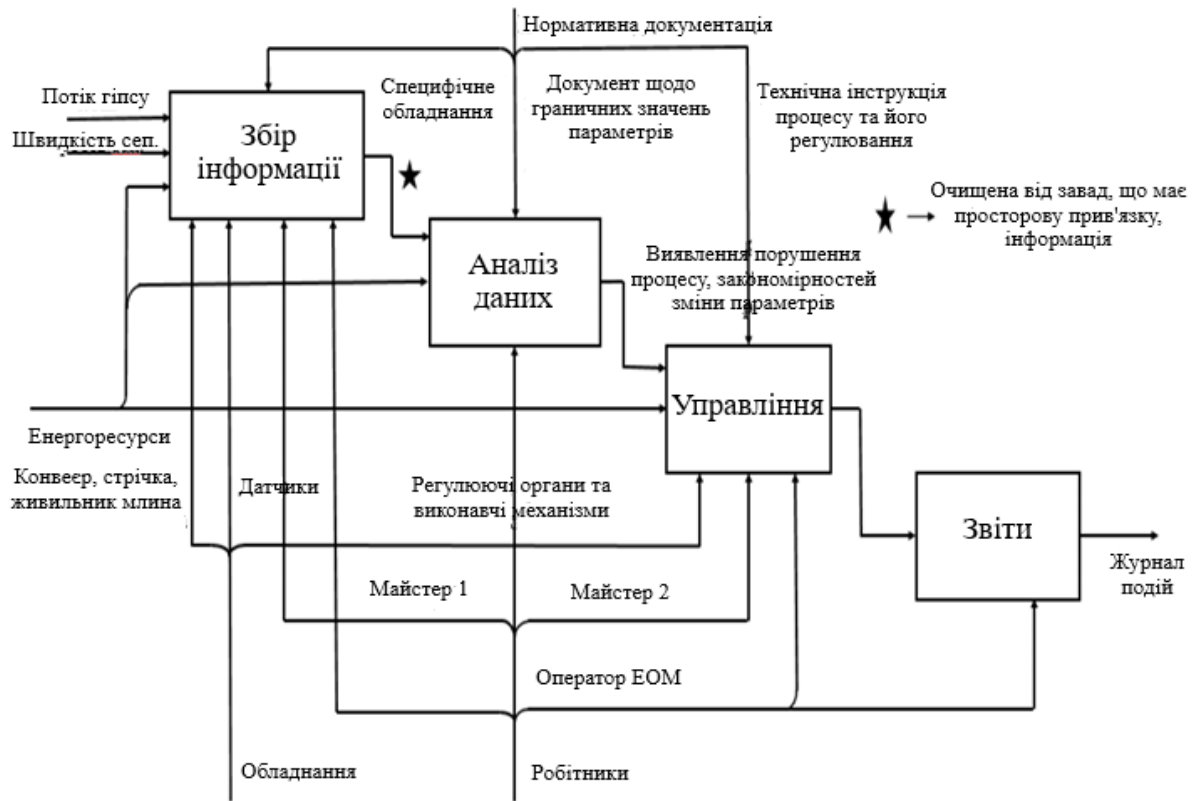


Рисунок 3.4 – Збір інформації

3.3 Автоматизоване робоче місце оператора

Функціональні можливості АРМ оператора. Робочі місця оператора використовуються для контролю всіх операцій системи, а також для виконання керуючих впливів і налаштування параметрів. Ці робочі станції операторів зазвичай називають «клієнтами», оскільки вони отримують свої поточні та історичні дані з «серверного» комп'ютера. Зазвичай є кілька робочих станцій оператора, кожна з яких містить усі графічні зображення процесу та відображення історичних тенденцій для системи. Користувачі системи SCADA можуть увійти в систему через ці робочі станції.

Деякі з операцій, що виконуються за допомогою робочих станцій Оператора, перераховані нижче; більш детальна інформація про відображення, необхідні для цих дій, буде надана пізніше в цьому розділі:

- вхід у систему та вихід із неї з використанням паролів та імен користувачів;
- відображення процесу виклику для перегляду операцій у системі;
- включення режимів управління різним обладнанням у системі; наприклад, ручний та автоматичний режими, введення обладнання в експлуатацію або відключення;
- зміна параметрів уставки з відповідним допуском безпеки;
- виконання дій ручного управління для обладнання, таких як запуск / зупинка та відкриття / закриття;
- перегляд історичних трендів та перенесення даних в інші файли для експорту;
- перегляд поточної зведення сигналів тривоги для визначення умов, що вимагають уваги;
- перегляд зведення тривог / подій для перегляду хронологічної послідовності подій.

Робочі місця оператора забезпечують користувацький інтерфейс для системи SCADA. Користувачі можуть здійснювати контроль над обладнанням, а також викликати дисплеї, які показують поточну та історичну інформацію про будь-який аспект системи SCADA.

Під час управління технологічним процесом на екрані АРМ оператора розташовується загальна екранна форма. Вона допомагає людині-оператору легше сприймати інформацію про основні показники процесу та спрощує процес управління. Тому екранна форма повинна містити лише ту інформацію, яка необхідна оператору, щоб не перевантажувати його зайвими даними.

Екранна форма СППР (Системи підтримки прийняття рішень), що розробляється в даній роботі, виконує роль порадирика оператора кульового млина. На основі спрогнозованих значень вихідних показників технологічного

процесу, алгоритм, прописаний в екранній формі, визначає параметри завантаження та значення швидкості сепаратора, які рекомендується задати оператору, щоб забезпечити оптимальний режим роботи кульового млина в замкнутому циклі.

3.4 Процедура прийняття рішень при оперативному управлінні

На початковому етапі особа, яка приймає рішення (ОПР), формулює набір умов, яким має задовольняти шукане рішення. Розуміючи, що не всі бажані умови можуть бути виконані, ОПР формулює переваги, що визначають бажаність виконання окремих умов, а також загальну цільову функцію, яка кількісно виражає ступінь виконання поставлених умов в цілому.

В екранну форму завантажуються прогнозні значення для кожного вихідного показника при різних визначених значеннях вхідних показників. Крім того, тут розташовуються оцінки експертів, за допомогою яких визначається коефіцієнт значущості для кожного вихідного показника. Також по кожному з виходів системи представлені інтервали значень; при потраплянні значення показника в цей проміжок режим роботи обладнання вважається оптимальним, але тільки відносно одного показника. Ці інтервали задаються технологами підприємства.

Для знаходження оптимального режиму за всіма показниками програма складає матрицю, що складається з нулів та одиниць («0», якщо значення показника не потрапило в інтервал, «1» якщо потрапило). Далі складена матриця порядково множиться на вектор коефіцієнтів значущості та підсумовується порядково. Рядок із максимальною сумою відповідає оптимальному режиму: програма виділяє кольором значення вхідних показників процесу з цього рядка, які рекомендується задати оператору. Визначення оптимального значення представлено на рисунку 3.5.

Max										C
67	α	38,6	α	85	α	80	α	17,5	α	
Min										
47	0,17	36	0,21	80	0,19	75	0,23	16,5	0,2	
Крупка	μ	Питомі витрати ЕЕ.	μ	Звук млина	μ	Оберти млина	μ	D'	μ	
59	1	38	1	82	1	80.3	0	16,8	1	0,56
68	0	38.1	1	83,3	1	79.1	1	16.9	1	0,62
69	0	38,3	1	81,9	1	79,3	1	16,7	1	0,62
68	0	38	1	82,7	1	79,3	1	16,5	1	0,62
56	1	41	0	85,4	0	75.8	1	16,9	1	0,6
62	1	43	0	90	0	75	1	16,7	1	0,6
40	0	41,2	0	87,7	0	76,7	1	18,5	0	0,23
40	0	39	0	86,9	0	81.7	0	18,2	0	0
56	1	39,1	0	84	1	80.4	0	17,6	0	0,36
49	1	42	0	83,4	1	80,1	0	17,2	1	0,56
71	0	42.1	0	82,1	1	79.1	1	17,5	1	0,62
59	1	38,3	1	82,9	1	79,2	1	17,3	1	1
55	1	38,5	1	83,3	1	81	0	16,8	1	0,77
72	0	38,1	1	86,1	0	74	0	17.1	1	0,2
55	1	39	0	85	1	75,9	1	17.6	0	0,59
53	1	39,4	0	85,7	0	76,1	1	17,4	1	0,6
55	1	40,1	0	78,3	0	80,4	0	17,2	1	0,37
54	1	40	0	81,3	1	78,5	1	17.6	0	0,59
47	1	42	0	80,7	1	78,8	1	17,7	0	0,59
42	0	42,7	0	84	1	80,4	0	17,4	1	0,39
50	1	43	0	79,3	0	78,8	1	16.9	1	0,6
48	1	41,9	0	78,1	0	79,1	1	17,3	1	0,6
49	1	38,7	0	78,3	0	79,2	1	17,4	1	0,6
47	1	38,5	1	78,1	0	79	1	17.4	1	0,6

Рисунок 3.5 – Визначення оптимального значення

Далі, якщо отримані значення відповідають очікуванням оператора, алгоритм прийняття рішення закінчується. В іншому випадку має бути змінений розрахунок сумарної ваги по кожному рядку

3.5 Збір та аналіз даних

Вихідним етапом побудови комп'ютерної моделі контуру подрібнення є аналіз матеріальних потоків. З цією метою джерелами даних слугували дані експлуатації та експериментів з млинами ПрАТ “Кривий Ріг Цемент”

На експериментальних даних було проведено аналіз класифікаторів на зміну таких параметрів:

- обсяги подачі гіпсу;
- швидкість обертання роторів класифікаторів;
- повернення крупки;
- співвідношення гіпс–клінкер;
- питома витрата електроенергії;
- звук млина;
- визначено тонкість помелу за Блейном (D').

3.6 Результати досліджень з використанням моделей у вигляді нейронної мережі

Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася з використанням пакету прикладних програм MATLAB Neural Fitting (nftool). Окремі завдання аналізу, зокрема, попередня обробка даних на основі методу найменших квадратів, вирішувалася з використанням MEXcel.

Для навчання та тестування моделей нейронних мереж в якості вхідних параметрів використовувалася:

1. швидкість подачі гіпсу (u_1);
2. швидкість сепаратора (u_2).

Після налаштування нейронна мережа використовувалася для прогнозу значень вихідних параметрів при зміні вхідних даних.

3.6.1 Побудова та навчання нейронної мережі

Будувати та навчати нейронні мережі будемо в GUI інтерфейсі Matlab «Neural Fitting» (nftool). Даний прикладний пакет використовується для побудови нейронних мереж прямого поширення, що складаються з двох шарів. Для прихованого шару використовується сигмоїдальна функція активації, для вихідного шару – лінійна. Структурна схема мережі представлена на рисунку 3.6.

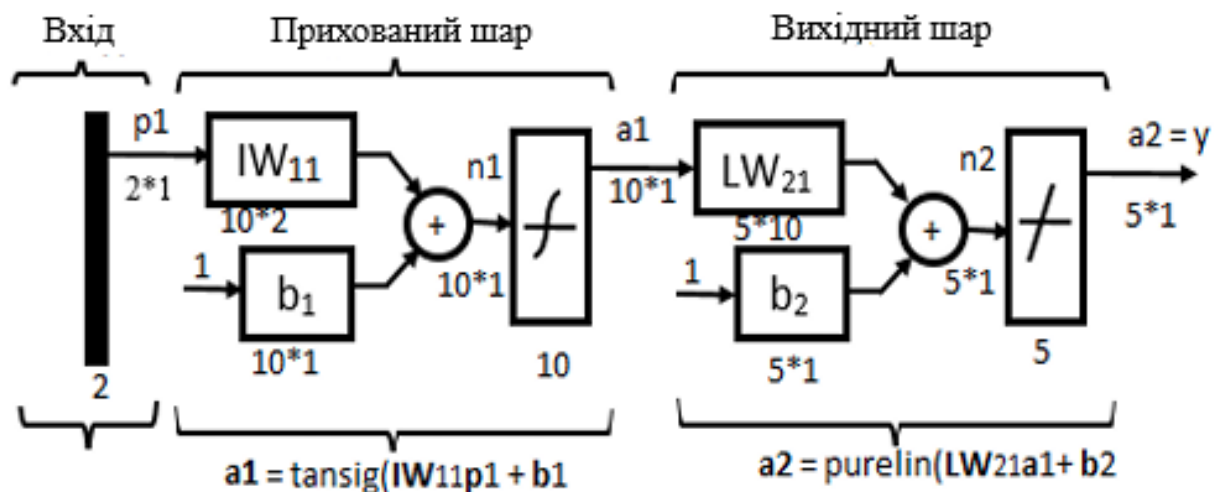


Рисунок 3.6 – Структурна схема багатошарової нейронної мережі

Кожен із входів p_1, p_2 множиться на відповідну вагу $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,r}$ вагової матриці W . Позначення вагових матриць IW_{11} (Input Weight, вага входу) та LW_{21} (Layer Weight, вага шару) можна пояснити так:

- IW_{11} представляє зв'язок від першого входу до першого нейрону (у першому шарі).
- LW_{21} представляє зв'язок від першого шару до другого шару (наприклад, від першого нейрону першого шару до нейронів другого шару).

Чистий вхід n_1 для функції активації отримується шляхом додавання зміщення (bias) до зважених входів.

Для першого прихованого шару вхід позначається як p , а вихід шару a_1 . Цей вихід a_1 , у свою чергу, задається як вхід для другого шару (вихідного), що дає остаточний результат a_2 .

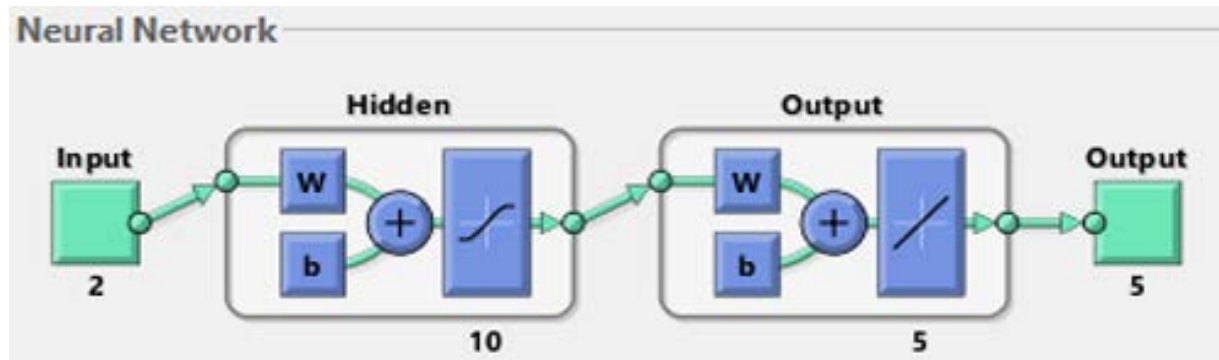


Рисунок 3.7 – Структура нейронної мережі

В якості навчальної вибірки використовуємо статистичні дані. Приклад таких даних представлений у таблиці 3.2. Вихідні дані розділені на три набори: навчальна вибірка, вибірка для валідації та тестова вибірка, у процентному співвідношенні 70%, 15%, 15% відповідно. Загальна кількість даних становить 568 спостережень з вересня по грудень 2020 року включно.

Таблиця 3.2 - Нормалізовані генеральні статистичні дані (фрагмент)

Подача т/год	Швидкість сепаратора об/хв	Гіпс %	Питома витрата електроенергії кВт*Г/Г	Повернення крупки т/год	Звук млина	Мотор %	Блейн (D')
120	150	4,1	39,75	62,5	78,13	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	4	39,78	62,3	78,15	83,14	17,44
120	148	3,8	39,78	62,3	78,15	83,21	17,44
120	145	4	39,83	61,9	78,18	83,28	17,44
120	142	4	39,89	61,5	78,20	83,32	17,44
120	140	4,1	39,92	61,2	78,22	83,37	17,44
120	138	4,1	39,96	61,0	78,24	83,44	17,44
120	135	4,1	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44
120	135	3,6	40,01	60,6	78,27	83,44	17,44

Для навчання нейронних мереж використовуватимемо алгоритм Левенберга–Марквардта.

Цей алгоритм застосовується для визначення локальних оптимумів шуканих параметрів нелінійної моделі. Валідація отриманого рішення в даному алгоритмі Левенберга–Марквардта ґрунтується на визначенні середньоквадратичних похибок отриманої моделі.

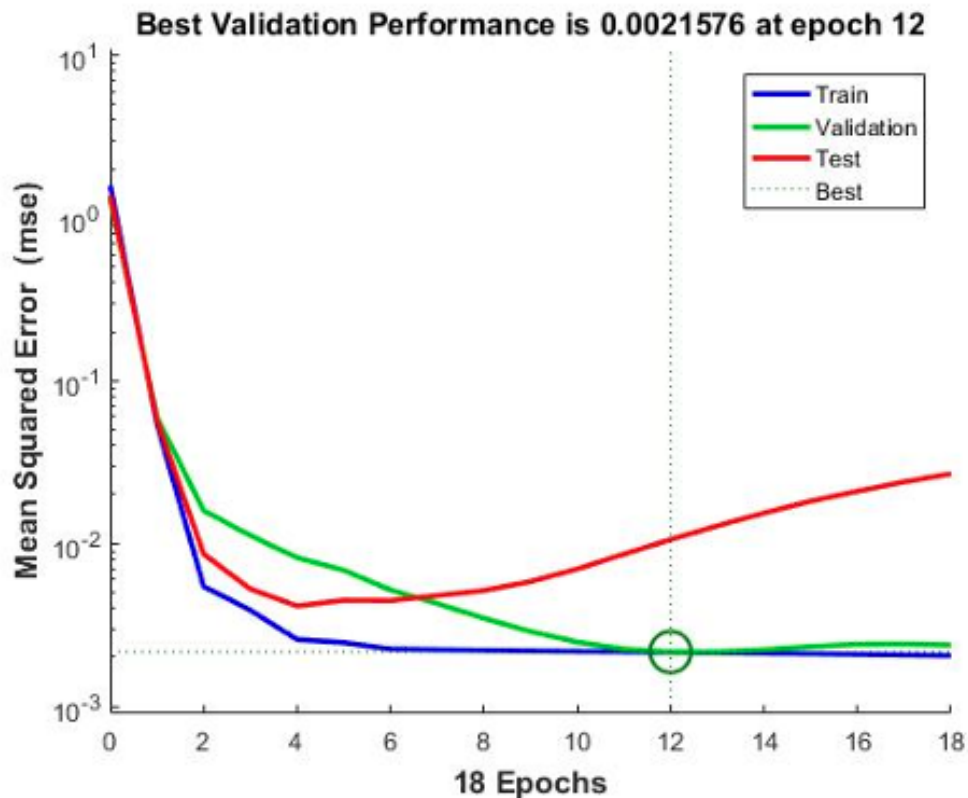


Рисунок 3.8 – Залежність середньоквадратичних відхилень на інтервалі навчання

Після навчання нейронних мереж необхідно визначити якість налаштування нейронної мережі. Одним із таких критеріїв є відхилення значення на виході нейронної мережі від значення з тестових даних, яке відповідає значенню на вході нейронної мережі. Цей показник можна оцінити з використанням гістограм розподілу похибок нейронної мережі. Гістограма розподілу похибок нейронної мережі представлена на рисунку 3.9.

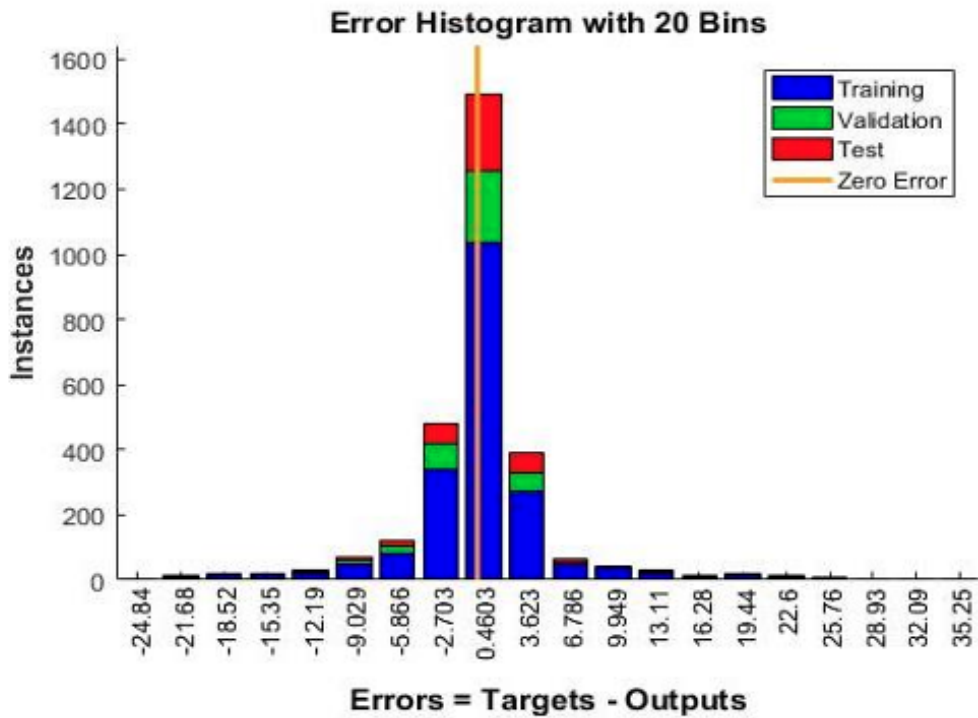


Рисунок 3.9 – Гістограм розподілу помилок нейронної мережі

Створимо нейронну мережу, що складається з чотирьох підмереж. Кожна підмережа буде узагальнювати статистику по кожному з виходів моделі. Кількість нейронів у всіх підмережах однакова і дорівнює двом (Рисунок 3.10).

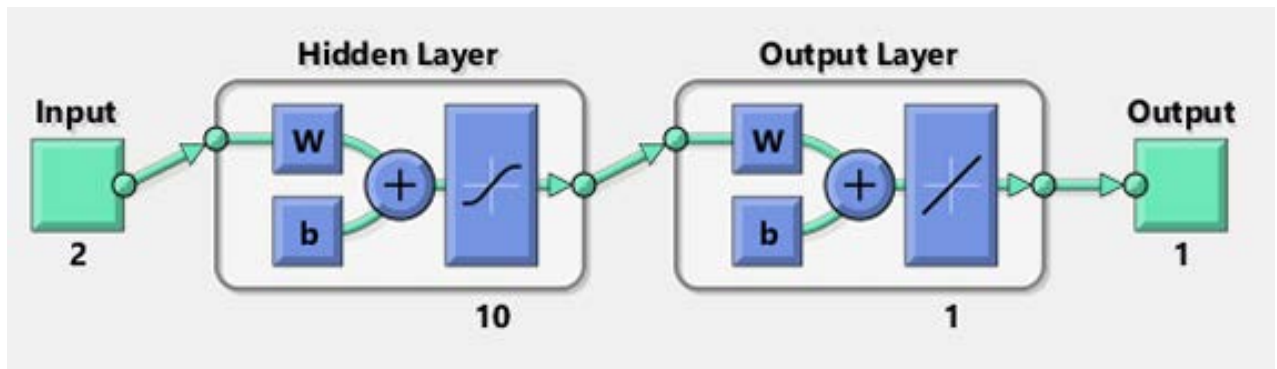


Рисунок 3.10 – Структура підмереж нейронної мережі

Гістограми розподілу похибок навчання нейронної мережі представлені на рисунках 3.11 – 3.14.

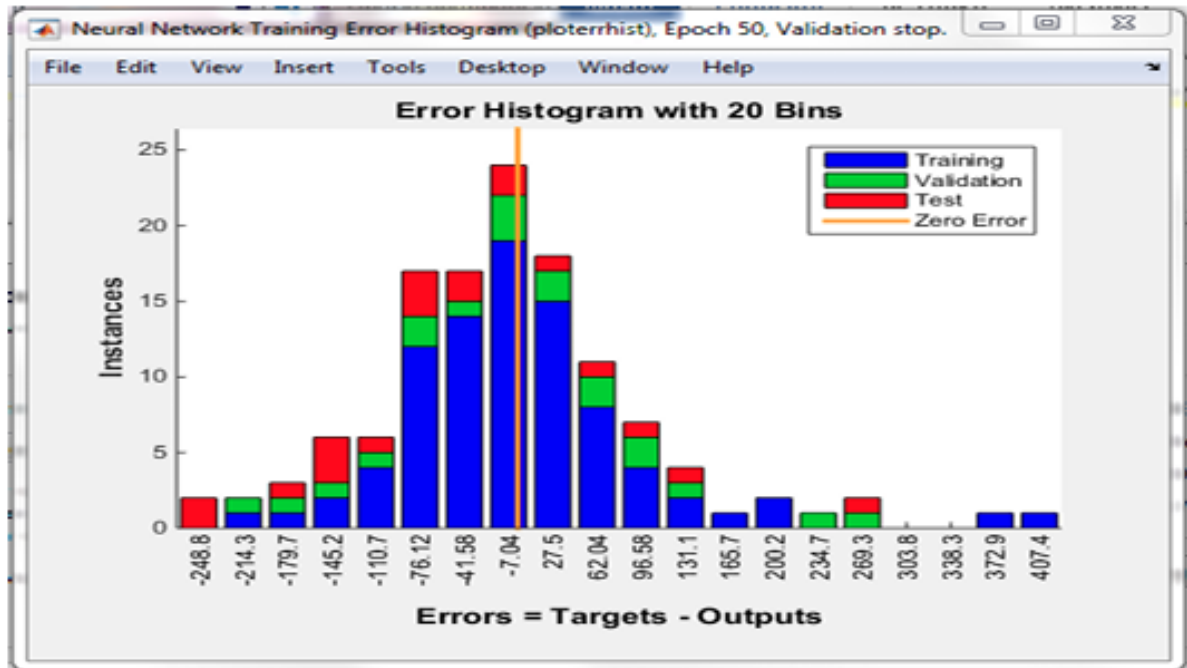


Рисунок 3.11 – Гістограма розподілу помилок нейронної підмережі
(Вихідний показник: Блейн)

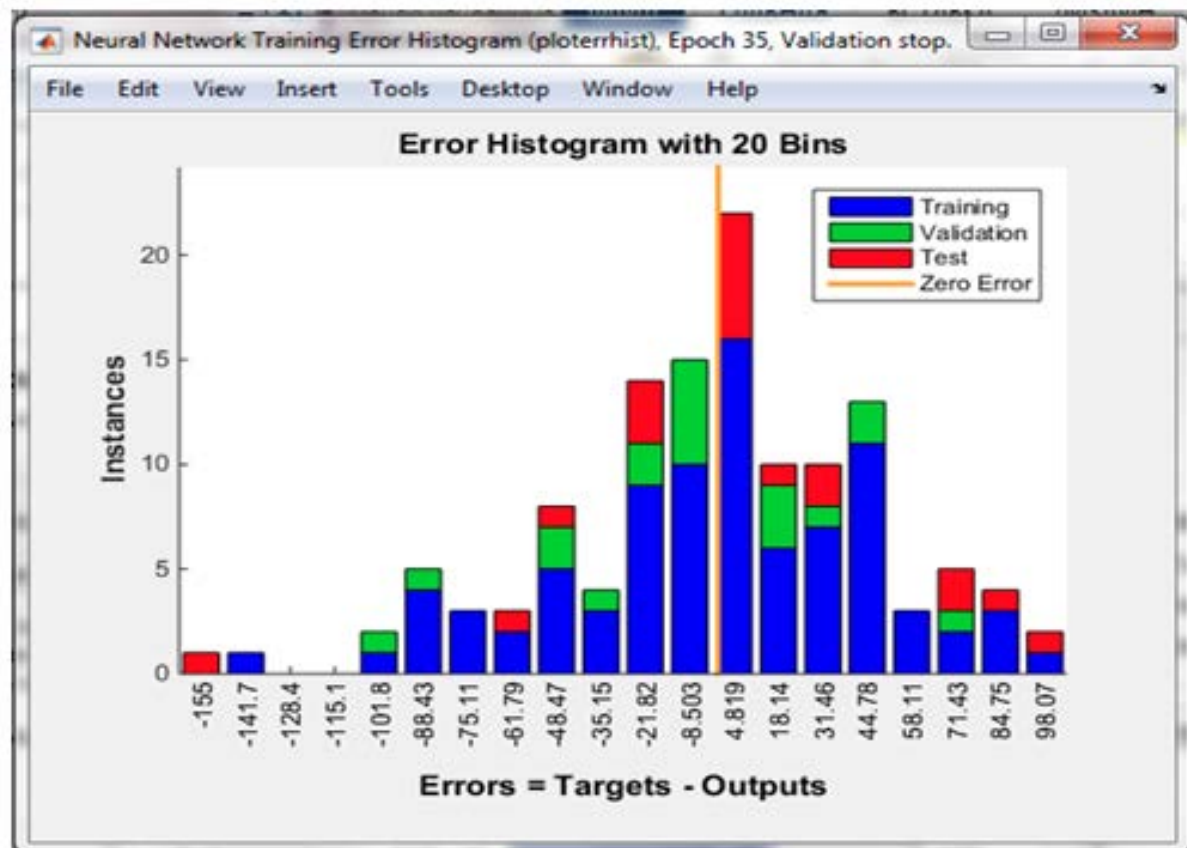


Рисунок 3.12 – Гістограма розподілу помилок нейронної підмережі
(Вихідний показник: Споживання електроенергії)

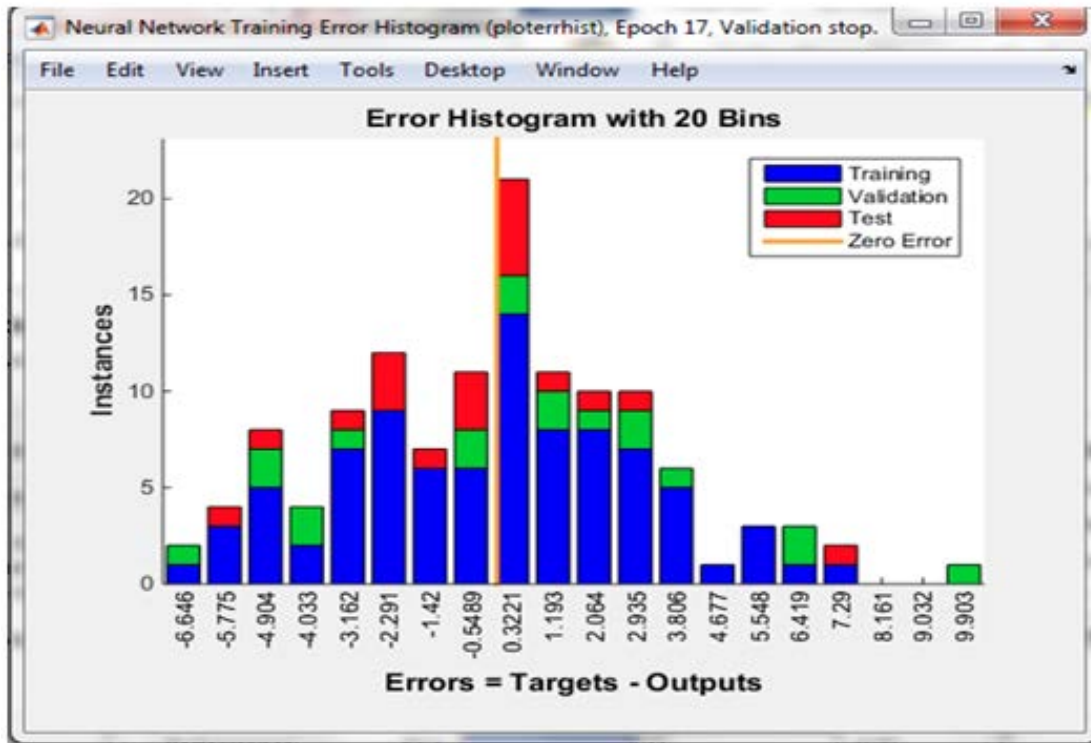


Рисунок 3.13 – Гістограма розподілу помилок нейронної мережі
(Вихідний показник: Звук млина)

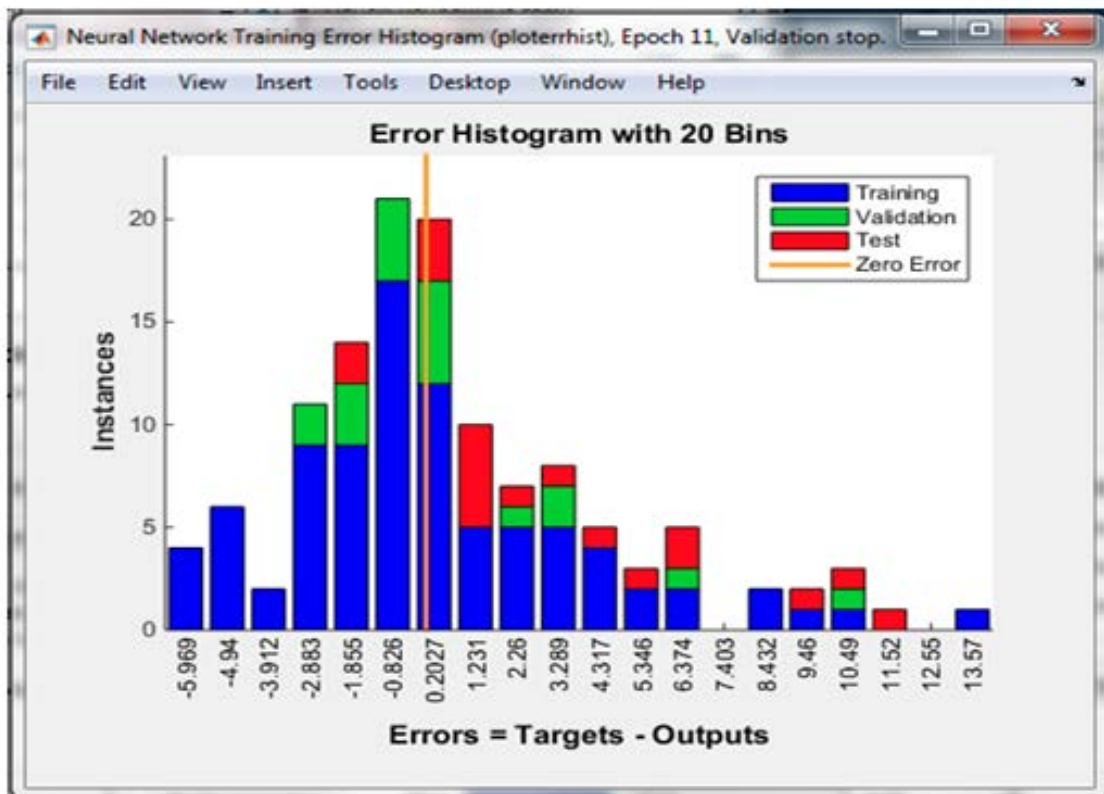


Рисунок 3.14 – Гістограма розподілу помилок нейронної мережі
(Вихідний показник: Крупка)

З рисунків видно, що основна частина даних має похибку менше або дорівнює 5%, отже, нейронні мережі побудовані та навчені правильно. Гістограма розподілу похибок дає уявлення про розподіл похибок і так званих «викидів» даних, тобто точок, які обробляються мережею найгірше.

Одним із таких критеріїв є відхилення значення на виході нейронної мережі від значення з тестових даних, яке відповідає значенню на вході нейронної мережі.

Третій етап побудови моделей полягав у проведенні коригувальних розрахунків з метою зменшення похибок моделювання з використанням методу регуляризації. Результати розрахунків моделювання представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Значення середньоквадратичних похибок моделювання

№	Показник, одиниця вимірювання	Генеральна вибірка (568 спостережень)	Локальна вибірка (50 спостережень)	Значення параметра регуляризації $\alpha_{\text{опт}}$
1	Питома витрата електроенергії, кВт*г/т	1.6	1.5	0.3
2	Крупка, т/год	10.08	9.3	0.4
3	Звук млина, дБ	2.77	2.4	0.4
4	Швидкість обертання млина, об/хв (%)	2.01	1.8	0.3
5	Блейн, см ² /г	0.5	0.4	0.3

Побудовані нейронні мережі використовуються як модельні уявлення передавальних властивостей млина за каналами управління вихідними параметрами процесу помелу. Вони входять як складова частина автоматизованої системи підтримки прийняття рішень (АСППР) при управлінні режимними параметрами млина. При цьому вибір необхідних значень керуючих параметрів здійснюється виходячи із заданих значень вихідних параметрів.

Вибір вхідних параметрів здійснюється на основі інтерактивної процедури прийняття рішень, яка з математичної точки зору ґрунтується на розв'язанні системи несумісних зважених нерівностей. Розв'язання нерівностей здійснюється методом фільтруючих обмежень.

3.7 Реалізація оперативного нейроуправління помелом клінкеру млином у виробництві цементу

Основні етапи виробництва цементу на даному підприємстві:

- розробка, видобуток, доставка та збагачення вихідних матеріалів;
- приготування клінкеру;
- помел клінкеру та отримання цементу.

Для забезпечення якості та однорідності помелу, подрібнення клінкеру в млині проводиться з гіпсом та основними добавками.

На рисунку 3.15 представлена екранна форма візуалізації параметрів інтерактивної процедури прийняття рішень. Тут представлені вхідні параметри процесу помелу (подача гіпсу та швидкість сепаратора), вихідні параметри (крупка, витрата електроенергії, Блейн, звук млина). Вихідні параметри розраховуються, виходячи із заданих значень вхідних параметрів, за допомогою отриманих нейронних мереж.

У таблиці вище задаються максимальні та мінімальні діапазони допустимих варіацій значень вихідних параметрів, а також їхні коефіцієнти значущості. Вся зазначена вище інформація дозволяє сформулювати конкретну постановку задачі вибору рішень за критерієм:

$$\max_{(u_1, u_2)} C(u_1, u_2), \quad C(u_1, u_2) = \sum_{i=5}^5 \alpha_i \mu_i(u_1, u_2), \quad \alpha_i = \sum_j \beta_{ij} / \sum_j \beta_{ij} \quad (3.1)$$

$$a_i \leq y_i(u_1, u_2) \leq b_i, \quad \mu_i, \quad i \in 1, \dots, 5 \quad (3.2)$$

$$y_i(u_1, u_2) = f_{HC,i}(u_1, u_2) \quad (3.3)$$

де: u_1, u_2 - вхідні параметри;

$y_i(u_1, u_2)$ - вихідні параметри;

$f_{NM, i}(u_1, u_2)$ - обчислювальна функція i -тої нейронної мережі;

a_i, b_i - обмеження значень вихідних параметрів;

μ_i - характеристична функція i -тої нерівності;

α_i - вага i -тої нерівності;

β_{ij} - оцінка важливості i -тої нерівності, дана j -тим експертом.

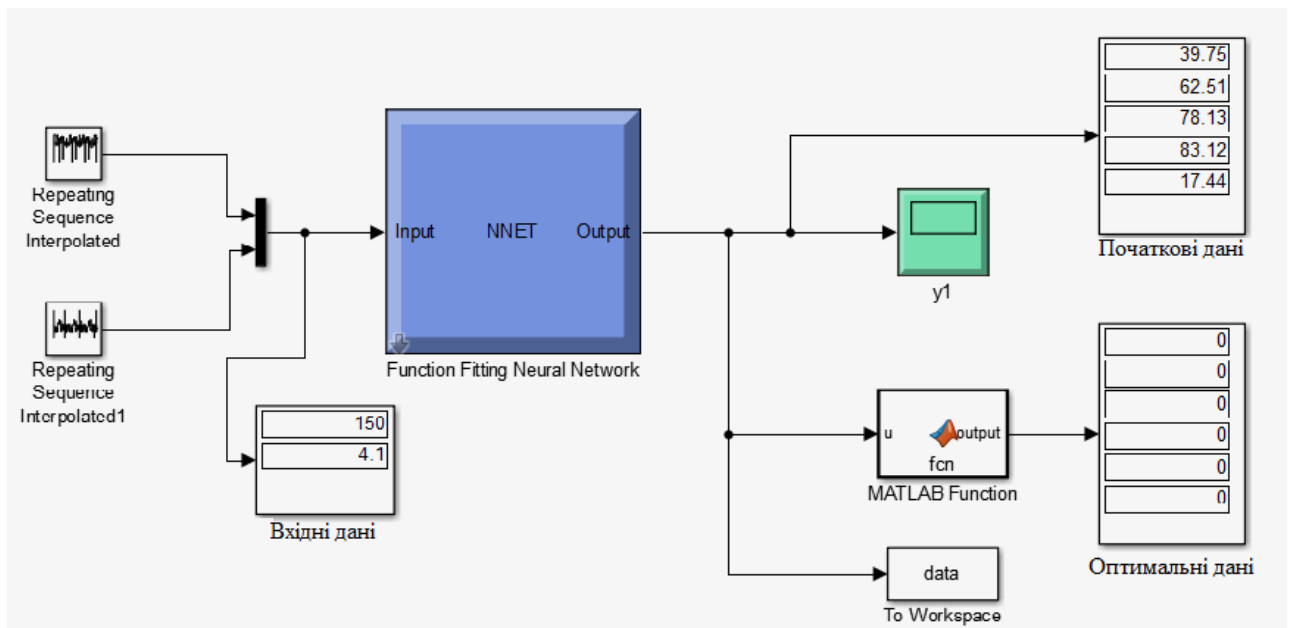


Рисунок 3.16 – Комп'ютерна модель оперативного нейроуправління процесом помелу шихти під час виробництва цементу

Вибір енергоефективного рішення досягається за рахунок посилення технічної вимоги щодо споживання електричної енергії при збереженні інших технічних вимог допустимими. Технічній вимозі щодо споживання електричної енергії надається максимальна вага.

Кінцевий технічний результат наведено в таблиці 3.4. За результатом розв'язання чисельної задачі можна знизити споживання електричної енергії в діапазонах від 1,4 кВт*год до 1,8 кВт*год на тонну.

		Max										
		67	α	38,6	α	85	α	80	α	17,5	α	
		Min										
		47	0,17	36	0,21	80	0,19	75	0,23	16,5	0,2	
Подача гіпсу	Оберти сепаратору	Питомі витрати	μ	Крупка	μ	Звук млина	μ	Оберти млина	μ	D'	μ	
4,1	ISO	38	1	59	1	82	1	80,3	0	16,8	1	0,56
4	148	38,1	1	68	0	83,3	1	79,1	1	16,9	1	0,79
3i	148	38,3	1	69	0	81,9	1	79,3	1	16,7	1	0,79
4	142	38	1	68	0	82,7	1	79,3	1	16,5	1	0,79
4,1	138	41	0	56	1	85,4	0	75,8	1	16,9	1	0,43
4,1	13S	43	0	62	1	90	0	75	1	16,7	1	0,43
3,7	132	41,2	0	40	0	87,7	0	76,7	0	18,5	0	0,23
3,7	132	39	1	40	0	86,9	0	81,7	0	18,2	0	0,17
3,8	130	39,1	1	56	1	84	1	80,4	0	17,6	0	0,36
4	135	42	0	49	1	83,4	1	80,1	1	17,2	1	0,39
3,6	135	42,1	0	71	0	82,1	1	79,1	1	17,5	1	0,62
4	130	40,1	1	60	1	34,5	1	78,32	1	17,43	1	1
3,6	135	41	0	55	1	83,4	1	79	1	17,8	1	0,83
3,6	135	38,1	1	72	0	86,	0	74	0	17,1	0	0,37
3,6	135	39	1	55	1	85	1	75,9	1	17,6	0	0,59
3,7	135	39,4	1	53	1	85,7	0	76,1	1	17,4	1	0,6
4	135	40,1	1	55	1	78,4	0	80,4	0	17,2	1	0,37
4	135	40	1	54	1	81,4	1	78,5	1	17,6	0	0,59
3,8	138	42	0	47	1	80,7	0	78,8	1	17,7	0	0,42
4	135	42,7	0	42	0	84	1	80,4	0	17,4	1	0,39
4	135	43	0	50	1	79,3	0	78,8	1	16,9	1	0,43
3,8	133	41,9	0	48	1	78.1	0	79,1	1	17,3	1	0,43
3,8	133	38,7	1	49	1	78.3	0	79,2	1	17,4	1	0,6
3,8	133	37	1	47	1	78.1	0	79	1	17,4	1	0,6

Рисунок 3.15 – Екранна форма візуалізації параметрів інтерактивної процедури прийняття рішень

Таблиця 3.4 - Основні показники та результати АРМ оператора

Показник, одиниця вимірювання	Результати, отримані «до» і «після» впровадження АРМ оператора	
	До	Після
Питома витрата електроенергії, кВт*год/т	38 – 43	36,5 – 41,2
Крупка, т/год	37 – 98	40 – 65
Звук млина, дБ	70 – 90	75 – 85
Швидкість обертання млина, об/хв (%)	74 – 82	75 – 80
Блейн, см ² /г	16,5 – 18	16,8 – 17,5

Висновки до розділу:

Проведено дослідження циклу подрібнення як об'єкта управління для автоматизації технологічного процесу помелу клінкеру в замкнутому циклі. На основі проведеного дослідження розроблено автоматизоване робоче місце оператора (АРМ) млина в цементному виробництві.

Для вирішення завдань ефективного управління процесом подрібнення клінкеру в кульових млинах замкнутого циклу запропоновано інтерактивну процедуру прийняття керуючих рішень. Вона ґрунтується на формуванні поточних вимог до значень режимних параметрів, які визначаються в автоматизованій СППР (Системі підтримки прийняття рішень) на основі ідентифікації характеристик процесу з використанням нейронної мережі в режимі реального часу.

Проведено аналіз експериментальних даних ПрАТ “Кривий Ріг Цемент”

Проведено роботи з апробації алгоритму оперативного управління млином цементного виробництва з використанням розробленої СППР на основі методу зважених цільових обмежень. За результатами експериментальних робіт було показано, що за допомогою розробленої СППР досягається зниження споживання електричної енергії до 5%.

ВИСНОВКИ

Було проведено огляд сучасного стану наукових досліджень у сфері світової цементної промисловості, приділяючи особливу увагу технологіям процесу помолу та підходам до підвищення енергоефективності та якості цементу. Проаналізовано сучасні моделі керування замкнутими циклами подрібнення, серед яких нелінійне прогнозне керування, нейроадаптивні методи, системи на основі нечіткої логіки, управління ковзним режимом та експертні системи.

Огляд показав, що, незважаючи на значний прогрес у застосуванні інтелектуальних методів, існують суттєві обмеження. Зокрема, моделі на основі нейронних мереж потребують великих обсягів статистичних даних, зібраних протягом тривалого часу, що ускладнює їх застосування в реальних виробничих умовах. Крім того, в автоматизації процесу подрібнення відсутні ефективні механізми прийняття рішень за множиною показників у ситуаціях, коли вони є суперечливими.

Для подолання виявлених недоліків у роботі запропоновано низку підходів. Перший - метод виявлення шаблонів замкнутого циклу подрібнення на основі двох типів статистичних даних: загальної довгострокової статистики та локальних даних поточного стану із застосуванням регуляризації. Другий - метод прийняття ефективних рішень, що базується на явному урахуванні поточних значень технологічних показників у суперечливих умовах.

Таким чином, проведений аналіз дозволив сформулювати обґрунтовані напрями вдосконалення систем керування процесом помолу клінкеру, що забезпечують підвищення енергоефективності, стабільності технологічного режиму та якості готового цементу.

Запропоновано процедуру ідентифікації процесу помелу шихти в цементному виробництві, що складається з трьох етапів: на першому етапі відбувається нормалізація генеральної сукупності даних, на другому етапі - налаштування нейронної мережі на нормалізовану генеральну сукупність даних,

на третьому етапі - корекція отриманого рішення задачі на основі методу регуляризації. Подібний підхід дозволяє вирішувати некоректно поставлені задачі в оперативному керуванні з використанням нейронних мереж.

Для налаштування нейронної мережі при некоректних вихідних даних запропоновано алгоритм зворотного поширення помилки з використанням регуляризації некоректно поставлених задач, що дозволяє коректно вирішувати задачу ідентифікації залежностей параметрів і показників помелу в оперативному режимі.

Проведено дослідження циклу подрібнення як об'єкта управління для автоматизації технологічного процесу помелу клінкеру в замкнутому циклі. На основі проведеного дослідження розроблено автоматизоване робоче місце оператора (АРМ) млина в цементному виробництві.

Для вирішення завдань ефективного управління процесом подрібнення клінкеру в кульових млинах замкнутого циклу запропоновано інтерактивну процедуру прийняття керуючих рішень. Вона ґрунтується на формуванні поточних вимог до значень режимних параметрів, які визначаються в автоматизованій СППР на основі ідентифікації характеристик процесу з використанням нейронної мережі в режимі реального часу.

Проведено роботи з апробації алгоритму оперативного управління млином цементного виробництва з використанням розробленої СППР на основі методу зважених цільових обмежень. За результатами експериментальних робіт було показано, що за допомогою розробленої СППР досягається зниження споживання електричної енергії до 5%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Celik, I. B. The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development / *Powder Technology*, 2009. 188(3), 272–276.
- 2 Sixto Humberto Agüero. Process analysis and energy efficiency improvement on portland limestone cement grinding circuit / *Mining Engineering the university of British Columbia (Vancouver)* April 2015. 130 -137.
- 3 Bentz, D. P. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials / *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1999. 1663–1671.
- 4 Benzer, H., Ergun, L., Lynch, A. J., Oner, M., Gunlu, A., Celik, I. B., & Aydogan, N. Modelling cement grinding circuits. *Minerals Engineering*, 14(11), 2001. 1469–1482.
- 5 Романович А.А. Определение режима работы измельчителя с устройством для деагрегации агрессивных материалов / *Сборник научных трудов SWORLD*. Одесса 2013. Вып. 2. Том 7. С. 92-99.
- 6 Kohan William, Y. North American roll crusher installation documents inerised ball efficiney// *Pit and Quarry*: 1988. №10. p-21-22 /192/174
- 7 More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide / *World Cement*.2003.Vol. 34.№4. p. 15.
- 8 Sakata T. One-kill-one-mill system wt Osaka Cement / *Zement-Kalk - Gips*. 1983. 2. P. 75-80.
- 9 Schonert K. Roller press installation is the tops at Denver Conference. IEEE cement industry technical conference XXXI /*World Cement*. 1989. №7.p. 196-201
- 10 Вердиян М.А. Трубные мельницы с четким секционированием / *Цемент*. 1987. N 7. С. 20- 21.
- 11 Шахмагон, Н. В. Помол цемента в валковых мельницах / *Цемент*. 1985. №10. С. 18-20.

- 12 A proven competitive advantage for grinding / *World cement*. 2003.-Vol. 34. №4. P. 35.
- 13 Ackte, W. Neues Antriebssystem mit Planetenreibe für Walzenschuselmühlen / *Zement-Kalk -Gips*. 1983.B. 36. P. 87-91.
- 14 Duda, W.H. Cement Data Book, Bauverlag. Wiesbaden, 1978. «Nordberg grinding mills» / *Materialy firmy Nordberg- Division of Rex Chainbelt Inc*, Milwaukee, 1971.
- 15 Krufger, W Evaluation of crushing and grinding system for three different types of raw material / *The New cement and, technology conference*. Anaheim, California, May 21-24, 1984. New York, 1984. P. 1-21.
- 16 Loesche, E. Experience with roller mill on abrasive materials / *Thrie Cement Ind. Techn. cont.*, Vancouver, May 23-27, 1982. New York, 1982. P. 1-15.
- 17 Mathieu, E U. Erste versuchergebnisse zur vermahlung von Zementklinker auf pendelmühlen/ E. U. Mathieu / *Zement Kalk-Gips*. 1983.Vol. 36. №2. p.62-64.
- 18 Merik, G. P. Influence du broyage et la mode de conservation / *7 Congress international de la chimie des cements*. Paris, 1980. Vol. P. 1-41.
- 19 Motek, H. Vorzitzkleinerung in Kienkemahlantagen / *Zement- Kalk - Gips*. 1984. Vol. 37.№11.p. 569-576.
- 20 Patent No 3305339 DDR. Verfahren und Vorrichtung zur Kontinuerlichen druckzerk Hnerung spoden mahl -gutes / Gemer L., Zisselmar R., Kellerwessel H.1983.
- 21 Patent's 3301166, DDR. Pendelmühle für Überdruckbetrieb (Einblasmühle), auch für Unterdruckbetrieb Geeignet. Neuman Esser Maschinen-Fabrik/ Rucker O. 1983.
- 22 Salewski, G. Grinding Technology for the Future / *World Cement*. November. 2003. №11. P. 139-143.
- 23 Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 2 / *Cement International*. 2003. №6.P. 90-97.

- 24 Unger, W. Gegenuberstellung von Pendelund Schiisselmiihlen / *Zement-Kalk- Gips*. 1983.Vol. 36.№2. p. 57-62.
- 25 Богданов В.С., Платонов В.С. Трубные шаровые мельницы с внутренним рециклом/ *Цемент*. 1989. С. 15-16.
- 26 Линч А.. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. Москва. Недра, 1981. 343 с.
- 27 V. Van Breusegem, L. Chen, G. Bastin, V. Wertz, V. Werbrouck, C. de Pierpont, An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 32 (1996) 670 677.
- 28 F. Grogard, F. Jadot, L. Magni, G. Bastin, R. Sepulchre, V. Wertz, Robust stabilization of a nonlinear cement mill model, *IEEE Trans. Autom. Contr.* 46 (4) (2001) 618 623.
- 29 Topalov, A.V. Neural network modeling and control of cement mills using a variable structure systems theory based on-line learning mechanism / *Journal of Process Control*. 2004. V. 14. P.581–589.
- 30 Keen P.G.W. Decision Support Sustems: The next decades / *Decision Support Sustems*, 1987. vol. 3. pp. 253–265.
- 31 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.
- 32 ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
- 33 ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
- 34 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)

35 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)