

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:

«Застосування статистичних методів для прогнозування параметрів при розробці автоматизованої підсистеми керування якістю помелу цементу»

Виконав ст. гр. АКІТР-23-2м _____ Фурса П. Д.

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.

« 5 » липня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-23-2м Фурсі Павлу Дмитровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Застосування статистичних методів для прогнозування параметрів при розробці автоматизованої підсистеми керування якістю помелу цемент»

затверджено наказом по університету № 595с від 04.07.2024 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2024 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 95с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (15 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>10.07.24</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.07.24</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.08.24</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.09.24</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.24</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.24</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.24</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.23</i>

6. Дата видачі завдання: 28.06.2024р.

Керівник _____ /Маринич І.А./

7. Запевнення: Я, Фурса Павло Дмитрович, 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 _____ /Фурса П. Д./

АНОТАЦІЯ

Фурса П. Д. «Застосування статистичних методів для прогнозування параметрів при розробці автоматизованої підсистеми керування якістю помелу цементу».

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. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Метою роботи є підвищення якості продукції за рахунок використання АРС-контролю з віртуальним аналізатором на основі математичної статистики та інтелектуальних технологій в процесі помелу цементу.

У першому розділі проведено аналіз технологічного процесу, огляд технології виробництва цементу та вимірюваних параметрів, які можна прийняти за контрольовані параметри. Визначені фізичні вимірювані величини, згідно з якими може бути зроблений оперативний попередній висновок про якість цементу.

В другому розділі наведено математичний опис моделі помелу цементу. Показана можливість удосконалення деяких статистичних даних у процесі перевірки нормального розподілу за допомогою методу, заснованого на перетворенні Бокса-Кокса. Зроблено висновок про необхідність подальших статистичних досліджень контрольних діаграм Шухарта та неможливість використання карт Хотелінга для аналізу слабо корельованих вихідних даних.

В третьому розділі показано, що для автоматизованого комплексу контролю якості продукції необхідно використовувати віртуальний аналізатор для автоматизованого прийняття рішень або підтримки прийняття рішень. Найкраще для цієї мети підходить опорно-векторна машина (SVM), запропоновано алгоритм реалізації опорно- векторної машини.

АЛГОРИТМ, КОНТРОЛЬНІ КАРТИ, МАТЕМАТИЧНА СТАТИСТИКА,
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОПОРНО-ВЕКТОРНА МАШИНА

ANNOTATION

Fursa P. D. «Application of statistical methods for predicting parameters in the development of an automated quality control subsystem for cement grinding».

Graduation master`s work for obtaining an educational degree «Master» for the educational and professional program «Cyber-physical systems in industry, business and transport» in specialty 174 – «Automation, computer-integrated technologies, and robotics». – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024

The purpose of the work is to improve product quality by utilizing APC control with a virtual analyzer based on mathematical statistics and intelligent technologies in the cement grinding process.

In the first section presents an analysis of the technological process, an overview of cement production technology, and the measurable parameters that can be considered as controllable parameters. Physical measurable quantities are identified, based on which an operational preliminary assessment of cement quality can be made.

The second section provides a mathematical description of the cement grinding model. The potential for refining certain statistical data during normal distribution testing is demonstrated using a method based on the Box-Cox transformation. A conclusion is drawn regarding the necessity of further statistical studies on Shewhart control charts and the infeasibility of using Hotelling charts for analyzing weakly correlated output data.

The third section demonstrates that a virtual analyzer is required for the automated quality control complex to enable automated decision-making or decision-support. A support vector machine (SVM) is identified as the most suitable tool for this purpose, and an implementation algorithm for the SVM is proposed.

ALGORITHM, CONTROL CHARTS, MATHEMATICAL STATISTICS,
MATHEMATICAL MODEL, SUPPORT VECTOR MACHINE

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ	10
1.1 Суть проблеми контролю якості цементу	10
1.2 Технологія виробництва цементу	11
1.3 Аналіз статистичних методів контролю якості	16
1.3.1 Картки Парето	18
1.3.2 Причинно-наслідкова діаграма	19
1.3.3 Графічні методи подання статистичної інформації	20
1.4 Контрольні карти	21
1.4.1 Контрольні карти Шухарта	21
1.4.2 Розрахунок меж на ККШ	23
1.4.3 Карти Хотелінга	25
Висновки за розділом:	27
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС МОДЕЛІ ТА СТАТИСТИЧНИХ КРИТЕРІЄВ	28
2.1 Модель системи управління помелом цементу	28
2.2 Параметрична ідентифікація моделей	37
2.3 Комп'ютерне моделювання	41
2.4 Перевірка статистичної вибірки на нормальний розподіл	52
Висновки за розділом:	57
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВІРТУАЛЬНОГО АНАЛІЗАТОРУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТУ	59
3.1 Завантаження експериментальних даних та їх статистична обробка	59
3.2 Робота з генеративними правилами для вирішення конфліктів	70
3.3 Побудова машини опорних векторів (SVM)	75

3.4 Приклад варіанту реалізації запропонованої системи	86
Висновки за розділом:	89
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	93

ВСТУП

В останні роки у цементній промисловості розгорнулася напружена боротьба за клієнтів. Через високу конкуренцію першочерговим критерієм вибору продукту споживачами є якість. Висока кваліфікація оператора-диспетчера є обов'язковою умовою забезпечення якості кінцевого продукту. Контроль нормативних параметрів якості цементу є важливим для прийняття, проте не дає можливості прогнозування зміни параметрів технологічних процесів, тому створення автоматизованих систем, які використовують перевірені методи контролю якості та враховують специфіку галузі, є актуальним завданням. При цьому впровадження таких систем у складну інфраструктуру підприємства має бути максимально безболісним і не навантажувати сервіси, що працюють.

Враховуючи багатотоннажність виробництва та наслідки, пов'язані з виходом з ладу обладнання, автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) помелу цементу будуються за принципами диспетчерського управління, так званих SCADA систем. Широке застосування отримують APC (Advanced Process Control) рішення, що підтримують роботу з віртуальними аналізаторами – математичними моделями, що дозволяють обчислити, наприклад, якісні характеристики виробленого продукту, виходячи з вимірюваних безпосередньо даних.

Актуальність теми. Актуальною є задача створення системи контролю та управління якістю продукції з можливістю прогнозування виходу якісних показників за допустимі межі. Система попередить оператора і дасть йому поради, як вийти з аварійної ситуації. У зв'язку з тим, що цемент є порошкоподібною речовиною, яке виробляється в дуже великих кількостях, неможливо налагодити тотальний контроль якості всієї продукції.

Методом контролю виробничих процесів, що добре зарекомендував себе, є застосування статистичних методів на основі контрольних карт. На відміну від методів, що використовують гістограми та різні види діаграм (розкиду, Парето,

Ісікаві), контрольні карти здатні прогнозувати зміни параметрів технологічного процесу. У межах термінології АСУ ТП їх називають статистичними методами управління багатопараметричних технологічних процесах. Використання контрольних карт у складі АСУ ТП може забезпечити виявлення змін у технологічному процесі (вихід процесу з-під контролю) ще до того, як він досягне аварійного стану та зберегти його стабільність (властивість, що зумовлює сталість розподілів ймовірностей його) контрольованих параметрів). Використання таких методів спільно з інтелектуальними технологіями дозволить створити віртуальний аналізатор, здатний перевести SCADA в APC – систему вдосконаленого управління з моделлю, що прогнозує.

Зростання структурної складності, в свою чергу, призводить до збільшення помилок випадкового характеру. Вивчення технологічного комплексу в цілому з точки зору системного підходу закладає основи оптимального управління технологічними процесами. На основі таких знань стає можливим формувати алгоритми безпосереднього управління, розробляти виробничі регламенти і керівні документи, що сприяють зростанню продуктивності і високої якості продукції, безпечній експлуатації складного обладнання. Системний науковий підхід до підвищення якості продукції, що випускається дозволяє формувати вимоги до основ управління технологічними процесами.

Таким чином, найбільш прийнятні методи контролю та управління якістю в цементному виробництві є найбільш прийнятними для впровадження у віртуальний аналізатор контролю та управління якістю в цементному виробництві.

Метою роботи є підвищення якості продукції за рахунок використання APC-контролю з віртуальним аналізатором на основі математичної статистики та інтелектуальних технологій в процесі помелу цементу.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

– Аналіз виробничого циклу виробництва цементу і будівництва на його основі динамічної моделі технологічного процесу подрібнення цементу з використанням методів регресійної ідентифікації.

- Розробка методики підготовки технологічних даних для статистичного аналізу.
- Розробка математичної моделі оцінки статистичних параметрів процесу подрібнення цементу для оцінки його статистичної керованості.
- Створення віртуального аналізатора якості на базі Support Vector Machine.
- Розробка системи APC (Advanced Process Control) для контролю та управління якістю продукції та її впровадження в автоматизовану систему управління процесом подрібнення цементу.

Методи дослідження. У роботі використані методи сучасної теорії автоматичного керування та автоматизації технологічних процесів, теорії ймовірностей та математичної статистики, управління якістю та комп'ютерного моделювання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Суть проблеми контролю якості цементу

Цемент, будучи сполучним компонентом бетону, домінуючим в сучасних будівельних технологіях, має важливе значення в економіці.

Споживчі (технологічні) властивості цементу обумовлені фізичними властивостями цієї порошкоподібної речовини.

При вивченні фізичних властивостей звертають увагу на хімічний склад цементу, наявність домішок і їх пропорційний склад. Цемент отримують нагріванням вапняку до температури +1450...+1480 °С. При цьому часткове спікання відбувається з утворенням гранул так званого клінкеру. Для отримання власне порошкоподібного цементу клінкер шліфують разом з приблизно 5% гіпсового каменю або іншими формами сульфату кальцію. Склад хімічних речовин при шліфуванні регламентується ГОСТ 10178-85. Клінкер зазвичай містить чотири основні компоненти:

- аліт (Ca_3SiO_5 , трикальцієвий силікат) модифікований чужорідними іонами Mg^{2+} , Al^{3+} і Fe^{3+} (50-70% від загального складу);
- біліт (Ca_2SiO_4 , силікат кальцію), також модифікований чужорідними іонами Mg^{2+} , Al^{3+} і Fe^{3+} (15–30%);
- алюмінатна фаза (3CaAS , 3CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , трикальцій алюмінат), значно змінена за складом та/або структурою за рахунок чужорідних іонів Si^{4+} , Fe^{3+} , Na^+ та K^+ (5–10%);
- феритна фаза (4CaAFS , 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , тетракальцій алюмоферит), склад якої змінюється при зміні співвідношення Al/Fe і розміщенні в структурі чужорідних іонів (5-15%).

Технологічні властивості цементу визначаються в першу чергу швидкістю схоплювання при гідратації (залівка цементу водою і початок процесу

встановлення хімічних зв'язків між компонентами цементу і наповнювача в присутності молекул води) і міцністю (міжмолекулярна взаємодія між компонентами цементу і наповнювачем при утворенні штучного каменю у вигляді затверділого бетону після зневоднення).

Таким чином, оскільки розмір частинок в результаті подрібнення є чи не єдиним фізичним (механічним) контрольованим параметром (інші властивості регулюються в основному хімічним складом), важливість контролю цього параметра в технологічному процесі виробництва цементу важко переоцінити.

1.2 Технологія виробництва цементу

Технологія виробництва цементу складається з двох етапів: випал клінкеру та його помел спільно з добавками. Для виробництва портландцементу як сировинні матеріали застосовують головним чином карбонатні та глинисті породи, а також інші природні види сировини та штучні матеріали. Крім того, важливу роль також відіграють коригувальні добавки.

Для подрібнення твердих порід проводять кілька стадій дроблення в дробарках до розмірів 8-10 мм. Глину і крейду дроблять до шматків розміром 100 мм, після чого вони надходять у глиноболтанки, що є круглими залізобетонними резервуарами діаметром до 10 і висотою 2,5–3,5 м. У середині бовтанка футерована чавунними плитами, а в центрі розташована хрестовина, до якої прикріплено сталеві граблі для подрібнення глини. Після попадання глини в бовтанку її перемішують з водою і граблі, що обертаються, подрібнюють її до фракції 3-5 мм. Отримана суміш називається шламом. Далі її перекачують шламопроводами в бункери сировинного млина, де здійснюють її помел з додаванням вапняку. При використанні крейди як карбонатного компонента його, так само як і глину поміщають у бовтанку і потім перекачують у сировинний цех для помелу. Наступним етапом виробництва цементу є випалювання сировинної суміші. На цьому етапі важливо стежити за якістю матеріалу, що подається, проте визначити хімічний склад сировини шляхом забору проб з печі неможливо. Тому

для контролю сировинної суміші чи шламу використовуються шлам-басейни. Шлам двох різних складів надходить у різні басейни, після чого відбувається забір проб. Після встановлення хімічного складу того й іншого виду шламу з кожного басейну перекачується потрібна кількість сировини в третій, де його потрапляння спочатку перемішують за допомогою стисненого повітря, а потім ще й механічним способом.

Отриману сировинну суміш випалюють у барабанній печі довжиною до 200 метрів, яка обертається зі швидкістю 1-1,5 об/хв. Пекти опалюється газом і встановлена з невеликим нахилом для переміщення матеріалу. Сировинна суміш подається живильником у підняту її частину, після проходження процесу випалу на виході виходить клінкер, який вивантажується в холодильники, щоб матеріал охолонув, і направляється на наступну стадію обробки. На самому початку випалу відбувається випаровування вологи зі шламу, після чого протікають процеси дегідратації та декарбонізація з утворенням CaO і, нарешті, взаємодії CaO з іншими окислами, у результаті утворюються мінерали, що входять до складу клінкеру. Клінкер підлягає помелу в трубних млинах відкритого або замкнутого циклу після виходу з печі. Саме процес помелу цементу є найважливішим з погляду контролю якості. Технологічна схема (рисунок 1.1) ілюструє процес помелу цементу на будь-якому заводі.

Клінкер разом з добавками транспортується в кульовий цементний млин, заповнений металевими тілами, що мелють. Після млина матеріал проходить через сепаратори, що обертаються, де відбувається відбір дрібних фракцій отриманого цементу. Великі фракції вирушають на повторний помел до цементного млина. При помелі цементу млин аспірується з метою усунення пилу, видалення тепла та дрібних фракцій матеріалу. Аспірація здійснюється спеціальною установкою, що складається з вентилятора, рукавного фільтра або електрофільтра та осаджувальних циклонів (або аспіраційної шахти).

Аспіраційна шахта - повітрявод системи підключається до верхнього фланця приймальної камери, в результаті чого весь млин знаходиться під розрідженням. Повітря засмоктується через камеру завантаження. Саме за

рахунок цього повітряного потоку фракції цементу переміщуються цементним млином, а потім аерожелобами в силоси.

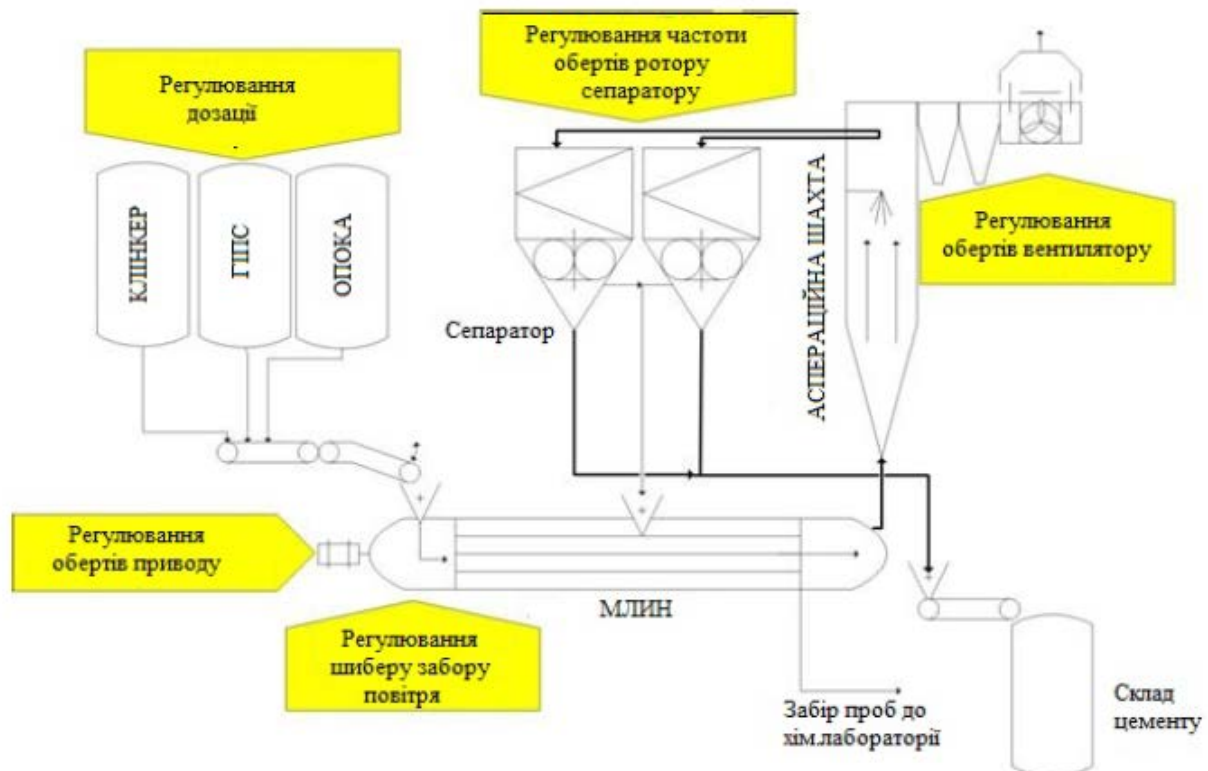


Рисунок 1.1 - Технологічна схема

Контроль за процесом помелу цементу здійснюється у спеціальному приміщенні, обладнаному кількома моніторами, на які виводяться мнемосхеми технологічного виробництва. Оператор здатний надавати керуючий вплив на будь-якому етапі процесу помелу цементу. Він регулює дозацію клінкеру та добавок, частоту обертання ротора сепаратора, обороти вентилятора аспіраційної системи (тим самим може змінювати розрідженість повітря у всій системі помелу). Проте через завантаженості екранів великим обсягом інформації оператор який завжди здатний оперативно реагувати на критичні ситуації у процесі помелу й часом не може передбачити їх виникнення [2].

Контроль при помелі клінкеру з добавками зводиться до перевірки вагового співвідношення між клінкером, гіпсом та іншими компонентами, відповідності ступеня подрібнення цементу нормативам, температури клінкеру та продукту, що отримується, та інших показників. Якість готової продукції визначається

безпосередньо у процесі її приймання згідно зі стандартизованою процедурою. На основі описаних вище методик, що реалізуються на виробництві, формується інструментальний та методологічний набір засобів та способів для відбору проб та їх шкалювання. З періодичністю 3 год. із цементного млина відбувається забір проб для аналізу якості цементу. Контрольованими технологічними параметрами є шість характеристик.

1. Питома поверхня цементу (на одиницю маси). Визначається з розрахунку щільності цементу (г/см^3), яку обчислюють за формулою (ГОСТ–310.276):

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1.1)$$

де m_1 – маса залишку цементу, г; m_2 навес цементу; V – об'єм рідини, витіснений цементом, см^3 .

2. Тонкість помелу цементу. Визначають як залишок на ситі з сіткою певного розміру комірки до початкової маси просіюваної проби з точністю до 0,1 % (ГОСТ 310.2–76).

3. Масова частка ангідриду сірчаної кислоти в цементі. Визначають за формулою (у відсотках, ГОСТ 5382–91):

$$XSO_{3zag} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 0,343 \cdot 100}{m} \quad (1.2)$$

де m – маса навесу проби, г. m_1 – маса порожнього тигля, г; m_2 – маса тигля з прожареним осадом, г;

Масову частку сірки (II) обчислюють за формулою (у відсотках):

$$X = (XSO_{3zag} - XSO_3) \cdot 0,4 \quad (1.3)$$

де XSO_3 – масова частка сірки (VI), %.

4. Масова частка опоки в цементі. Дослідження частки оксиду кремнію (SiO_2) обчислюють за формулою (у відсотках, ГОСТ 5382–91):

$$XSiO_2 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m} \quad (1.4)$$

де m – маса навесу проби, г., m_1 – маса тигля з осадом до обробки кислотами, г; m_2 – маса тигля з залишком після обробки кислотами, г.

Хімічний склад опоки наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Вміст оксидів в опоці

Вміст оксидів, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Інші
72,3-89,8	3,2-12,5	1,0-7,6	0,1-22,8	0,1-5,6	0-0,5	0,6-3,1	0,1-1,8	1,7-17,6

5. Масова частка оксиду кальцію в цементі CaO обчислюється за формулою (у грамах на кубічний сантиметр, ГОСТ 5382–91):

$$T_{CaO}^1 = \frac{20 \cdot 5 \cdot C_{CaO}}{V_{cp} \cdot 1000 \cdot 100} \quad (1.5)$$

де 20 – об'єм аликвотної частини розчину стандартного зразка, взятий для титрування, см³; 5 – маса навісу стандартного зразка, г; C_{CaO} – масова частка оксиду кальцію в стандартному зразку, зазначена в сертифікаті, %; V_{cp} – середнє арифметичне значення об'єму розчину, витраченого на титрування, см³.

Або за формулою:

$$T_{CaO}^2 = \frac{20 \cdot 0,1 \cdot C_{CaO}}{(V_{cp} - V_x) \cdot 500 \cdot 100} \quad (1.6)$$

де V_x – об'єм розчину, витраченого на титрування холостого розчину, см³.

6. Відсотковий вміст вологи в цементі. Згідно з застосовується так званий гравіметричний метод обчислюють за формулою (у відсотках, ГОСТ 5382–91):

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m} \quad (1.7)$$

де m – маса навісу проби, г; m_1 – маса навісу з бюксом до сушки, г; m_2 – маса навісу з бюксом після сушки, г;

На рисунку 1.2 показано взаємозв'язок керуючих впливів і контрольованих технологічних параметрів.

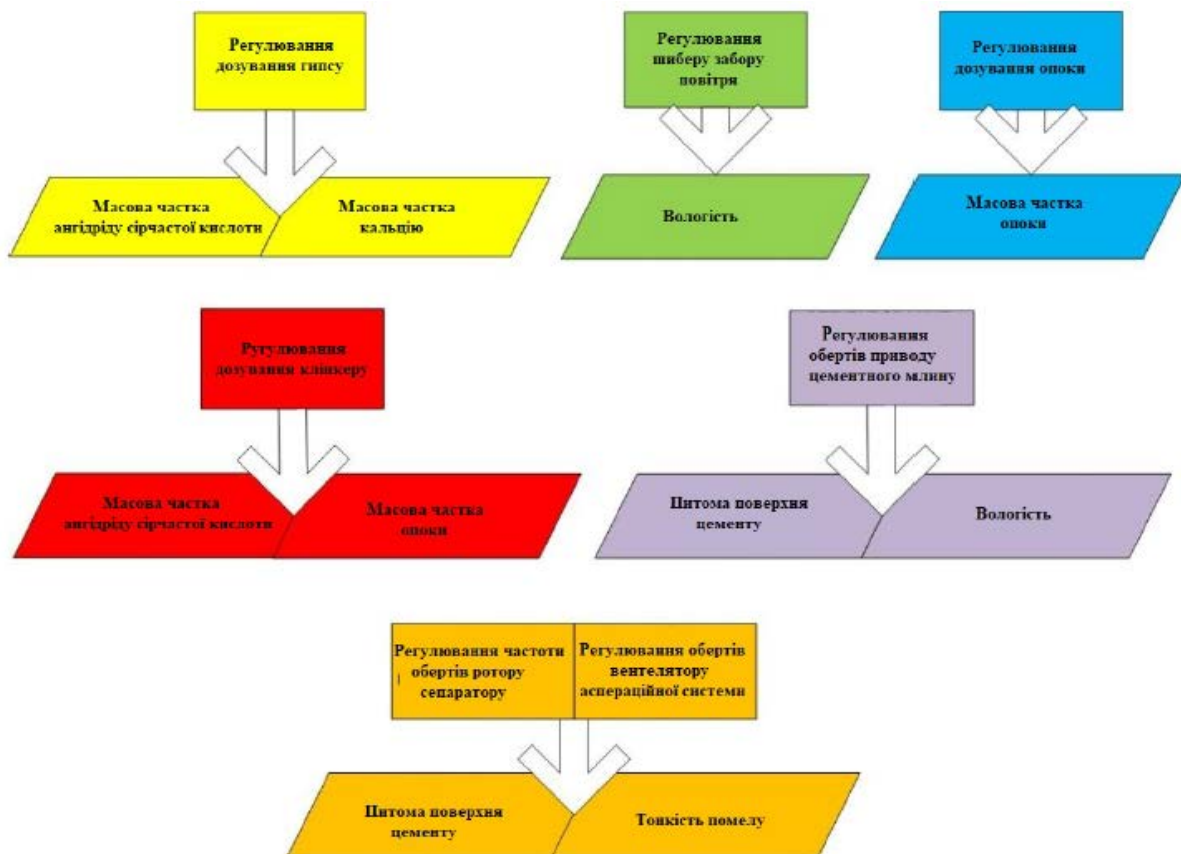


Рисунок 1.2 – Зв'язок керуючих впливів і контрольованих параметрів

1.3 Аналіз статистичних методів контролю якості

Сенс застосування статистичних методів полягає у неможливості з тих чи інших причин проведення тотального контролю якості продукції, наприклад у зв'язку з кількістю продукції, що випускається, або її характером, або через високу вартість проведення суцільного контролю. Тому ставиться завдання винести рішення (висновок) про якість продукції або процесу за певною спеціальним чином цільовою вибіркою.

Статистичні методи контролю застосовуються (рис. 1.3):

- при безпосередньому регулюванні технологічним процесом;
- при остаточному прийманні готової продукції.

Аналіз якості – це набір методів, що дозволяє усвідомити зв'язок між причинними чинниками та результатами процесу.

Аналіз (контроль) процесу – це виявлення причинних чинників, які впливають оптимальне функціонування виробничого процесу.



Рисунок 1.3 - Сфери застосування статистичних методів управління якістю продукції

Загальні принципи статистичних методів виходять з виділення заданого конкретним технологічним процесом параметра (параметрів) з урахуванням допусків. Такими параметрами є фізичні характеристики продукції, контрольовані параметри технологічного процесу або окремі технічні характеристики виробничого обладнання. У цьому метою застосування тієї чи іншої методу є жорстке утримання еталонних допусків не більше технічних вимог.

У межах застосування статистичних методів ставиться завдання як утримання необхідних параметрів, і пошуку нових оптимальних технологічних режимів. Також може бути поставлене завдання мінімізації відходів виробництва.

Основні цілі застосування статистичних методів контролю:

- підвищення якості сировини та напівфабрикатів (при цьому основне завдання збільшити кількість якісної продукції);
- економія ресурсів та мінімізація витрат;
- підвищення якості продукції та зниження шлюбу;
- зниження витрат на проведення контролю;
- оптимізація технологічного процесу;
- масштабованість та модульність (легкість переходу на іншу продукцію) виробництва.

У контролі якості виділяють два основні поняття – вимір контрольованих фізичних параметрів та його розподіл (статистична функція розподілу).

Розподіл значень фізичних параметрів заснований на фізичній теорії та практиці вимірювань, які стверджують, що неможливо виміряти два абсолютно однакових за величиною параметра в тих самих виробів без похибок (помилки).

Похибки (помилки) вимірів бувають двох видів: випадкові - коли виявлена помилка є результатом сукупності випадкових величин, що утворюються в типових умовах; системні – коли виявлена помилка є результатом причин системного характеру.

Статистичні методи за рівнем складності можна поділити на три основні категорії: Прості статистичні методи; Контрольні карти; Вибіркові статистичні дослідження.

Прості статистичні методи – це методи, які безпосередньо застосовуються з можливістю використання прямих обчислень вручну.

1.3.3 Картки Парето

Картка (діаграма) Парето будується у вигляді стовпчастого двовимірного графіка (отриманого шляхом групування за виділеною дискретною ознакою) і показує у спадному порядку відносний вплив конкретного фактору на досліджувану проблему у вигляді кумулятивної (накопиченої) частоти, тобто. розподіл по карті (діаграмі) Парето є простий двовимірний статистичний розподіл досліджуваної величини, виражений у частках від одиниці (або від

100%). В результаті така залежність дозволяє аналізувати прості (плоскі) залежності будь-якої сфери дійсності об'єкта аналізу.

Тобто. розподіл по карті (діаграмі) Парето є простий двовимірний статистичний розподіл досліджуваної величини, виражений у частках від одиниці (або від 100%). В результаті така залежність дозволяє аналізувати прості (плоскі) залежності з будь-якої сфери дійсності об'єкта аналізу.

Як наслідок плоского розподілу для випадку складної залежності досліджуваної величини (проблеми) від багатьох факторів з'являється необхідність угруповання за критеріями аналізу. Власне приналежність однієї групи означає можливість проведення аналізу з допомогою діаграми Парето. Приклад: Нехай на складі є велика кількість деталей. Проводити контроль усіх деталей без запровадження критерію розбіжності у разі виявляється не ефективно. У той самий час можна розділити деталі на групи з вартості. Тоді при виділенні статистичної залежності в явному вигляді проявляється відоме правило Парето: частку найдорожчих деталей припадає близько 80% вартості, при цьому вони становлять близько 20% від загальної кількості деталей.

1.3.4 Причинно-наслідкова діаграма

Причинно-наслідкова діаграма («риб'ячий скелет» або діаграма Ісікави) - графічний спосіб виявлення причинно-наслідкових залежностей і взаємозв'язків було запропоновано наприкінці 40-х – початку 50-х японським теоретиком менеджменту К. Ісікавой. Причинно-наслідкова діаграма застосовується виявлення, дослідження та подальшого зображення можливих (імовірних) причин певної проблеми. Вона дозволяє визначити та згрупувати для наступної класифікації умови та фактори, що впливають на ту чи іншу проблему.

Алгоритм (порядок) складання діаграми наступний:

– вибирається проблема для вирішення – вона зображується як «хребет»;

- виділяються найістотніші фактори та умови – причини першого порядку, що впливають на проблему безпосередньо та включають сукупність різноманітних причин чи складових факторів – «велика кістка»);
- виділяється сукупність причин, що впливають на суттєві фактори та умови опосередковано і можуть бути складовими факторами;
- кількість рівнів включення – середня кістка, мала кістка тощо. залежно від рівня та ступеня значущості);
- аналіз діаграми: фактори та умови розставляються за значимістю, виявляються та встановлюються причини, що піддаються коригуванню;
- складається план подальших дій.

1.3.3 Графічні методи подання статистичної інформації

Графічне подання даних широко застосовується для наочності та полегшення розуміння змісту даних. Стосовно завдань контролю якості продукції використовуються такі види графіків.

Апроксимація (наближення) деякої часової залежності, вираженої у вигляді ламаної лінії. Найчастіше використовується апроксимація методом найменших квадратів.

Кругова і стрічкова діаграми застосовуються для вираження пайового або відсоткового співвідношення даних, що розглядаються. На стрічковому графіку, наприклад, показано залежність деякої цільової функції від виділеної причини з окремих груп факторів (А, В, С); помітна тенденція: за групою В є тенденція до збільшення значення, тобто. є основа прийняття відповідного рішення.

Гістограма є, по суті, звичайний графік, виражений у вигляді стовпчастого маркера. Якщо впорядкувати цільову функцію частоти прояви, то вийде діаграма Парето. Застосування гістограм надало інструмент для аналізу та прийняття рішень. Свого часу аналіз графічних даних подібного характеру дозволив набрати методики, ідеї для застосування у складніших ситуаціях, що зустрічаються, наприклад, у технічному аналізі часових рядів.

1.4 Контрольні карти

1.4.1 Контрольні карти Шухарта

Інструмент для аналізу мінливості будь-яких процесів, винайдений в 1924 році Уолтером Шухартом, який найчастіше називають контрольною діаграмою Шухарта (SHC), набирає популярність в більшості різних організацій і галузей. Сьогодні це інструмент, який використовується не тільки на промислових підприємствах для аналізу виробництва [7, 9], а й в освіті [14], сфері послуг та послугах [6, 7], медицині [5, 8], бізнес-аналітиці [11], державному управлінні [5] тощо.

Суть ідеї SHC полягає в наступному. Практично всі процеси і явища схильні до мінливості (мінливості). Мінливість / мінливість проявляється у всьому, що оточує людину: в результатах дій, в рішеннях, в результатах вимірювань, в методах управління, у виборі шляхів і способів навчання, лікування, виховання і т. д. Основна перевага методу ККШ полягає в тому, що він дозволяє [9, 11] розкласти (векторизувати) варіабельність на дві незалежні складові за рахунок «випадкових причин» і «системних причин».

Контрольна діаграма Шухарта - це метод розкладання мінливості на мінливість, обумовлену загальними (випадковими) і спеціальними/спеціальними (тимчасовими) причинами. Методика полягає в описі самого процесу і трьох додаткових залежностей: осьової лінії, верхньої і нижньої меж управління (рис.1.4). Виходячи з цих залежностей, Шухарт запропонував правило прийняття рішення: якщо всі значення обмежені верхньою і нижньою контрольними межами, то особливих причин немає і процес статистично контрольований, т. Е. Передбачуваний. Якщо є точки, що виходять за верхню і нижню контрольну межі, то є особливі причини, і тоді процес вважається неконтрольованим (нестабільним). Все це виявляється надзвичайно важливим для механізму прийняття рішень в будь-яких процесах і характеризує момент оптимального контролінгу/контролюючого втручання в процес.

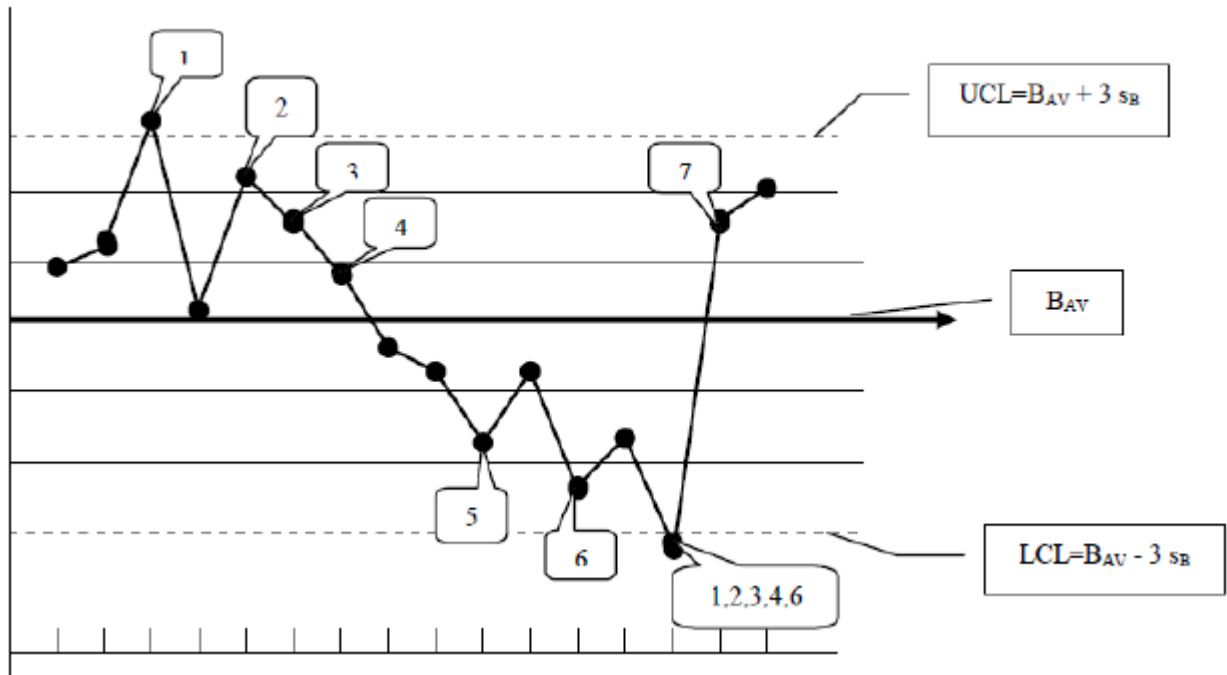


Рисунок 1.4 – Демонстрація застосування правил читання ККШ

Статистична модель методу виглядає наступним чином [7, 9]. Припустимо, існує деяка статистика, отримана шляхом вимірювання деякого кількісного (безперервного) значення y . Нехай показник процесу \bar{y} є середнім арифметичним, а зразкове стандартне відхилення (SD) розглядається як показник мінливості \bar{s} . Тоді центральна лінія (CL), верхня і нижня контрольні межі (VCP і NCP) будуть рівні:

$$\begin{aligned}
 CL &= \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \\
 VCP &= \bar{y} + k_1 \bar{s} \\
 NCP &= \bar{y} - k_2 \bar{s}
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},
 \tag{1.9}$$

де k_1 і k_2 – відстань від ЦЛ до відповідних контрольних меж; n – число значень в групі.

За уявною простотою формул (1.9) насправді ховається складний вибір оцінки CP . Ця оцінка, взагалі кажучи, повинна бути простою для розрахунку на

практиці і бути теоретично обґрунтованою. По суті, це питання, яке поки що відкрите. З практичним визначенням цієї величини пов'язані різні варіанти ККШ.

У той же час стандартна контрольна схема не в змозі виявити причини мінливості процесу. Причина в тому, що межі контролю ґрунтуються на фактичному стані процесу, а не на встановлених вимогах. В результаті, якщо процес характеризується високою мінливістю, то межі контролю досить широкі. Висновок: необхідний метод, який зможе ефективно виявляти тенденції зміни процесів.

1.4.2 Розрахунок меж на ККШ

Розгляд проблеми меж мав значний вплив на методологію *SHC*. Згідно з формулою (1.9), межі відокремлені від *CL* приблизно на три *CP*. Здавалося б, що тут проблем немає. Однак проблема є, точніше, була. На даний момент, коли поняття обчислювальної складності не так важливо, як це було раніше, крайова задача грає роль тільки при поділі групи значень на підгрупи (тобто при дуже великих числах вимірювань).

При більш детальному розгляді задачі обчислення *SD* за значеннями діапазонів [1, 9, 12] в якості «швидкої» статистичної оцінки *SD* через діапазон вибірки [20] береться наступний вираз:

$$\begin{aligned}\bar{s}_R &= \frac{\bar{R}}{d_n}, \\ d_n &= M\left(\frac{R}{s}\right).\end{aligned}\tag{1.10}$$

Тут M – математичне очікування.

У 1954 р для великого числа статистичних розподілів [60] було теоретично і експериментально показано, що

$$M\left(\frac{R_n}{sd_n}\right) \sim 1,$$

За умови $1 < n \leq 5$. Тобто відношення R_n/d_n має тенденцію до завищення значення s для більшості ненормальних статистичних розподілів.

У літературі, присвяченій ККШ, коефіцієнт d_n часто визначається як d_2 . Узагальнюючи історично сформовані підходи до читання карт Шухарта, можна скласти зразковий перелік правил [3] (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Приклад умов (правил) прийняття рішень за контрольними картами

Правило 1	Точка лежить вище (нижче) верхньої контрольної межі
Правило 2	У трьох послідовних точках дві лежать вище (нижче) CL більш ніж на два стандартних відхилення
Правило T	Дві послідовні точки лежать вище (нижче) CL більш ніж на два стандартних відхилення
Правило 3	У п'яти послідовних точках чотири лежать вище (нижче) CL більш ніж на одне стандартне відхилення
Правило 3'	Чотири послідовні точки лежать вище (нижче) CL більш ніж на одне стандартне відхилення
Правило 4	Сім послідовних точок лежать вище (нижче) CL
Правило 5	Шість послідовних точок розташовуються в монотонному порядку по висхідному (спадаючому)
Правило 6	Серед десяти послідовних пунктів виділяють підгрупу з восьми точок (рахуючи зліва направо), яка утворює монотонно зростаючу (спадаючу) послідовність
Правило 7	З двох послідовних пунктів другим є як мінімум чотири стандартних відхилення вище (нижче) першого

Згідно з ГОСТ, під ККШ розуміють графік значень заданої характеристики групи (підгрупи) набору, відповідно до номера групи (підгрупи). Карта має центральну лінію (лінія на рисунку 1.4) на основі еталонного значення, яке зазвичай є середнім арифметичним даної характеристики. Цільові значення можуть встановлюватися різними способами (початкові вимоги, цільові значення і т.д.).

САР має статистично визначені межі, розташовані по обидва боки від CL , які називаються верхньою контрольною межею (VCP) (лінія на рисунку 1.4) та нижньою контрольною межею (NCP) (лінія на рисунку 1.4) відповідно. Межі контролю будуються на відстані трьох стандартних відхилень від CL . Передбачається, що розташування контрольних меж на меншій відстані від CL може призвести до помилкового виявлення проблем (тобто проблем, яких насправді не існує).

ККШ використовуються в двох основних випадках.

1. Параметричні величини не визначені. У цьому випадку використовуються для виявлення відхилень значень спостережуваних характеристик (наприклад, середнього \bar{y} , розмах R і т.д.). Такі контрольні діаграми використовуються для вивчення варіабельності.

2. Визначено параметричні величини. При цьому обстежуються спостережувані значення (\bar{y} , s і т.д.) для декількох підгруп, які відрізняються від заданих значень більше, ніж можна очікувати тільки під дією випадкових причин.

Також можливе використання РКШ для різних типів функціональних залежностей: безперервних і дискретних. У першому випадку карти використовуються для кількісних даних, у другому - для так званих альтернативних даних (це результати, описані в натуральних числах, або категоризовані, класифіковані дані). Контрольні діаграми для кількісних даних є класичними картами Шухарта.

У завданні, що спочатку стоїть перед нами, необхідно витримати задану фізичну величину, що характеризує параметр кінцевого продукту. Тому основний інтерес становить ККШ для кількісних типів даних.

1.4.3 Карти Хотелінга

Реальні фізичні процеси протікають в просторі, в якому на результат впливає безліч причин. Тому в багатовимірному просторі доречно описувати реальний процес, розмірність якого визначається кількістю впливають (точніше, враховуються) факторів.

Узагальнення керуючих діаграм Шухарта для об'єктивно-керованої функції в багатовимірному просторі випадкових векторів було запропоновано Хотелінгом.

По суті, карта Хотелінга є багатовимірною статистичною моделлю, що враховує нюанси переходу від плоского простору до довільного n -вимірного простору, що дозволяє здійснювати взаємну кореляцію між векторами. Кореляція між векторами є фундаментальною умовою різниці підходів. Оскільки карта Шухарта призначена в основному для пошуку відхилень від середнього рівня процесів, карта Хотелінга досить ефективна при вирішенні тієї ж задачі в багатовимірному випадку. Однак, маючи певний поріг чутливості, цей метод пропускає незначні зміщення. Для підвищення чутливості карт Хотелінга використовуються різні модифікації [4].

З точки зору теорії ймовірностей, довільний випадковий процес буде характеризуватися нормальним (гаусовим) розподілом функції густини ймовірності. Тоді ймовірність настання випадкового відхилення від керованої величини x буде характеризуватися функцією розподілу Гауса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1.11)$$

Тут \bar{x} – математичне очікування (середнє значення); σ – середньоквадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}. \quad (1.12)$$

Таким чином, якщо існує стохастичний процес (на нескінченній статистиці, взагалі кажучи), то актуальна задача оцінки статистичного розподілу стохастичного процесу (імовірно гаусовського) на скінченне число вимірів. Іншими словами, існує обернена задача – відновлення істинної функції розподілу по виміряному розподілу на кінцевому числі випробувань.

Висновки за розділом:

Проведено огляд технології виробництва цементу та вимірюваних параметрів, які можна прийняти за контрольовані параметри.

Визначаються фізичні вимірювані величини і описуються методи їх вимірювання, згідно з якими може бути зроблений оперативний попередній висновок про якість цементу. Для цих цілей виділяються такі параметри:

- питома площа поверхні цементу,
- тонкість помелу цементу,
- масова частка сірчаного ангідриду в цементі,
- масова частка колби,
- масова частка оксиду кальцію в цементі
- процентний вміст вологи в цементі.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС МОДЕЛІ ТА СТАТИСТИЧНИХ КРИТЕРІЄВ

2.1 Модель системи управління помелом цементу

Для можливості застосування статистичних методів контролю була проведена перевірка на стаціонарність усіх технологічних процесів. Стаціонарним процесом вважається той, ймовірнісні характеристики (математичне очікування, дисперсії), яких не залежать від часу.

$$\begin{aligned} m_x(t) &= m_x = const \\ D_x(t) &= D_x = const \end{aligned} \quad (2.1)$$

З визначення стаціонарного процесу другого порядку безпосередньо випливає, що очевидним параметричним критерієм при перевірці реального процесу на стаціонарність є критерій Стюдента. Він може бути використаний для перевірки гіпотез про постійність на розглядуваному інтервалі $t = 1, 2, T$ математичного очікування, коефіцієнтів автокореляції та дисперсії. Ці критерії застосовуються за умови нормального закону розподілу як значень тимчасового ряду y_t , так і його вибірових параметрів, що є справедливим для багатьох реальних процесів.

Загальний тест процедури перевірки гіпотези про постійність математичного очікування може бути організований наступним чином. Інтервал часу $(1, T)$ (і відповідно тимчасовий ряд $y_t, t = 1, 2, T$) розбивається на дві частини, не обов'язково однакових за кількістю в них значень y_t , з кількістю спостережень $T_1 (t = 1, 2, T_1)$ і $T_2 (t = T_1 + 1, T)$, де $T_2 = T - T_1$.

Для кожної з частин визначаються оцінки \bar{y}_1 і s_1^2 , \bar{y}_2 і s_2^2 вибірових математичного очікування і дисперсії змінної y_t відповідно. Далі розраховуються значення критерія Стюдента по формулі:

$$\tau = \frac{|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{T_1} + \frac{s_2^2}{T_2}}} \quad (2.2)$$

Якщо виявляється вірною нерівність:

$$\tau < \tau_{кр}(p^*, n)$$

де (p^*, n) – критичне значення критерію Стюдента, що відповідає значенням p^* і n ; p^* – заданий рівень довірчої вірогідності ($p^*=0,95; 0,97\dots$); $n=T_1+T_2-2$ – число ступенів свободи, то гіпотезу про постійність математичного очікування процесу y_t доцільно прийняти. Імовірність помилки такого рішення становить $1-p^*$. В іншому випадку, тобто при $\tau > \tau_{кр}(p^*, n)$, ця гіпотеза відкидається.

Перевірка з використанням критерію Стюдента всіх експериментальних характеристик показала, що це технологічні процеси стаціонарні (табл. 2.1-2.6).

Таблиця 2.1 – Дані для розрахунку критерію Стюдента для параметра «Тонкість помелу цементу»

№ п/п	Вибірки		Відхилення від середнього		Квадрати відхилень	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	0,8	1,5	-0,81	-0,48	0,6561	0,2304
2	1,2	2	-0,41	0,02	0,1681	0,0004
3	1,4	1,9	-0,21	-0,08	0,0441	0,0064
4	1,2	2	-0,41	0,02	0,1681	0,0004
5	1,9	2,2	0,29	0,22	0,0841	0,0484
6	2,92	2,7	1,31	0,72	1,7161	0,5184
7	1,5	1,3	-0,11	-0,68	0,0121	0,4624
8	1,7	2	0,09	0,02	0,0081	0,0004
9	1,5	1,8	-0,11	-0,18	0,0121	0,0324

Продовження табл.2.1

10	2	2,4	0,39	0,42	0,1521	0,1764
Сумма	16,12	19,8	0,02	0	3,021	1,476
Середнє	1,61	1,98				
Розрахнок критерія	τ	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,05$)	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,01$)	$\tau < \tau_{кр}$		
	1,7	2,1	2,88	Імовірнісні характеристики постійні		

Таблиця 2.2 - Дані для розрахунку критерію Стюдента для параметра "Питома поверхня цементу"

№ п/п	Вибірки		Відхилення від середнього		Квадрати відхилень	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	4207	3847	76,3	-293,9	5821,69	86377,21
2	4469	4025	338,3	-115,9	114446,89	13432,81
3	4022	4098	-108,7	-42,9	11815,69	1840,41
4	4098	4181	-32,7	40,1	1069,29	1608,01
5	3975	4457	-155,7	316,1	24242,49	99919,21
6	3896	4257	-234,7	116,1	55084,09	13479,21
7	3962	4056	-168,7	-84,9	28459,69	7208,01
8	4207	4283	76,3	142,1	5821,69	20192,41
9	4264	4022	133,3	-118,9	17768,89	14137,21
10	4207	4183	76,3	42,1	5821,69	1772,41
Сума	41307	4140,9	0	0	270352,1	259966,9
Середнє	4130,7	4140,9				
Розрахунок критерія	τ	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,05$)	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,01$)	$\tau < \tau_{кр}$		
	0,1	2,1	2,88	Імовірнісні характеристики постійні		

Таблиця 2.3 - Дані для розрахунку критерію Стьюдента для параметра "Масова частка ангідриду сірчаної кислоти"

№ п/п	Вибірки		Відхилення від середнього		Квадрати відхилень	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	3,14	3,08	0,34	0,2	0,1156	0,04
2	2,57	3,21	-0,23	0,33	0,0529	0,1089
3	2,57	2,66	-0,23	-0,22	0,0529	0,0484
4	2,39	2,85	-0,41	-0,03	0,1681	0,0009
5	2,84	2,83	0,04	-0,05	0,0016	0,0025
6	2,92	2,8	0,12	-0,08	0,0144	0,0064
7	2,72	2,8	-0,08	-0,08	0,0064	0,0064
8	2,75	2,9	-0,05	0,02	0,0025	0,0004
9	3,196	2,86	0,396	-0,02	0,1568	0,0004
10	2,91	2,85	0,11	-0,03	0,0121	0,0009
Сума	28,006	28,84	0,006	0,04	0,5833	0,2152
Середнє	2,8	2,88				
Розрахунок критерія	τ	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,05$)	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,01$)	$\tau < \tau_{кр}$		
	0,1	2,1	2,88	Імовірнісні характеристики постійні		

Таблиця 2.4 - Дані для розрахунку критерію Стьюдента для параметра "Масова частка опоки"

№ п/п	Вибірки		Відхилення від серед-го		Квадрати відхилень	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	4,88	5,54	0,6	0,87	0,36	0,7569
2	3,92	4,99	-0,36	0,32	0,1296	0,1024

Продовження табл.2.4

3	3,92	4,33	-0,36	-0,34	0,1296	0,1156
4	3,88	4,39	-0,4	-0,28	0,16	0,0784
5	3,96	4,27	-0,32	-0,4	0,1024	0,16
6	5,03	4,56	0,75	-0,11	0,5625	0,0121
7	4,88	4,71	0,6	0,04	0,36	0,0016
8	3,48	4,56	-0,8	-0,11	0,64	0,0121
9	4,38	4,68	0,1	0,01	0,01	0,0001
10	4,5	4,68	0,22	0,01	0,0484	0,0001
Сума	42,83	46,71	0,03	0,01	2,5025	1,2393
Середнє	4,28	4,67				
Розрахунок критерія	τ	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,05$)	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,01$)	$\tau < \tau_{кр}$		
	2,0	2,1	2,88	Імовірнісні характеристики постійні		

Таблиця 2.5 - Дані для розрахунку критерію Стьюдента для параметра "Масова частка оксиду кальцію"

№ п/п	Вибірки		Відхилення від серед-го		Квадрати відхилень	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	0,37	0,18	0	-0,2	0	0,04
2	0,42	0,21	0,05	-0,17	0,0025	0,0289
3	0,42	0,41	0,05	0,03	0,0025	0,0009
4	0,43	0,4	0,06	0,02	0,0036	0,0004
5	0,28	0,31	-0,09	-0,07	0,0081	0,0049
6	0,56	0,3	0,19	-0,08	0,0361	0,0064
7	0,42	0,31	0,05	-0,07	0,0025	0,0049

Продовження табл.2.5

8	0,48	0,57	0,11	0,19	0,0121	0,0361
9	0,14	0,45	-0,23	0,07	0,0529	0,0049
10	0,21	0,61	-0,16	0,23	0,0256	0,0529
Сума	3,73	3,75	0,03	-0,05	0,1459	0,1803
Середнє	0,2	0,22				
Розрахунок критерія	τ	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,05$)	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,01$)	$\tau < \tau_{кр}$		
	0,2	2,1	2,88	Імовірнісні характеристики постійні		

Таблиця 2.6 - Дані для розрахунку критерію Стьюдента для параметра "Вологість"

№ п/п	Вибірки		Відхилення від серед-го		Квадрати відхилень	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	0,25	0,25	0,05	0,03	0,0025	0,0009
2	0,2	0,3	0	0,08	0	0,0064
3	0,2	0,25	0	0,03	0	0,0009
4	0,2	0,15	0	-0,07	0	0,0049
5	0,2	0,2	0	-0,02	0	0,0004
6	0,2	0,2	0	-0,02	0	0,0004
7	0,2	0,2	0	-0,02	0	0,0004
8	0,2	0,25	0	0,03	0	0,0009
9	0,2	0,2	0	-0,02	0	0,0004
10	0,15	0,2	-0,05	-0,02	0,0025	0,0004
Сума	2	2,2	0	0	0,005	0,016
Середнє	0,2	0,22				

Продовження табл.2.6

Розрахунок критерія	τ	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,05$)	$\tau_{кр}$ ($p \leq 0,01$)	$\tau < \tau_{кр}$
		2,0	2,1	2,88

На основі аналізу технології виробництва, вхідних та вихідних значень сформовано модель системи управління помелу цементу (рисунок 2.1). Отримана модель є безперервною стаціонарною системою управління в просторі станів і має такий вигляд:

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + BU(t), \quad (2.3)$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t),$$

де $X(t)$ - n -вимірний вектор стану; $U(t)$ - r -вимірний вектор управління (вхідні керуючі дії); $Y(t)$ - m -мірний вектор виходу системи; A - матриця стану розміру $n \times n$; B - матриця входу розміру $n \times r$; C - матриця виходу розміру $m \times n$; D - матриця обходу розміру $m \times r$.

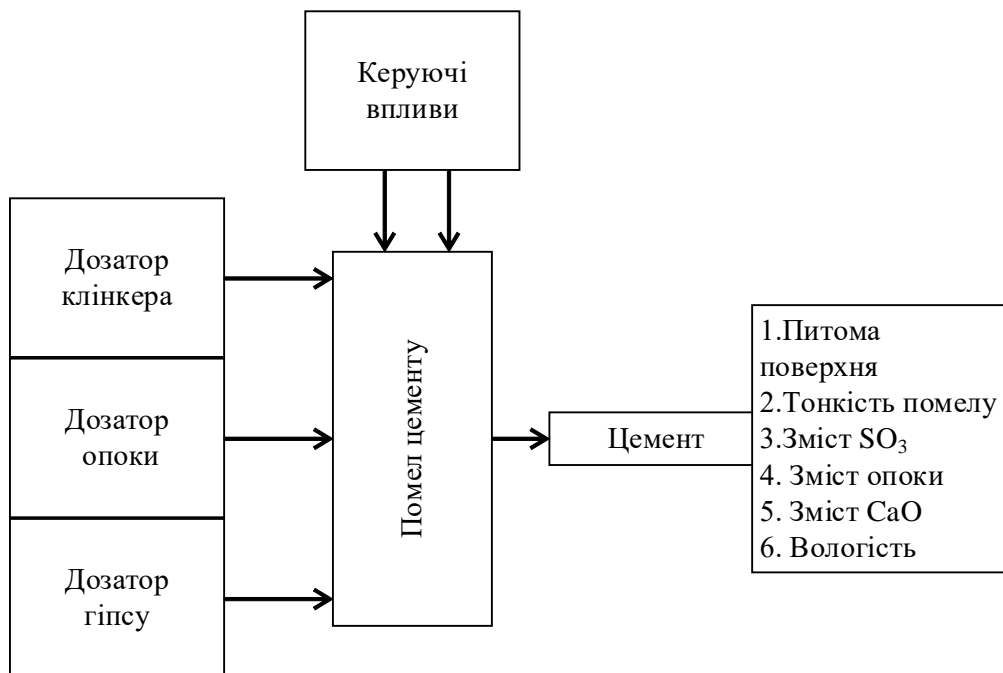


Рисунок 2.1 – Модель системи керування помелом цементу

Для отримання даних щодо реакції системи проведено процедуру регресивної ідентифікації. Для застосування регресивного аналізу систему з безперервним часом слід подати у дискретній формі:

$$\begin{aligned} X[(k+1)T] &= A_d X(kT) + B_d U(kT), \\ Y(kT) &= CX(kT) + DU(kT), \end{aligned} \quad (2.4)$$

де T - крок квантування (період дискретизації) за часом; k – цілі числа; A_d, B_d, C, D – матриці дискретної системи тих самих розмірів, що й для вихідної безперервної системи.

Матриці A_d, B_d мають такий вигляд:

$$\square A_d = e^{AT}, \quad (2.5)$$

$$B_d = \int_0^T e^{A\tau} B d\tau. \quad (2.6)$$

Якщо матриця A безперервної системи невироджена, то матрицю B_d можна уявити у вигляді

$$B_d = A^{-1}(e^{AT} - E)B, \quad (2.7)$$

де E - одинична матриця n -го порядку [17].

Оскільки в рівняннях дискретної системи крок квантування за часом T входить ліворуч і праворуч, його часто опускають і систему записують так:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= A_d X(k) + B_d U(k), \\ Y(k) &= CX(k) + DU(k). \end{aligned} \quad (2.8)$$

За відомою матрицею A_d дискретної системи можна визначити матрицю безперервної системи, логарифмуючи обидві частини рівняння (2.5). При цьому слід мати на увазі, що (2.5) слід застосовувати матричний експоненціал, а для зворотного перетворення – матричний логарифм.

У разі неособливої матриці A безперервної системи рівняння (2.7) можна дозволити щодо матриці у вигляді

$$B = \left(A^{-1}(e^{AT} - E) \right)^{-1} B_d = \left(A^{-1}(A_d - E) \right)^{-1} B_d. \quad (2.9)$$

Для досить малих значень кроку квантування T можна скористатися наступною наближеною формулою:

$$B = \frac{B_d}{T}.$$

Таким чином, оцінка матриць A та B безперервної системи (2.3) здійснюється через оцінку відповідних матриць дискретної системи (2.3). При цьому існують універсальніші методи перетворення дискретної системи до безперервної [13, 19].

Систему дискретних рівнянь запишемо у вигляді скалярних рівнянь:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= a_{d11}x_1(k) + a_{d12}x_2(k) + \dots + a_{d1n}x_n(k) + b_{d11}u_1(k) + \dots + b_{d1r}u_r(k), \\ x_2(k+1) &= a_{d21}x_1(k) + a_{d22}x_2(k) + \dots + a_{d2n}x_n(k) + b_{d21}u_1(k) + \dots + b_{d2r}u_r(k), \\ &\dots\dots\dots \\ x_i(k+1) &= a_{di1}x_1(k) + a_{di2}x_2(k) + \dots + a_{din}x_n(k) + b_{di1}u_1(k) + \dots + b_{dir}u_r(k), \\ &\dots\dots\dots \\ x_n(k+1) &= a_{dn1}x_1(k) + a_{dn2}x_2(k) + \dots + a_{dnn}x_n(k) + b_{dn1}u_1(k) + \dots + b_{dnr}u_r(k). \end{aligned} \quad (2.10)$$

До завдання входить оцінка (ідентифікація) параметрів

$$a_{dij}, b_{diq}, s, j = \overline{1, n}, q = \overline{1, r}.$$

Запишемо проміжне рівняння:

$$x_i(k+1) = a_{di1}x_1(k) + a_{di2}x_2(k) + \dots + a_{din}x_n(k) + b_{di1}u_1(k) + \dots + b_{dir}u_r(k). \quad (2.11)$$

У ході експерименту потрібно запам'ятати g рішень $u(k)$, $x(k)$, $x(k+1)$ для ідентифікації параметрів дискретної системи, причому $g \geq n^2 + (rn) + 1$ [17].

Система рівнянь (2.10) отримує свої рішення внаслідок подачі на неї певних вхідних сигналів (керуючих дій). Для перевірки того, наскільки побудована модель здатна точно відтворювати або передбачати результати спостережень, необхідно провести їх порівняння за однакових умов впливу. Цей процес називається верифікацією моделі [8,17].

Складемо матрицю W_{ik} з елементів $x(k)$, $u(k)$ розмірністю $(n+r)*1$. Ця матриця буде сукупністю вхідних впливів і виходу системи на момент дискретного часу k :

$$W_{ik} = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k), u_1(k), u_2(k), \dots, u_r(k)]^T. \quad (2.12)$$

Складемо матрицю Φ_i з шуканих коефіцієнтів рівняння (2.10)

$$\Phi_i^T = [a_{di1}, a_{di2}, \dots, a_{din}, b_{di1}, b_{di2}, \dots, b_{dir}]_{1 \times (n+r)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.13)$$

З урахуванням (2.5-2.6) запишемо рівняння у матричному вигляді

$$x_i(k+1) = W_{ik}^T \Phi_i. \quad (2.14)$$

Сформуємо вектор χ_i із елементів правої частини рівняння (2.12) після g випробувань (значень, рішень, спостережень):

$$\chi_i = \begin{bmatrix} x_{(1)i}(k+1) \\ x_{(2)i}(k+1) \\ \vdots \\ x_{(g)i}(k+1) \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Виразимо χ_i через W_{ik} , Φ_i , отримаємо $\chi_i = W_{ik} \Phi_i$,

де

$$W_k = \begin{bmatrix} x_{(1)1}(k) & x_{(1)2}(k) & \dots & x_{(1)n}(k) & u_{(1)1}(k) & \dots & u_{(1),r}(k) \\ x_{(2)1}(k) & x_{(2)2}(k) & \dots & x_{(2)n}(k) & u_{(2)1}(k) & \dots & u_{(2),r}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{(g)1}(k) & x_{(g)2}(k) & \dots & x_{(g)n}(k) & u_{(g)1}(k) & \dots & u_{(g),r}(k) \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Розмірність матриці W_k дорівнює $g \times (n+r)$.

2.2 Параметрична ідентифікація моделей

Параметрична ідентифікація моделей об'єктів дозволяє безпосередньо визначати значення коефіцієнтів моделі об'єкта на основі вимірних значень вихідного сигналу y і вхідного керуючого сигналу u . При цьому передбачається, що структура і порядок моделі об'єкта вже відомі. Вимірювання y та u представляються у вигляді часового ряду, завдяки чому в процесі ідентифікації знаходяться параметри АРСС-моделі об'єкта або параметри його дискретної передавальної функції. Володіючи коефіцієнтами АРСС-моделі та її структурою,

можна перейти до безперервних структурованих моделей або до моделей у просторі станів.

У задачах параметричної ідентифікації використовуються моделі об'єкта з урахуванням шумів вимірювання, які задаються через передавальні функції. При заданих порядках моделей завдання параметричної стохастичної ідентифікації системи зводиться до оцінювання коефіцієнтів поліномів моделі A , B , C і D на основі вимірних значень вхідного сигналу $u(t)$ та вихідного сигналу $y(t)$. Властивості одержуваних оцінок залежать від характеристик зовнішніх обурень та методу ідентифікації, при цьому істотну роль грає вигляд закону розподілу зовнішніх збурень.

Однією з важливих переваг методів параметричної ідентифікації є можливість застосування рекурентних алгоритмів, які дозволяють виконувати поточну ідентифікацію в режимі реального часу при номінальних умовах роботи об'єкта. Ці переваги зумовили широке впровадження методів параметричної ідентифікації в задачах управління та автоматизації.

До таких методів належать метод найменших квадратів, метод максимального правдоподібності та метод стохастичної апроксимації. Підставимо в рівняння АРСС-моделі значення сигналів $y(k)$ та $u(k)$, а також оцінки параметрів об'єкта, отримані на попередньому $(k - 1)$ -му такті [22]:

$$y(k) + a_1 y(k - 1) + \dots + a_n y(k - n) - b_1 y(k - d - 1) - \dots - b_m y(k - d - m) = e(k) \quad (2.17)$$

У цьому рівнянні нуль у правій частині (що утворюється при перенесенні всіх доданків у ліву частину) замінено величиною помилки $e(k)$. Ця помилка відображає наявність похибки вимірювань виходу та неточність оцінок параметрів моделі a_i та b_i . Позначимо значення $y(k)$ як значення $y(k/k - 1)$, пересказане в останній момент $(k - 1)$ на даний момент k . Тоді

$$y\left(\frac{k}{k} - 1\right) = -a_1 y(k - 1) - \dots - a_n y(k - n) + b_1 u(k - d - 1) + b_m u(k - d - m) \quad (2.18)$$

або

$$y(k/k-1) = \Psi^T(k) \hat{\theta}(k-1), \quad (2.19)$$

де $\hat{\theta}(k-1) = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]$ – вектор оцінок; $\Psi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-d-1), \dots, u(k-d-m)]$ – вектор даних; d – величина дискретного запізнення.

Помилка рівняння $e(k)$ матиме вигляд

$$e(k) = y(k) - y(k/k-1), \quad (2.20)$$

де $y(k)$ – новий вимір; $y(k/(k-1))$ – передбачене значення виміру.

Розглянемо випадок, коли виміри зроблені на інтервалі $k = 1, 2, \dots, n + d + N$, а порядок АРСС-моделі (n, n) . Тоді на підставі (2.19) та (2.20) одержимо векторно-матричне рівняння наступного виду:

$$\mathbf{y}(k) = \Psi^T(k) \hat{\theta}(k-1) + \mathbf{e}(k), \quad (2.21)$$

де $\mathbf{y}(k) = [y(n+d), y(n+d+1), \dots, y(n+d+N)]$ – вектор виходу;

$$\Psi^T(k) = \begin{bmatrix} -y(n+d-1) & \dots & -y(d) & u(n-1) & \dots & u(0) \\ -y(n+d) & \dots & -y(d+1) & u(n) & \dots & u(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y(m+d+N-1) & \dots & -y(n+d) & u(n+N-1) & \dots & u(N) \end{bmatrix}$$

– матриця даних;

$\mathbf{e}(m+d+N) = [e(n+d), e(n+d+1), \dots, e(n+d+N)]$ – вектор помилок.

Функція втрат за критерієм найменших квадратів (МНК) визначається як квадрат похибки, що у векторному вигляді має наступний вираз.

$$J = \mathbf{e}^T [n+d+N] \mathbf{e} [n+d+N] = \sum_{k=n+d}^{n+d+N} e^2(k), \quad (2.22)$$

а її мінімум знаходиться з умови

$$\left. \frac{dJ}{d\theta} \right|_{\theta=\hat{\theta}} = 0. \quad (2.23)$$

Вважаючи, що $N \geq 2n$, позначимо

$$\mathbf{P}(n+d+N) = [\Psi^T(n+d+N) \Psi(n+d+N)]^{-1}, \quad (2.24)$$

тоді оцінка, що мінімізує функцію втрат, матиме вигляд:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(n+d+N) = \mathbf{P}(n+d+N)\boldsymbol{\Psi}^T(n+d+N)\mathbf{y}(n+d+N). \quad (2.25)$$

Якщо вектор χ_i і матриця W_k відомі (вхідні та вихідні сигнали), використовується рекурентний метод найменших квадратів (МНК) [21].

Рекурентний алгоритм методу найменших квадратів знаходять шляхом віднімання нової $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)$ та старої $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ оцінок:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) + \gamma(k)[y(k+1) - \boldsymbol{\Psi}^T(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)]. \quad (2.26)$$

Вектор корекції визначають з наступного виразу:

$$\gamma(k) = \frac{\mathbf{P}(k)\boldsymbol{\Psi}(k+1)}{\boldsymbol{\Psi}^T(k+1)\mathbf{P}(k)\boldsymbol{\Psi}(k+1) + 1}. \quad (2.27)$$

А вектор $\mathbf{P}(k+1)$ на наступному кроці визначають:

$$\mathbf{P}(k+1) = [\mathbf{I} - \gamma(k)\boldsymbol{\Psi}^T(k+1)]\mathbf{P}(k). \quad (2.28)$$

Рекурентний алгоритм МНК можна представити таким чином:

- Задаються початкові значення вектора оцінок параметрів моделі:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) = 0; P(0) = \alpha I$$

де I – одинична матриця відповідної розмірності, α – досить велика кількість.

- Виконують вимірювання вхідного та вихідного сигналів об'єкта й формують новий вектор даних $\boldsymbol{\Psi}(k+1)$.

- Визначають вектор корекції $\gamma(k)$ за формулою (2.27)
- Знаходять нову оцінку параметрів $\boldsymbol{\theta}(k+1)$ за формулою (2.26)
- Визначають вектор $\mathbf{P}(k+1)$ за формулою (2.28)

Відповідно до застосування рекурентним МНК отримаємо наступне нормальне рівняння щодо параметрів рівняння (2.11)

$$(W_k^T W_k)\hat{\boldsymbol{\Phi}}_i = W_k^T \chi_i. \quad (2.29)$$

Якщо матриця $W_k^T W_k$ не вироджена, оптимальна оцінка параметрів дискретна система визначається у вигляді

$$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_i^* = (W_k^T W_k)^{-1} W_k^T \chi_i. \quad (2.30)$$

Знаючи Φ_i^* для всіх індексів $i = \overline{1, n}$ можна знайти коефіцієнти системи рівнянь, тобто матриці A_d , B_d , а потім матриці A , безперервної системи.

Розрахунок вектора стану дискретної системи можна зробити за співвідношенню.

$$X(kT) = A_d^k X(0) + \sum_{j=0}^{k-1} A_d^{k-1-j} B_d U(j), \quad (2.31)$$

де $X(0)$ – початковий вектор стану системи в момент часу, що дорівнює нулю[8].

Для регресійної оцінки матриць рівняння виходу C і D використовуються ті ж способи та прийоми, які були описані для оцінки матриць A та B . У разі невироджена матриця $W_k^T W_k$ одночасна оцінка матриць C і D може бути отримана за допомогою матричного рівняння наступного виду:

$$\overline{CD} = \left((W_k^T W_k)^{-1} W_k^T Y_k \right)^T, \quad (2.32)$$

де

$$\overline{CD} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} & d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1r} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} & d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} & d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mr} \end{bmatrix},$$

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y_{(1)1}(k) & y_{(1)2}(k) & \dots & y_{(1)m}(k) \\ y_{(2)1}(k) & y_{(2)2}(k) & \dots & y_{(2)m}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{(g)1}(k) & y_{(g)2}(k) & \dots & y_{(g)m}(k) \end{bmatrix}.$$

2.3 Комп'ютерне моделювання

На основі експериментальних даних про вхідні та вихідні значення реалізована програма в середовищі Matlab. У процесі її виконання обчислено коефіцієнти матриць для створення моделі управління (таблиці 2.7–2.11).

Таблиця 2.7 - Матриця станів Ad

0,049238853156567	-0,005887272767723	0,004370675422251
0,005464687943459	0,005470560863614	0,000798127613962
0,076393127441406	0,985426902770996	0,007271051406860
0,009318828582764	0,008452892303467	0,001263976097107
0,004384897649288	-0,000011278316379	0,000389477005228
0,000487083569169	0,000487155048177	0,000071089423727
0,005461048334837	0,000213344581425	0,000485175289214
0,000606816029176	0,000606706365943	0,000088542234153
0,005384870804846	-0,000669391825795	0,000477974041132
0,000597608624958	0,000598273763899	0,000087284359324
0,000789555138908	-0,000067150482209	0,000070098030847
0,000087650390924	0,000087720633019	0,000012798838725

Таблиця 2.8 - Власні числа матриці станів Ad

0,98494126324815
0,05133185929324
-0,00000000093104
-0,0000000024877
0,00000000020780
-0,00000000000479

Таблиця 2.9 – Матриця виходу С

0,003060696443684	1,080678084342132	0,000827541243522
0,001276633732503	0,000307087790087	0,000078561598951

Таблиця 2.10 – Матриця обходу D

0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---

Таблиця 2.11 – Матриця входу Вd

0,047190155833960	0,008847923949361	0,002949372632429
0,206532940268517	0,010325928218663	0,041303712874651
0,078910827636719	0,014769554138184	0,004927515983582
0,346374511718750	0,017246246337891	0,068984985351563
0,004205394536257	0,000788476550952	0,000262833782472
0,018405877053738	0,000920193735510	0,003680774942040
0,005238803103566	0,000982225872576	0,000327419489622
0,022929042577744	0,001146310009062	0,004585240036249
0,000756859662943	0,000141906813951	0,000047303394240
0,003312505781651	0,000165611854754	0,000662447419018

Побудовано графіки вихідних значень (рис. 2.2–2.7), що відображають зміну контрольованих характеристик під час спостереження.

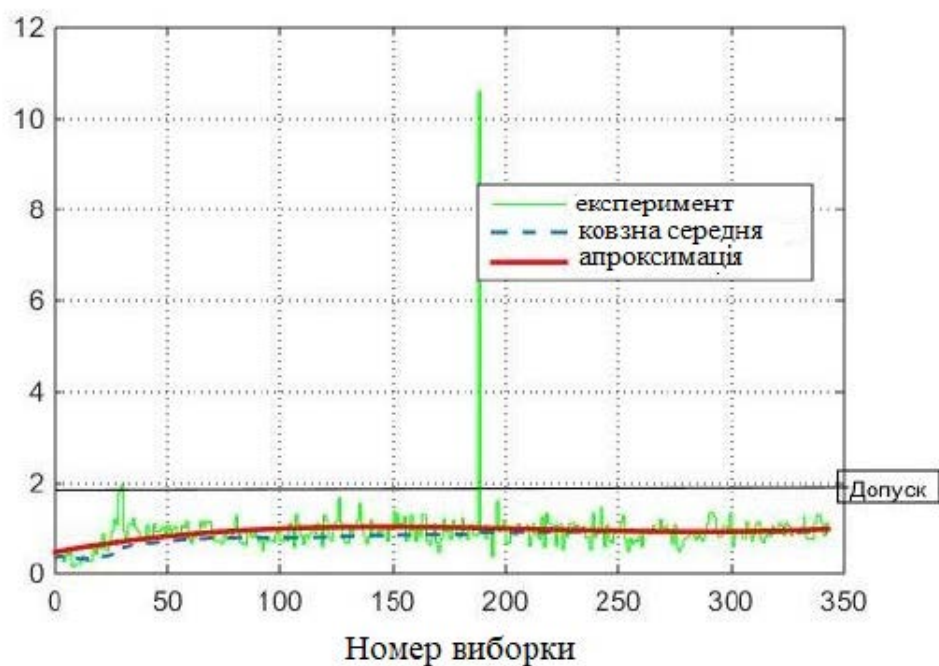


Рисунок 2.2 – Вихідні значення характеристики «Відсотковий вміст CaO »

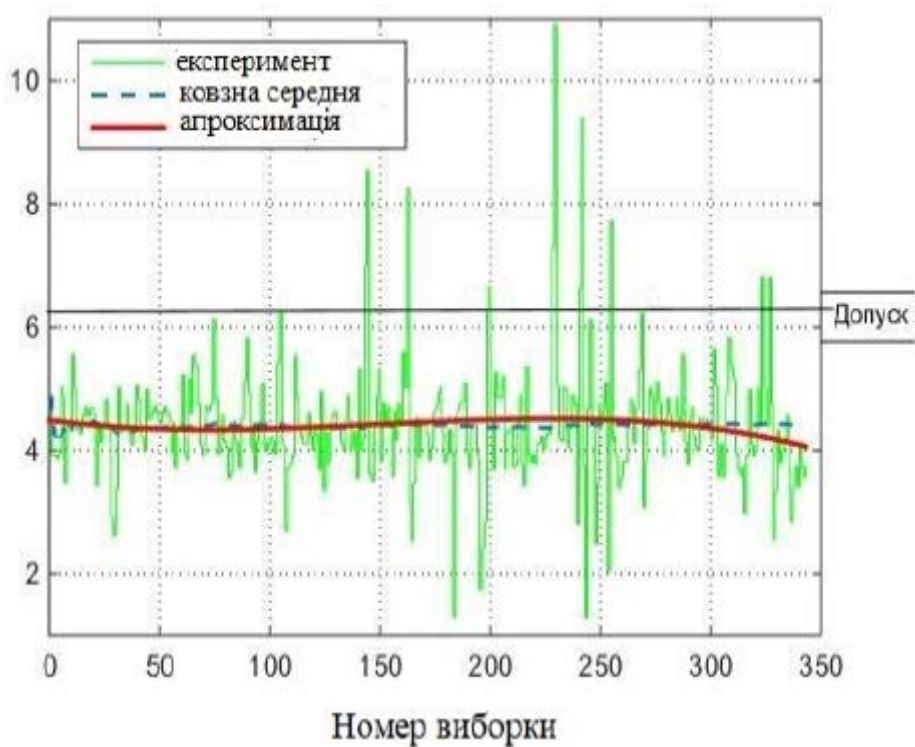


Рисунок 2.3 – Вихідні значення характеристики «Відсотковий вміст
опоки»

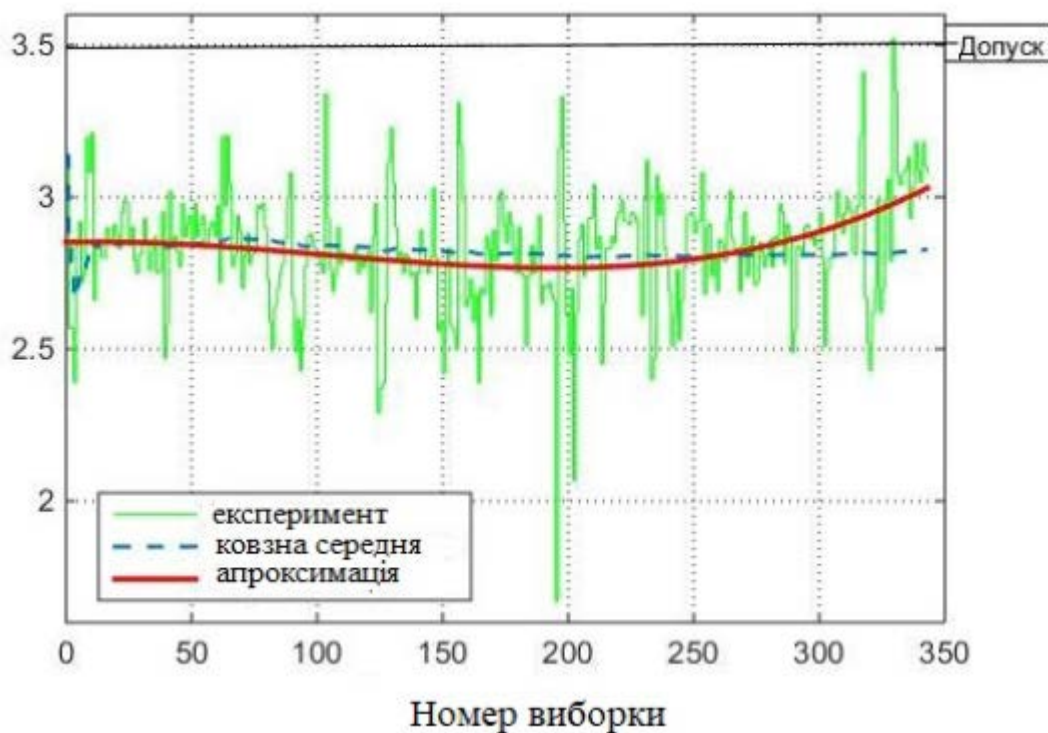


Рисунок 2.4 – Вихідні значення характеристики «Відсотковий вміст SO_3 »

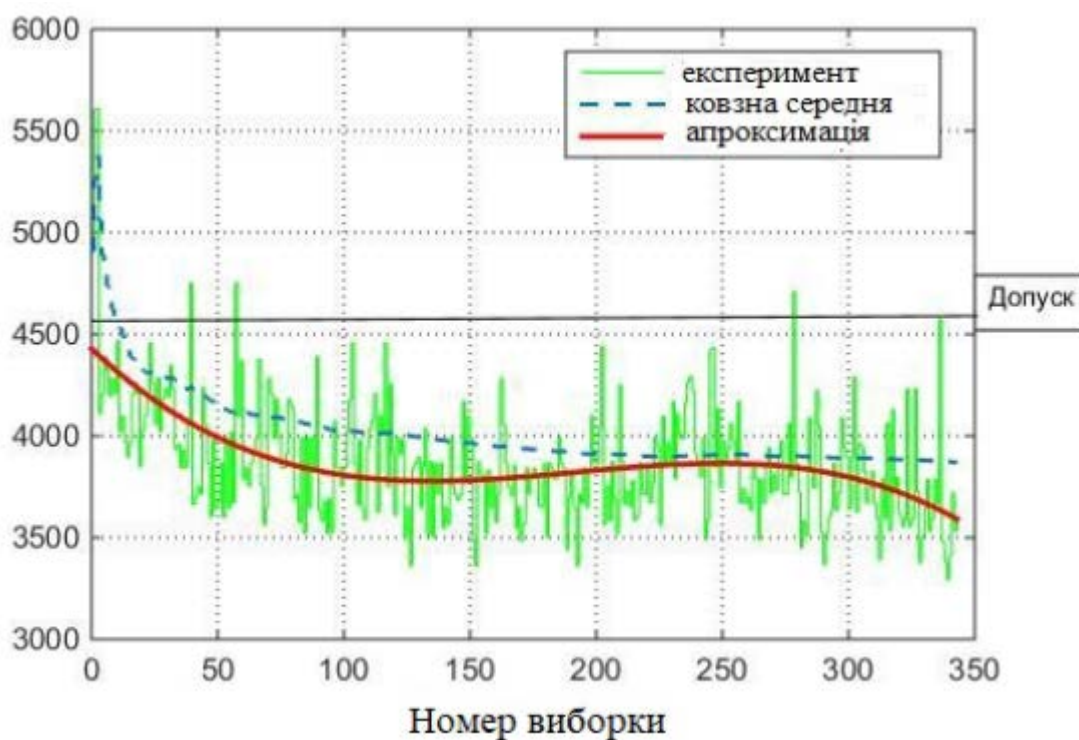


Рисунок 2.5 – Вихідні значення характеристики «Питома поверхня цементу»

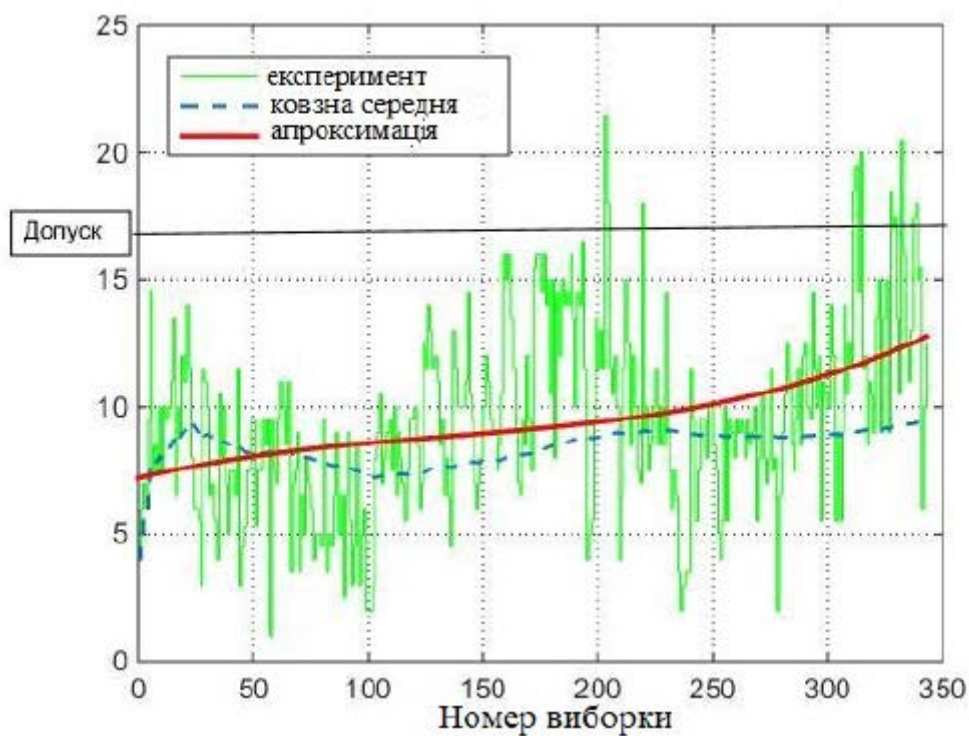


Рисунок 2.6 – Вихідні значення характеристики «Тонкість помелу»

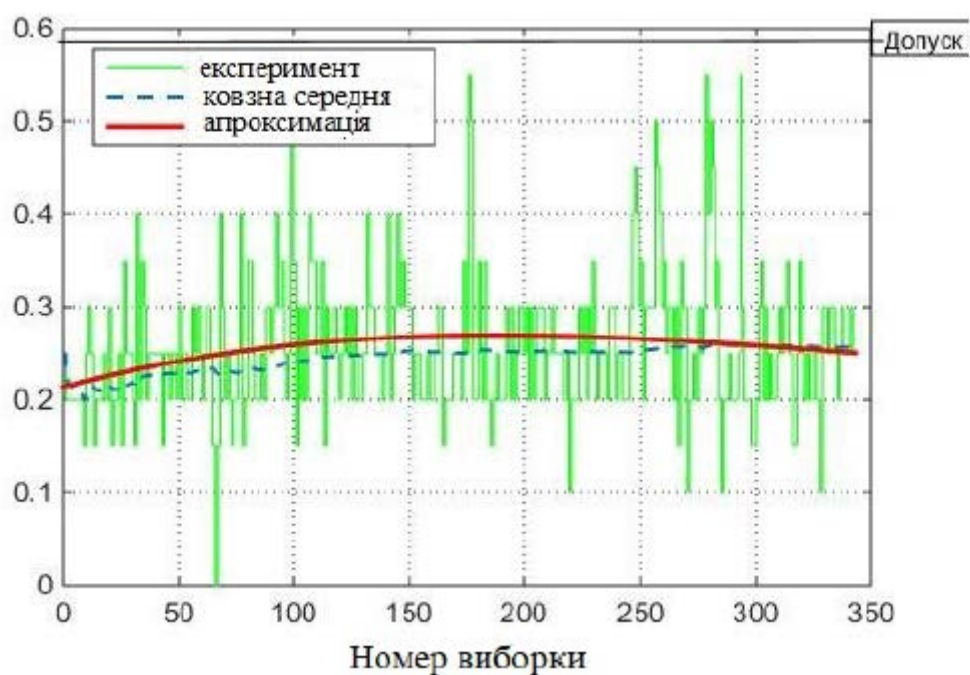


Рисунок 2.7 – Вихідні значення характеристики «Вологість»

Обчислена передавальна функція:

$$wod(z) = \frac{0,01828z^2 - 0,1393z}{z^2 - 0,4482z - 0,2883}$$

В ході виконання алгоритму РМНК побудовані графіки, що відображають різні характеристики об'єкта (рисунки 2.8–2.16).

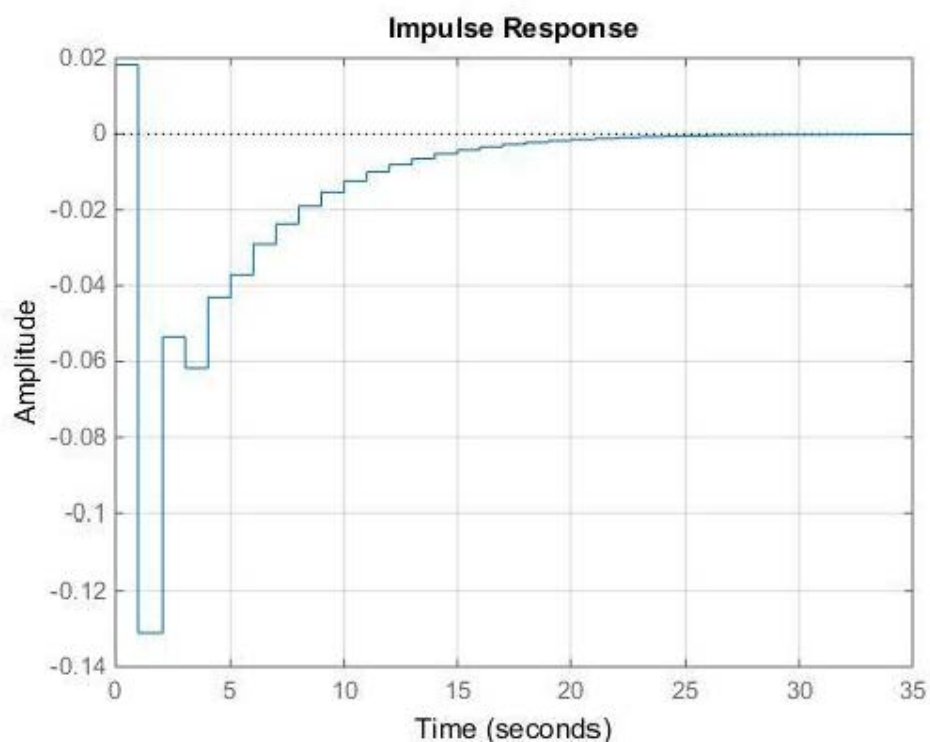


Рисунок 2.8 – Функція ваги об'єкта (1) і моделі (2)

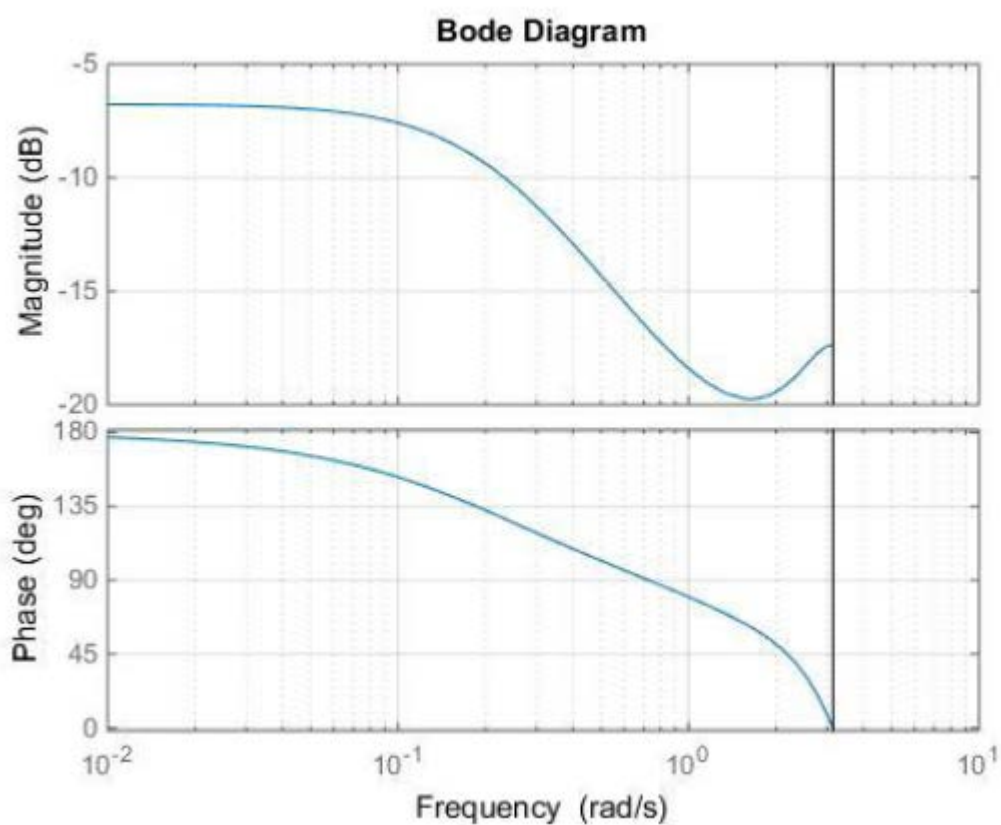


Рисунок 2.9 – Фазо-частотні характеристики об'єкта (1) і моделі (2)

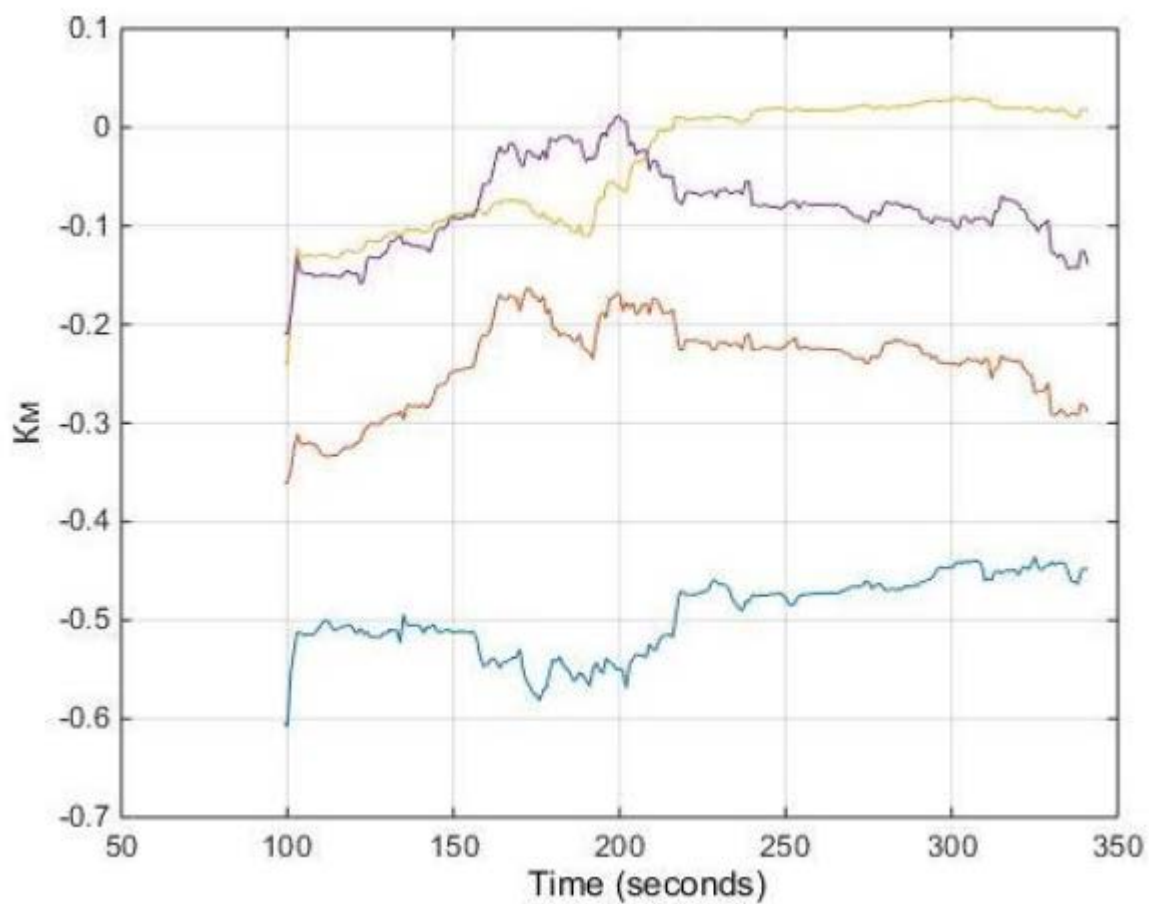


Рисунок 2.10 – Зміна коефіцієнтів АРСС-моделі

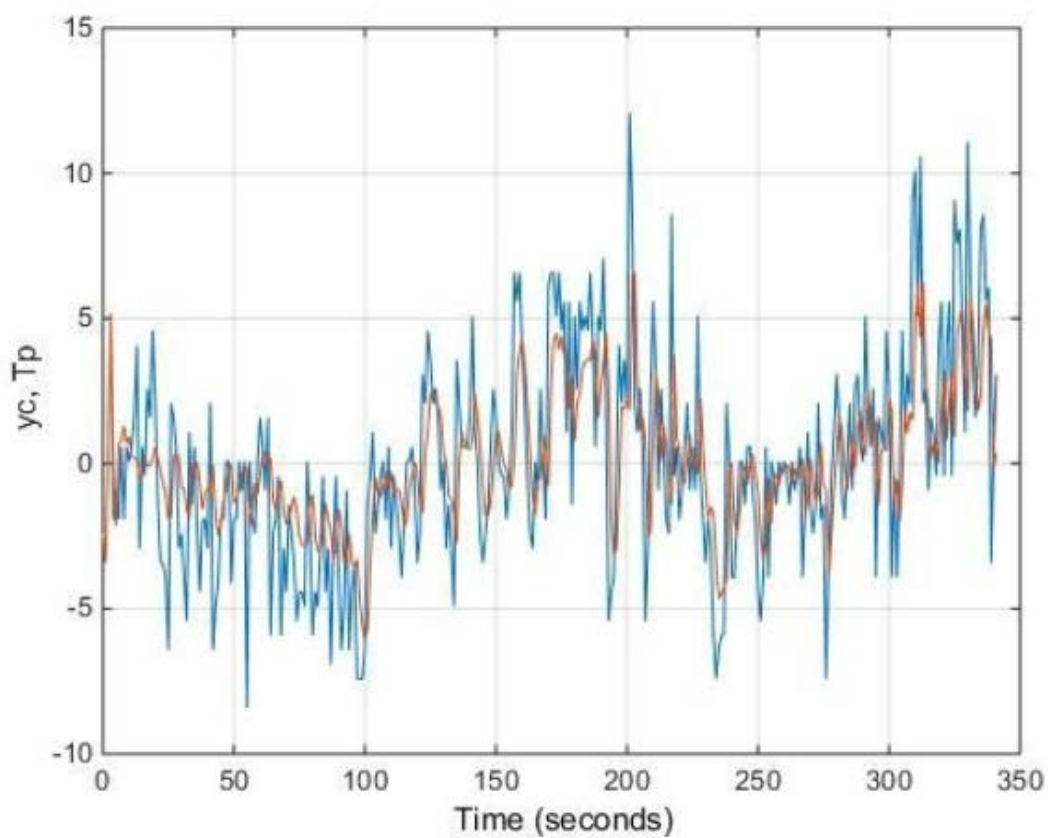


Рисунок 2.11 – Вихідні значення характеристики моделювальної системи

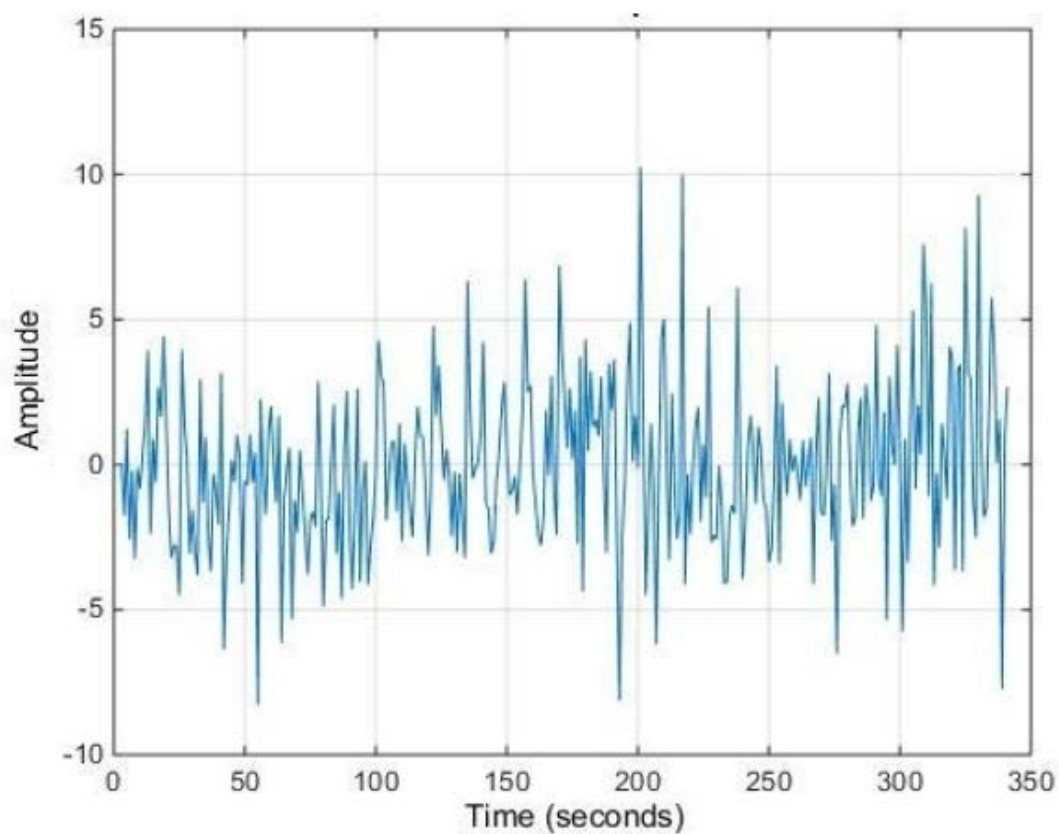


Рисунок 2.12 – Помилка моделювання системи

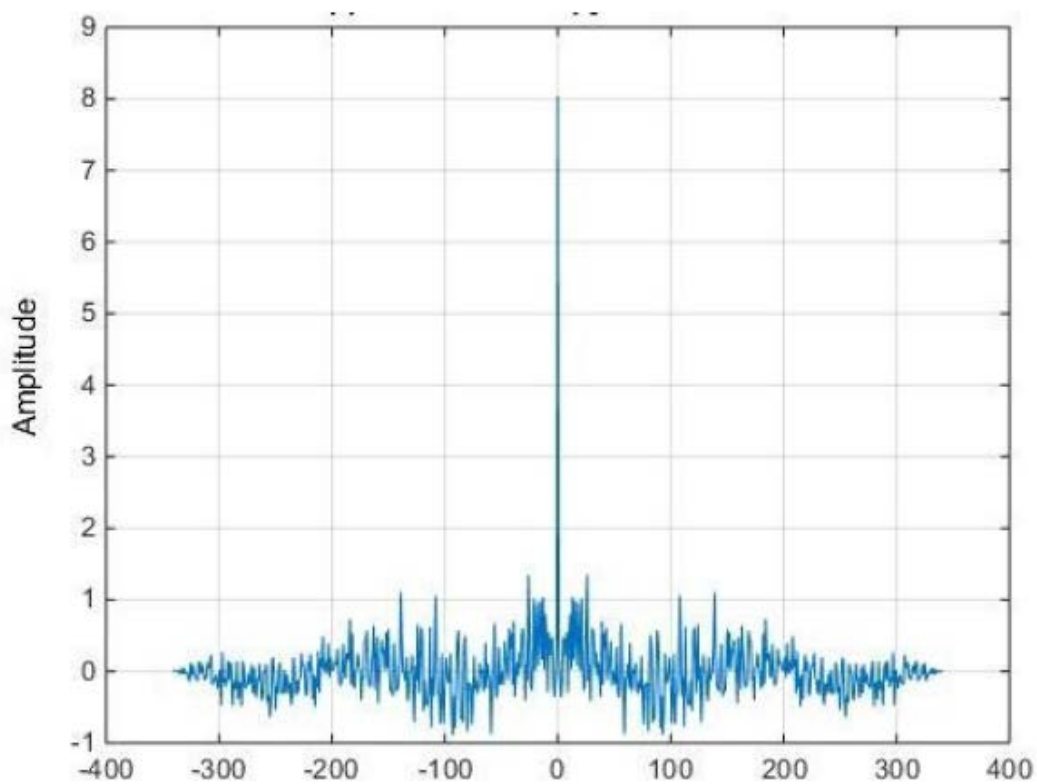


Рисунок 2.13 – Кореляційна функція помилки

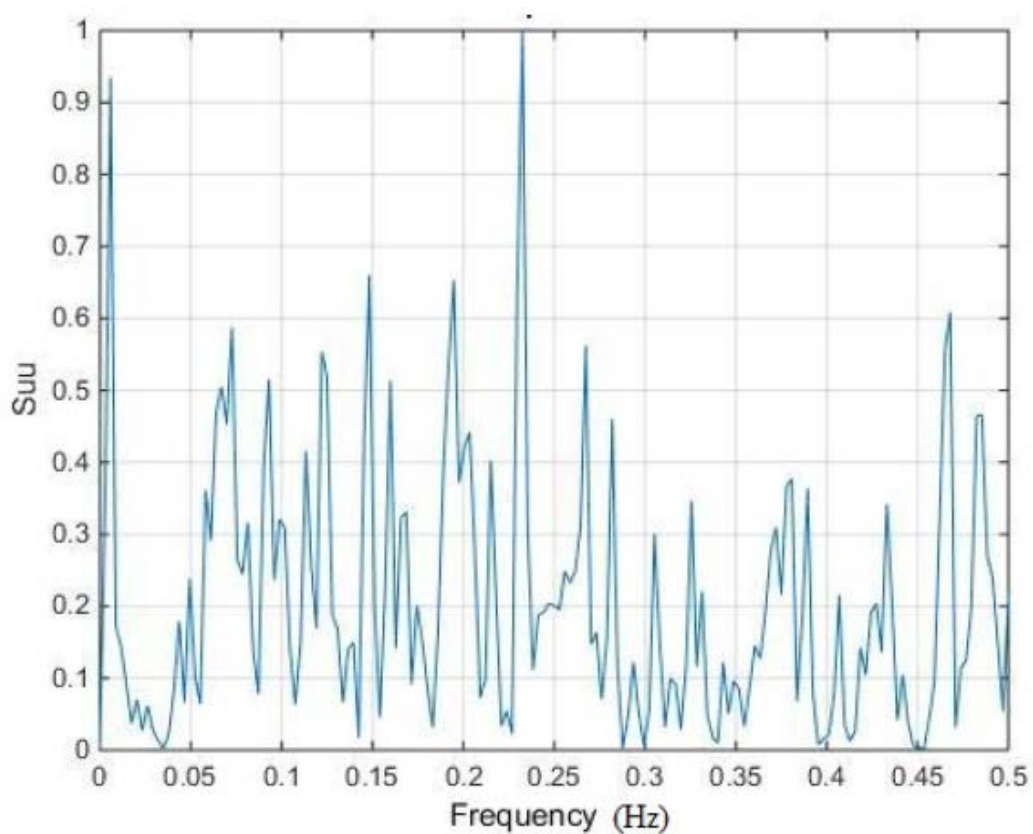


Рисунок 2.14 – Спектр помилки

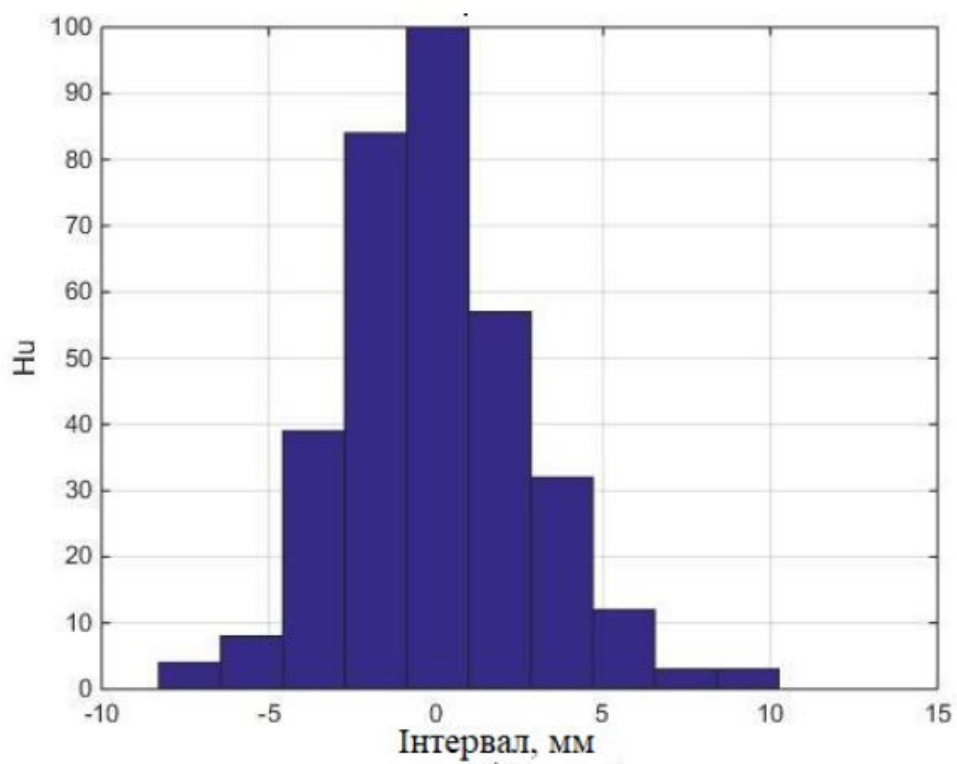


Рисунок 2.15– Гістограма помилки

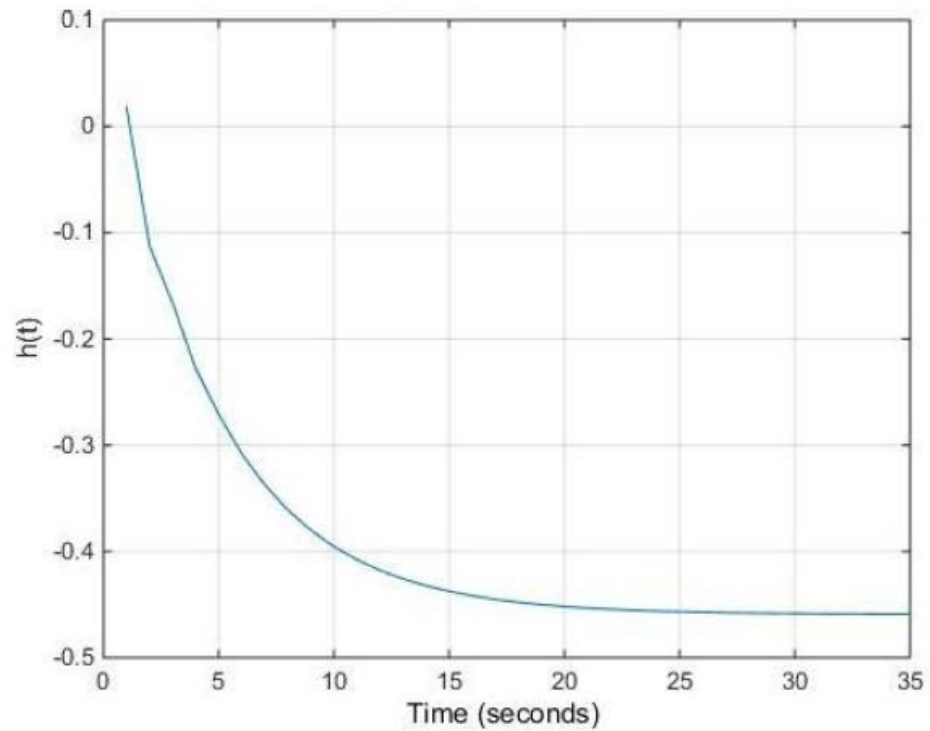


Рисунок 2.16– Перехідна характеристика моделювальної системи

Змодельовано динаміку виходу системи на продуктивність в 40 т цементу на годину. При повному завантаженні млина матеріалом йому потрібно 0,45 години для досягнення необхідного рівня виробництва цементу. Обчислено час реакції системи на дію оператора – $T=0,08$ години (приблизно 5 хвилин)."

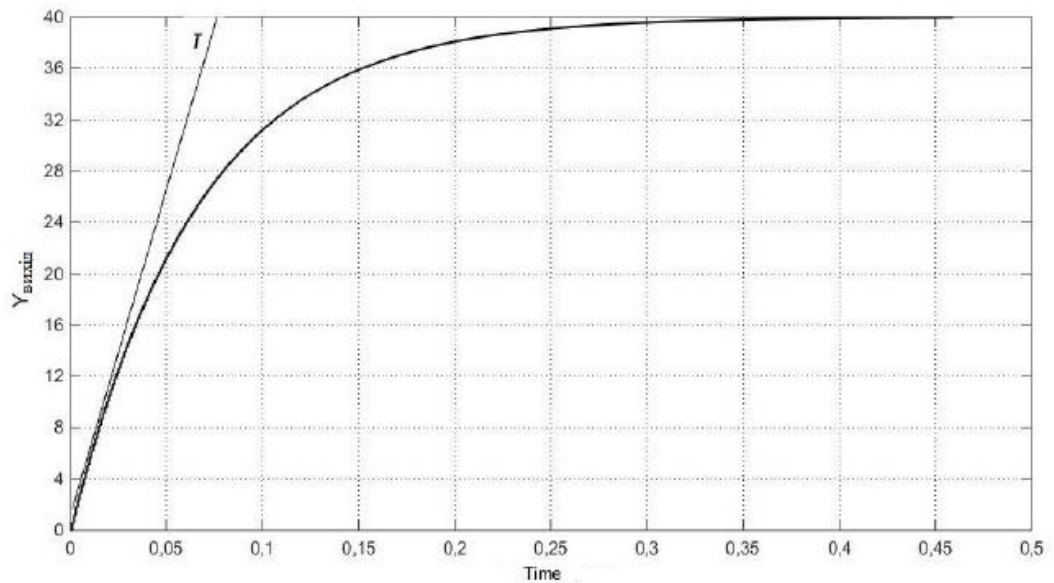


Рисунок 2.17– Динаміка виходу системи на виробничу потужність

На даний момент у разі випуску неякісної продукції оператор зупиняє дозування сировини, а отриманий цемент іде в брак. Після очищення барабана цементного млина (10 год) оператор знову запускає систему на повну потужність. Проте проби виготовленого цементу надсилаються в лабораторію з інтервалом часу 3 год. Через це неможливо здійснювати управління якістю помелу цементу за допомогою зворотного зв'язку, оскільки різниця в періодах взяття проб і реакції системи складає більше 3 год.

2.4 Перевірка статистичної вибірки на нормальний розподіл

Контрольовані параметри не пов'язані між собою в своєму фізичному (технічному) сенсі, тобто є незалежними. Статистично цей факт відбивається у відсутності кореляції між вимірюваними величинами (рис. 2.18-2.21). Таким чином, при відсутності кореляції між статистичними даними можна зробити висновок, що для статистичної оцінки виробничих параметрів якості цементу найбільшою ефективністю в порівнянні з іншими статистичними методами володіє метод Шухарта, який найбільш підходить для роботи з некореляційними, незалежними даними.

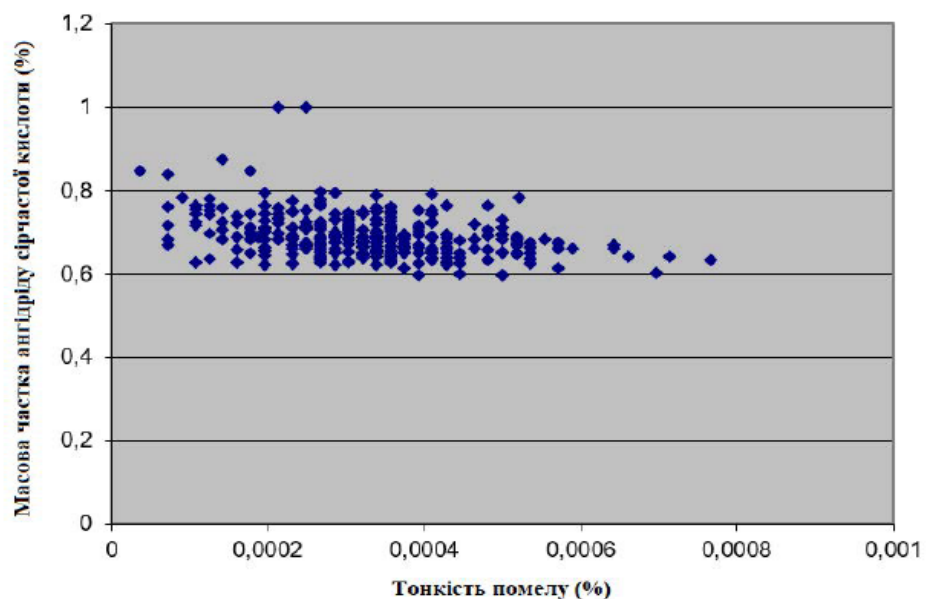


Рисунок 2.18 – Перевірка взаємної кореляції між точністю помелу і вмістом сірчаного ангідриду

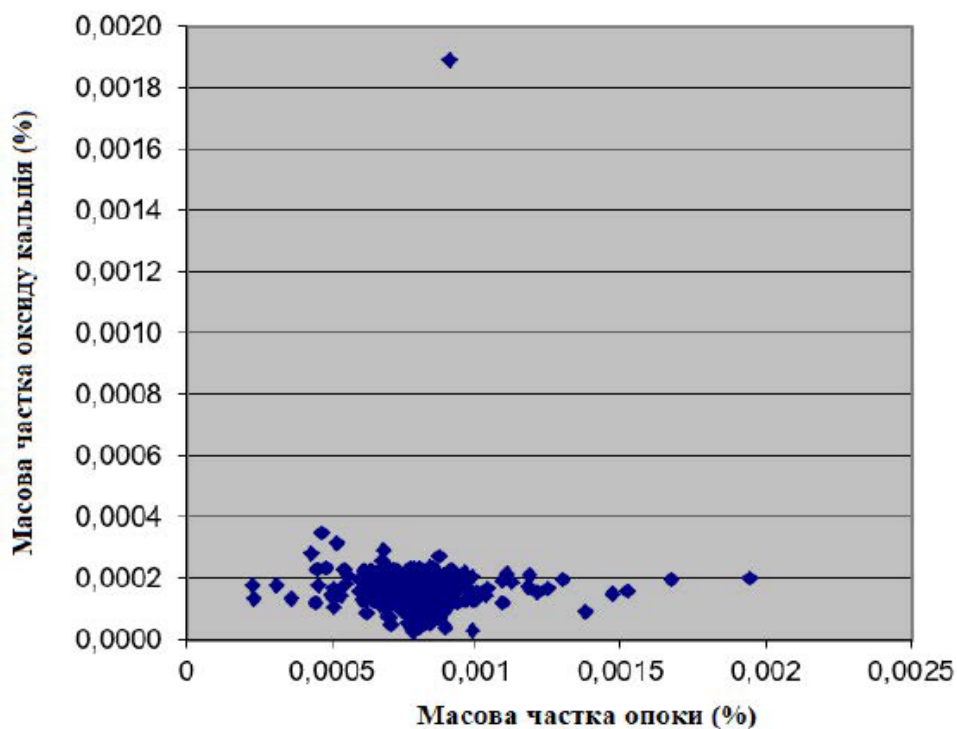


Рисунок 2.19 – Перевірка на взаємне співвідношення оксиду кальцію і оксиду кремнію

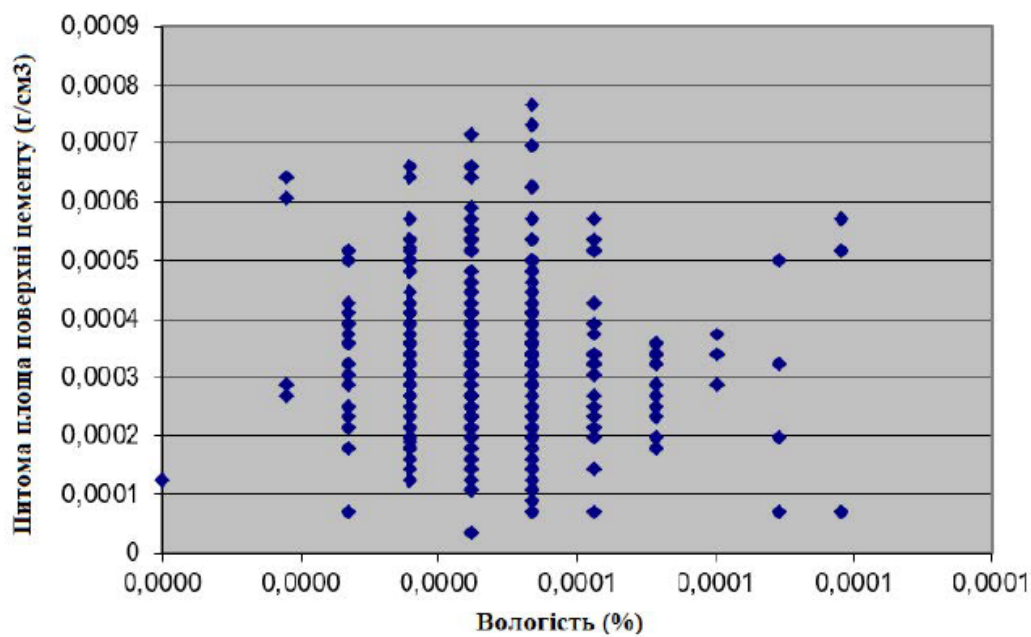


Рисунок 2.20 – Перевірка на взаємну кореляцію між величиною питомої площі поверхні цементу і вологістю

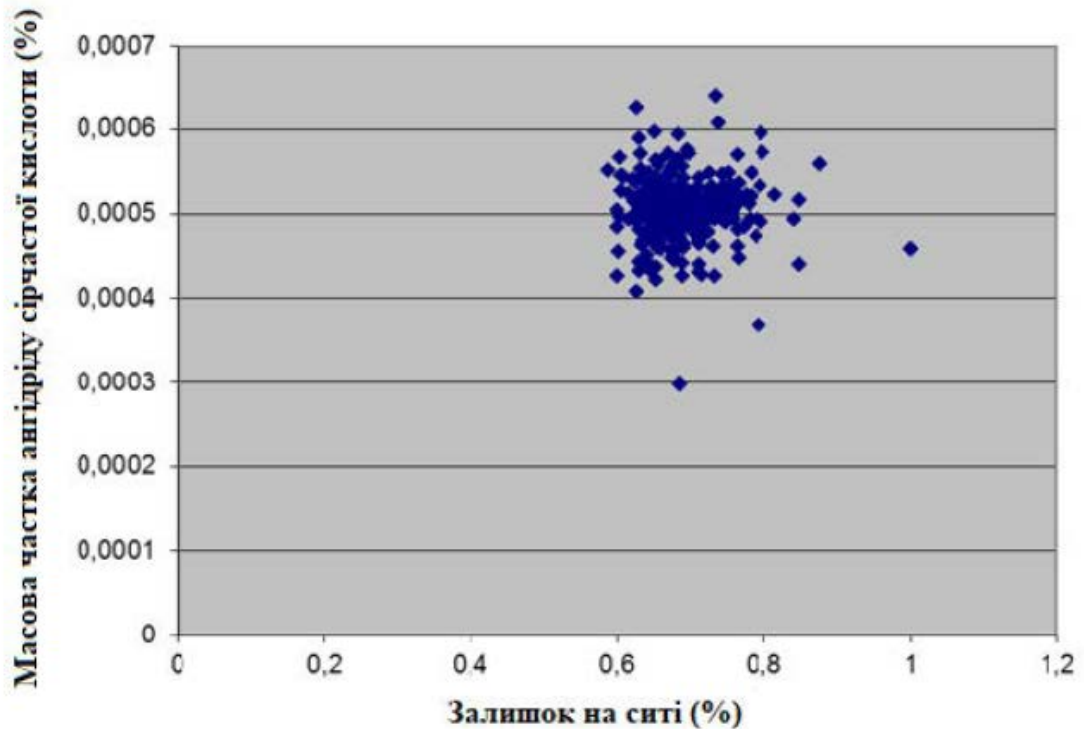


Рисунок 2.21 – Перевірка на взаємне співвідношення сірчаного ангідриду і параметра, що характеризує залишок на ситі

Крім графічної перевірки на взаємну кореляцію, були розраховані коефіцієнти кореляції Пірсона і рівні статистичної значущості для всіх пар керованих технологічних параметрів:

$$R_p = \frac{n \times \sum(x_i - y_i) - (\sum x_i \times \sum y_i)}{\sqrt{n \times \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \times n \times \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2.33)$$

Значення коефіцієнтів не перевищують 0,2 і свідчать про слабкий рівень кореляції.

Питома площа поверхні цементу/ Процентний вміст SO ₃		Процентний вміст SO ₃ / Питома площа поверхні цементу	
R _p = 0,12293	V _p = 0,02239	R _p = -0,02841	V _p = 0,59896
Питома площа поверхні цементу/ Процентний вміст опоки		Процентний вміст SO ₃ / Процентний вміст опоки	
R _p = -0,18689	V _p = 0,07811	R _p = -0.06397	V _p = 0,23597

Питома площа поверхні цементу/ Процентний вміст CaO		Процентний вміст SO ₃ / Процентний вміст CaO	
R _p = -0,06943	V _p = 0,19829	R _p = -0.06397	V _p = 0,23597
Питома площа поверхні цементу/ Вологість		Процентний вміст: SO ₃ / Вологість	
R _p = 0,07195	V _p = 0,56376	R _p = 0,07195	V _p = 0,18241
Процентний вміст опоки/ Процентний вміст SO ₃		Процентний вміст CaO/ Процентний вміст SO ₃	
R _p = 0.01701	V _p = 0,75288	R _p = 0.01701	V _p = 0,75288
Процентний вміст опоки/ Процентний вміст CaO		Процентний вміст CaO/ Процентний вміст опоки	
R _p = -0.04845	V _p = 0,36959	R _p = 0.01891	V _p = 0,72628
Процентний вміст опоки/ Вологість		Процентний вміст CaO/ Вологість	
R _p = 0,15835	V _p = 0.08319	R _p = -0.01416	V _p = 0,79329
Вологість/ Процентний вміст SO ₃		Вологість/ Процентний вміст CaO/	
R _p = -0.06397	V _p = 0,23597	R _p = 0.01891	V _p = 0,72628

Аналіз графіків зміни керованих характеристик (рис. 2.2 – 2.7) показує, що максимальна різниця між значеннями графіків ковзних середніх та інтерполяцією шліцами на початку технологічного процесу становить менше 10%, але в період між 200 та 350 технологічними зразками крива ковзної середньої фактично залишається незмінною, що свідчить про відсутність тренду, тобто про закономірну зміну показників.

Результати лабораторного аналізу є послідовностями незалежних величин, тобто кореляції між ними немає. У той же час необхідно підготувати дані для подальшого використання в статистичних дослідженнях.

Як уже зазначалося, ключовим моментом є застосування статистичного апарату за методиками Шухарта (а також Хотеллінга) контрольних діаграм гіпотеза про нормальний розподіл статистичних послідовностей, що використовується як область визначення. Тому першим кроком в обробці даних буде перевірка загальної вибірки на нормальний розподіл [15].

Результатом дослідження є висновок про те, що «загальним недоліком всіх розглянутих критеріїв є залежність розподілів статистичних даних від обсягів вибірки і невизначеність аналітичних розподілів статистичних даних. В результаті при прийнятті рішення про результати перевірки гіпотези необхідно орієнтуватися на значення процентних пунктів, неможливо оцінити досягнутий рівень значущості, важко судити про ступінь відповідності або невідповідності спостережуваної вибірки нормальному закону» [14]. Як показує практика, єдиним кроком до поліпшення ситуації може стати збільшення загальної вибірки.

Виходячи з вивчення властивостей критеріїв по відношенню до конкуруючих гіпотез H_1 , H_2 , H_3 , ці критерії можна ранжувати по ефективності за даними [12, 13] наступним чином: Гірі \rightarrow Шпігельгальтер \rightarrow Хегазі – Грін \rightarrow Еппса – Паллі \rightarrow Хартлі – Пірсон \rightarrow Шапіро – Уїлка \rightarrow Фросіні. Однак необхідно враховувати і деякі недоліки критеріїв найбільш сильних критеріїв [15]:

- критерій Шпігельгальтера не здатний відрізнити конкуруючі гіпотези типу H_1 від початкової гіпотези, що перевіряється;
- критерій Хегазі-Гріна при малих розмірах вибірки через упередженість також не здатний відрізнити конкуруючу гіпотезу виду H_1 від перевіряється гіпотези H_0 ;
- критерій Хегазі-Гріна зі статистичними даними при невеликих розмірах вибірки, а також критерії Шапіро-Уїлка і Еппса-Паллі також дещо упереджений щодо конкуруючої гіпотези типу H_1 .

Надалі при перевірці загальної вибірки за характером розподілу будемо використовувати критерії Гірі, Шпігельгальтера, Хегазі-Гріна з урахуванням вищенаведених зауважень.

Для наочної демонстрації розподілу числових рядів технологічних даних в середовищі Matlab були змодельовані графіки і порівняні з нормальною кривою розподілу (рисунок 2.33).

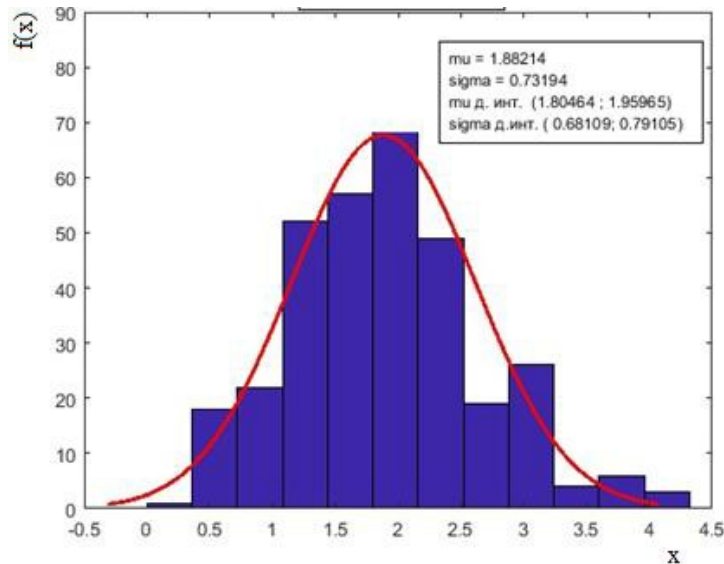


Рисунок 2.22 – Графік розподілу технологічної характеристики «Тонкість помелу»

Таким чином, поєднуючи критерії перевірки гіпотези нормального розподілу відповідно до вищезазначених критеріїв, ми можемо впевнено гарантувати застосовність запропонованого статистичного апарату до оцінки якісних параметрів виробництва цементу, відсіювати некоректні параметри, робити висновки про розмір статистичної вибірки, необхідної для аналізу в цілому.

У тому випадку, якщо загальна вибірка не належить до нормального розподілу, як правило, необхідно збільшити обсяг вибірки, тобто розширити число розглянутих значень деякої характеристики (характеристик) при збільшенні статистичних вимірювань (часових рядів).

Висновки за розділом:

Визначаються фізичні виміряні величини і описуються лабораторні методи їх вимірювання, за якими може бути зроблений оперативний попередній висновок про якість цементу. Для цих цілей виділяються такі параметри:

- питома площа поверхні цементу,
- тонкість помелу цементу,
- масова частка сірчаного ангідриду в цементі,

- масова частка колби,
- Масова частка оксиду кальцію в цементі
- процентний вміст вологи в цементі.

Було обрано методи (критерії Гірі, Шпігельхальтера, Хегазі-Гріна) для перевірки загальної вибірки на належність до нормального розподілу, а також проведено статистичну перевірку вихідних даних за обраними критеріями верифікації.

Показана можливість удосконалення деяких статистичних даних у процесі перевірки нормального розподілу за допомогою методу, заснованого на перетворенні Бокса-Кокса.

Показано, що вибрані параметри є некорельованими (слабо корельованими). Зроблено висновок про необхідність подальших статистичних досліджень контрольних діаграм Шухарта та неможливість використання карт Хотеллінга для аналізу слабо корельованих вихідних даних.

РОЗДІЛ 3

АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВІРТУАЛЬНОГО АНАЛІЗАТОРУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТУ

3.1 Завантаження експериментальних даних та їх статистична обробка

Виходячи з теоретичної частини, описаної в першому розділі, методів статистичної обробки, представлених у другому розділі, реалізуємо алгоритмічне представлення як всього віртуального аналізатора в цілому, так і його компонентів (рисунок 3.1).

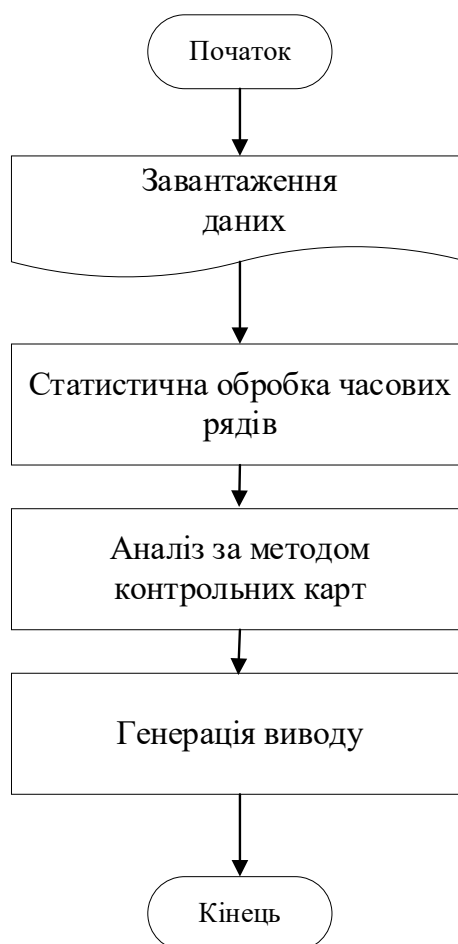


Рисунок 3.1 – Базова структурна схема програмного комплексу системи статистичного контролю якості в цементному виробництві

Розглядається принциповий момент, що виникає при розв'язанні, - проблема класифікації, на основі якої реалізується генерація висновку. Ця

проблема може бути вирішена за допомогою системи, що сама навчається на основі нейронної мережі, експертної системи. Обґрунтовано, що в даному випадку краще використовувати систему генерації виходів на основі опорно-векторної машини (SVM). Запропоновано метод прийняття рішень з використанням методу опорного вектора та представлено необхідний алгоритм умовиводу.

Важливим фактором перед практичною реалізацією статистичних методів індикації критичних ситуацій є розрахунок довірчої ймовірності (надійності) – ймовірності того, що контрольовані характеристики (вибіркові дані) будуть включені в довірчий інтервал. Для проведення цієї процедури розраховували довірчі інтервали через критичне значення коефіцієнта Стюдента з різними рівнями значущості, а також проводили порівняння з інтервалами статистичної керованості, розрахованими для побудови контрольних діаграм за кожною контрольованою характеристикою (табл. 3.1). У результаті порівняння було зроблено висновок, що використання статистичних методів на основі контрольних діаграм для виявлення критичних ситуацій у технології подрібнення цементу відповідає значенню довірчої ймовірності (надійності), що дорівнює 0,99.

Таблиця 3.1 – Значення довірчих інтервалів контрольованих характеристик

Параметр	Довірчий інтервал	Інтервал статистичної керованості	Довірча вірогідність (надійність)
Питома площа поверхні цементу	1,575 – 1,685	1,578 – 1,682	0,99
Масова частка сірчаного ангідриду	2,795 – 2,827	2,795 – 2,827	0,99
Тонкість помелу	3905,54 – 3967,48	3905,54 – 3967,48	0,99
Масова частка опоки	4,338 – 4,488	4,338 – 4,488	0,99
Масова частка оксид кальцію	0,845 – 0,892	0,845 – 0,892	0,99
Вологість	0,242 – 0,257	0,242 – 0,257	0,99

Зчитування і первинне форматування даних здійснюється відповідно до типової логіки, представленій на рисунку 3.2.

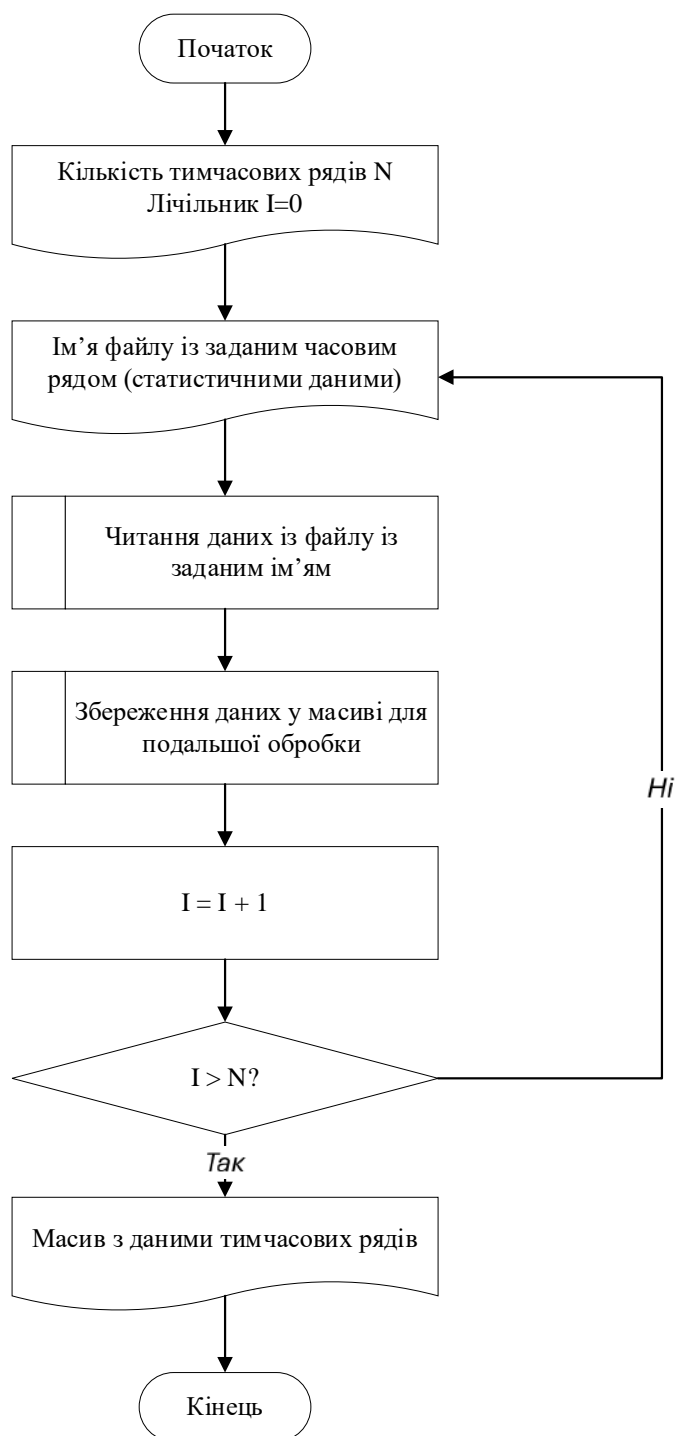


Рисунок 3.2 – Алгоритм зчитування даних з диска та завантаження їх у пам'ять для подальшої статистичної обробки

Статистична обробка експериментальних даних полягає в перевірці двох фактів:

1. Перевірка кореляції між різними якісними характеристиками. Якщо дані не корелюють один з одним, то для подальшого аналізу даних вибираємо метод контрольної діаграми Шухарта. Якщо дані корелюють, то ми використовуємо метод контрольної діаграми Хотеллінга.

1. Виконання нормального закону розподілу даних по кожній з якісних характеристик. На підставі висновків [14, 15] були обрані три найбільш ефективні критерії оцінки нормальності статистичної вибірки: Гірі, Шпігельхальтера і Хегазі-Гріна. Послідовно застосовуючи ці критерії оцінки, ми робимо висновок про характер розподілу. Якщо вибірка кількісно недостатня, ми її збільшуємо. Якщо критерій дає негативну відповідь, то можна застосувати спеціальне функціональне перетворення, яке здатне дещо змінити (згладити статистичні викиди) характер початкової залежності.

Застосувавши це перетворення (Бокс-Кокс), ми повторно використовуємо критерій для оцінки і знову робимо висновок про характер розподілу. Наше завдання в даному випадку - зробити так, щоб хоча б один критерій давав позитивну оцінку експериментальних значень.

Послідовна перевірка кореляції між парами експериментальних залежностей проводиться відповідно до алгоритму, представленого на рис. 3.3, що відповідає виразу для визначення кореляції (2.28). Далі послідовно застосовуємо методи перевірки статистичної вибірки на приналежність до нормального розподілу за алгоритмом, представленим на рисунку 3.4.

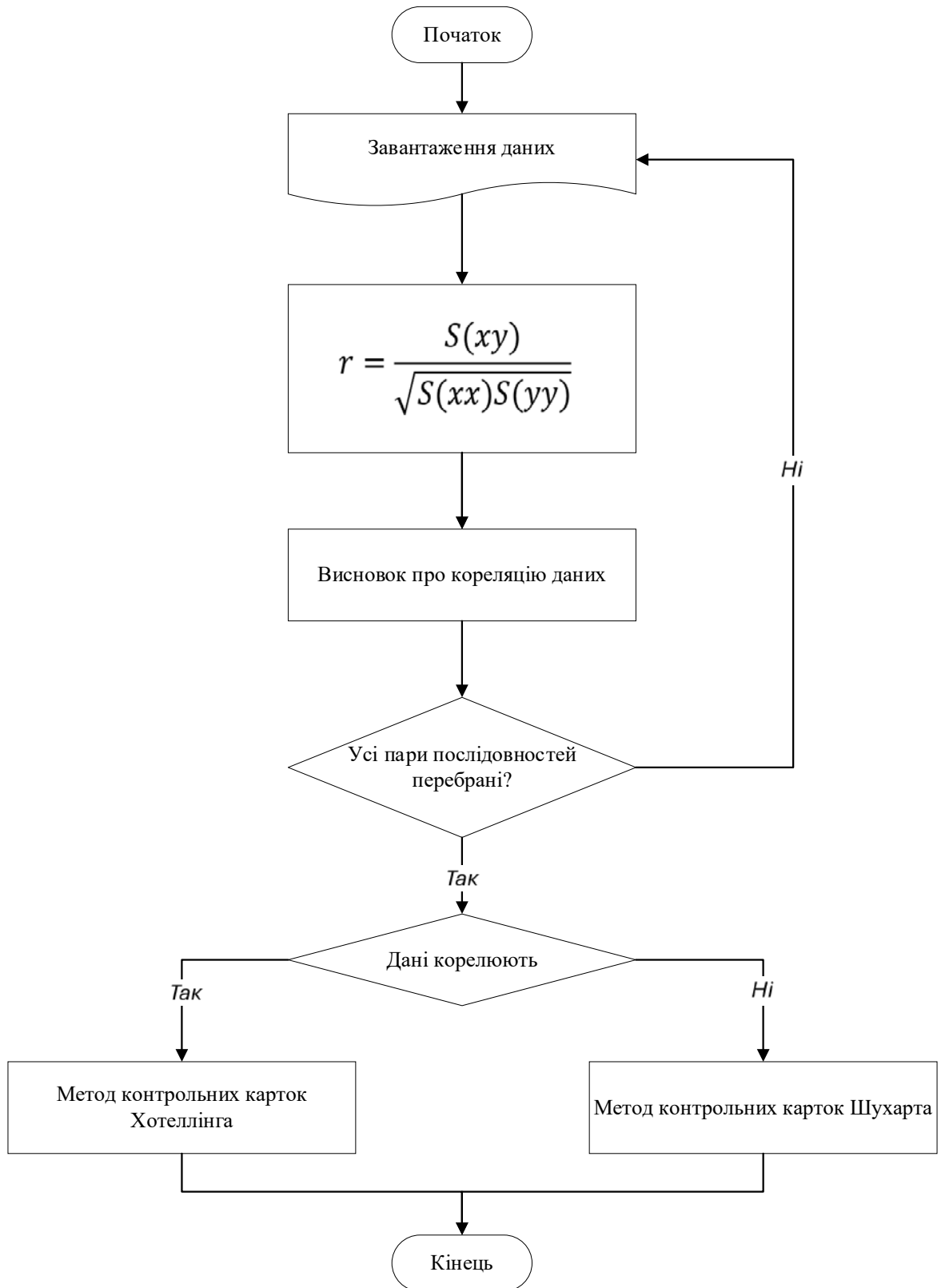


Рисунок 3.3 – Алгоритм послідовного визначення кореляції між парами досвідчених залежностей

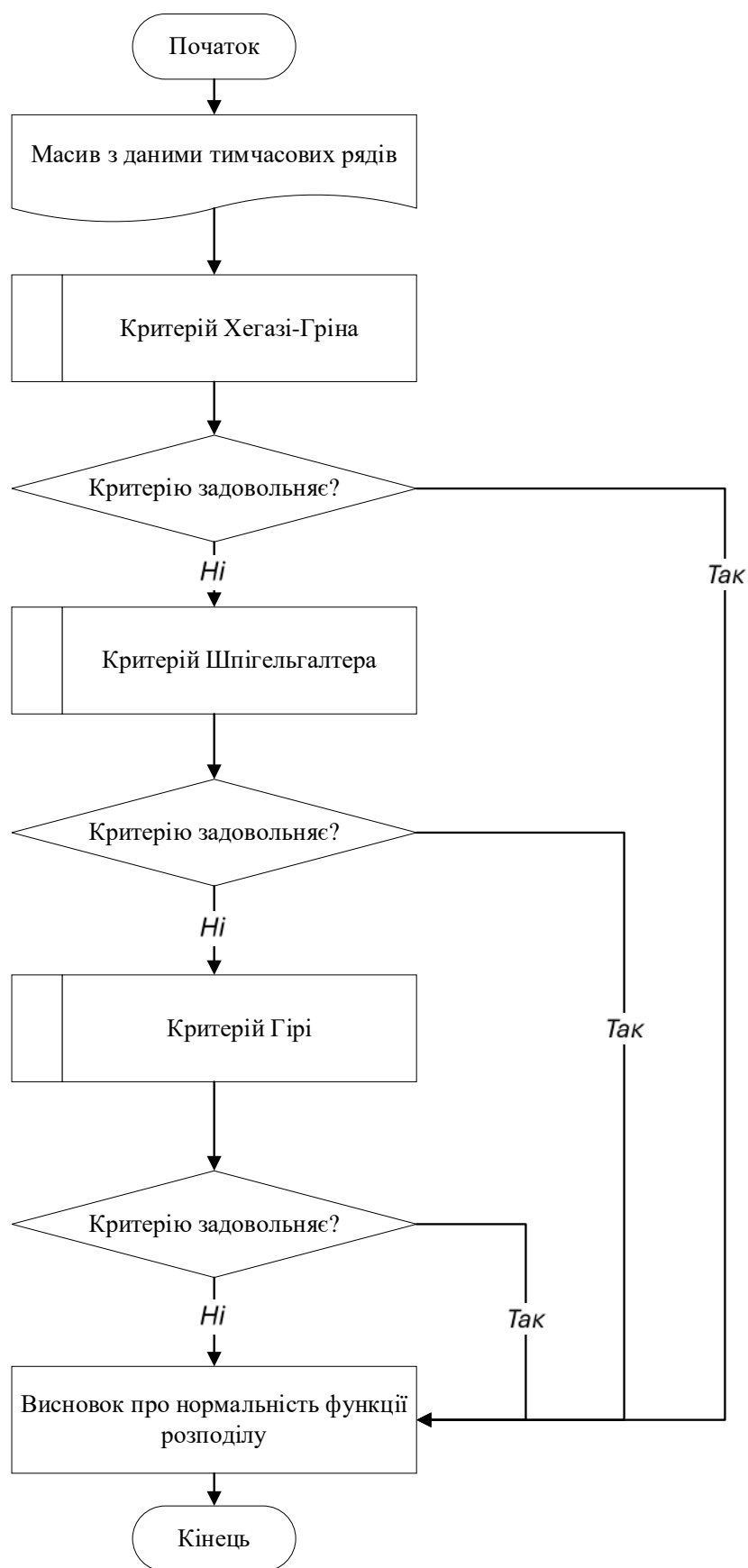
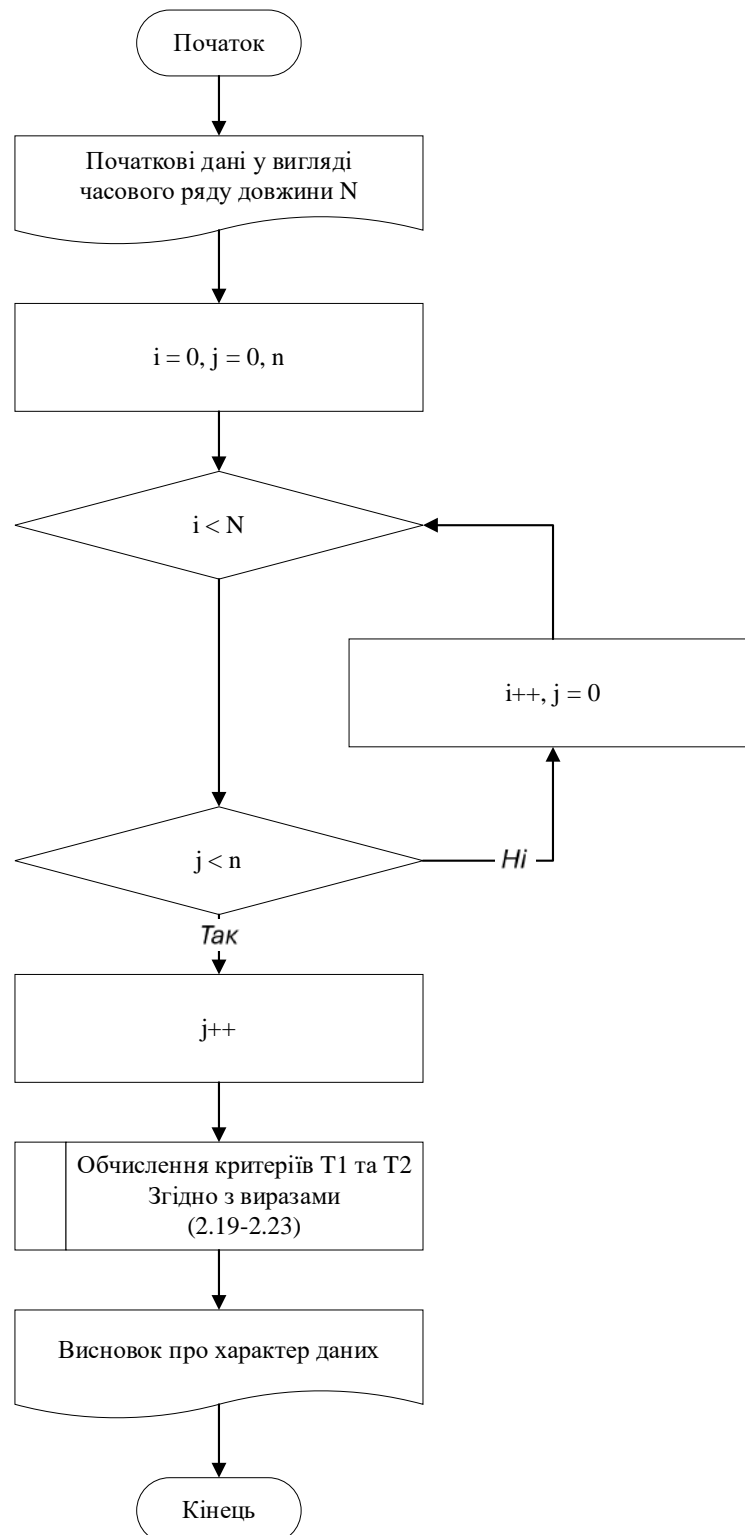


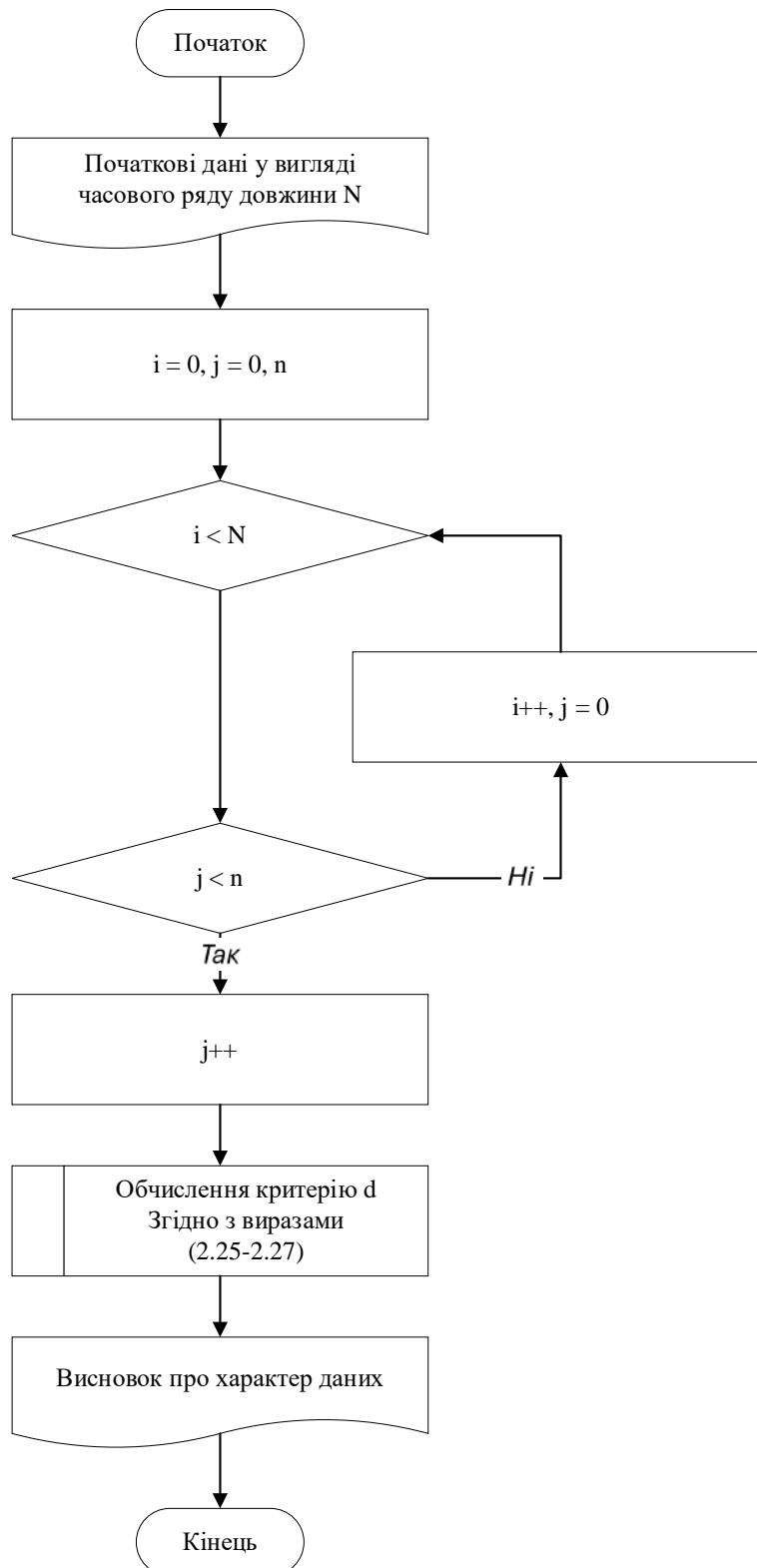
Рисунок 3.4 – Перевірка вибірки на нормальний закон розподілу

Самі способи перевірки здійснюються послідовно. При цьому реалізація критерію Хегазі-Гріна відповідає алгоритму, наведеному на рисунку 3.5.



n – розмір вибірки статистичної послідовності
Рисунок 3.5 – Реалізація критерію Хегазі – Гріна

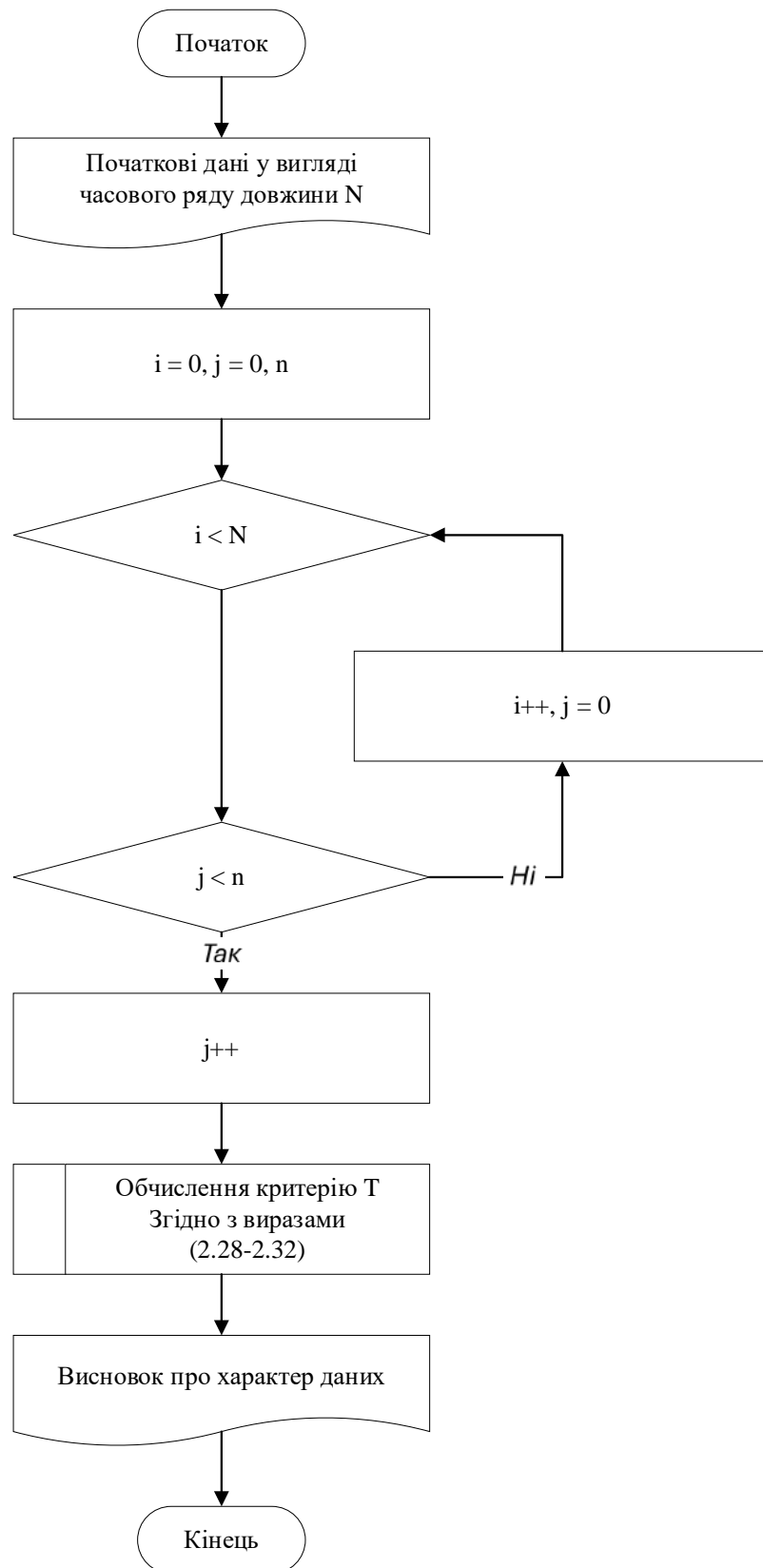
Реалізація критерію Гірі із зовнішньою ідентичністю алгоритму реалізації критерію Хегазі-Гріна відрізняється змістом процедури розрахунку самого критерію (рисунок 3.6).



n – розмір вибірки статистичної послідовності

Рисунок 3.6 – Реалізація критерію Гірі

Аналогічно реалізації інших критеріїв в попередніх алгоритмах, блок-схема алгоритму тесту Шпігельхальтера показана на рисунку 3.7.



n – розмір вибірки статистичної послідовності

Рисунок 3.7 – Реалізація критерію Шпігельхальтера

Обробка результатів перевірки статистичної вибірки на нормальність розподілу буде проводитися відповідно до алгоритму, представленого на рис. 3.8.

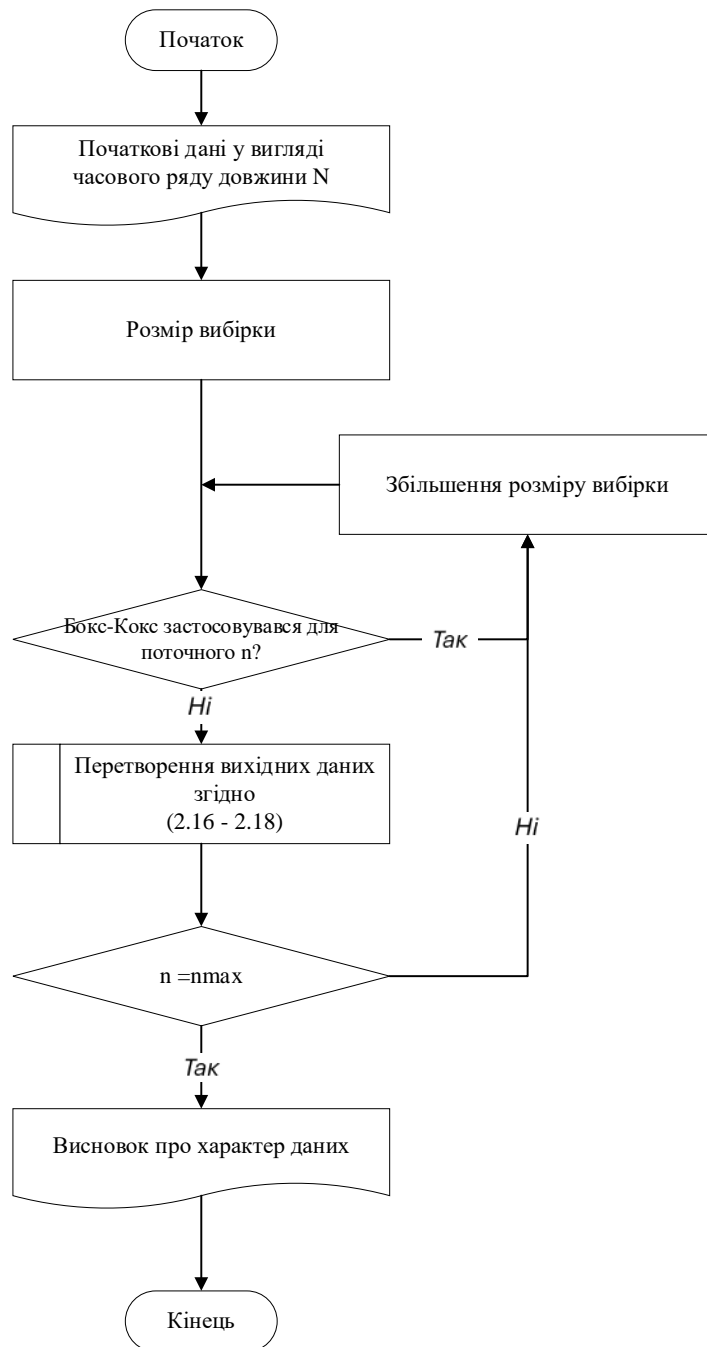


Рисунок 3.8 – Обробка статистичної послідовності після негативної перевірки вибірки на нормальність

Після перевірки статистичної вибірки на приналежність до нормального закону розподілу є два варіанти: або статистика в нормі, або ні. Якщо статистика в нормі, то з нею можна працювати, вирішуючи саму задачу, використовуючи ККШ (або метод Хотелінга), але в разі аномальної статистики її не можна

використовувати, так як висновки будуть невірними. Тому у випадку з аномальною статистикою у нас є два варіанти: або ми намагаємося «поліпшити» метод оцінки за допомогою перетворення Бокса-Кокса (2.17)–(2.18), або, якщо воно не працює, збільшуємо розмір статистичної вибірки.

Виконавши всі попередні процедури по підготовці статистичної послідовності, застосовуємо метод розрахунку ККШ згідно з алгоритмом (рисунок 3.9).

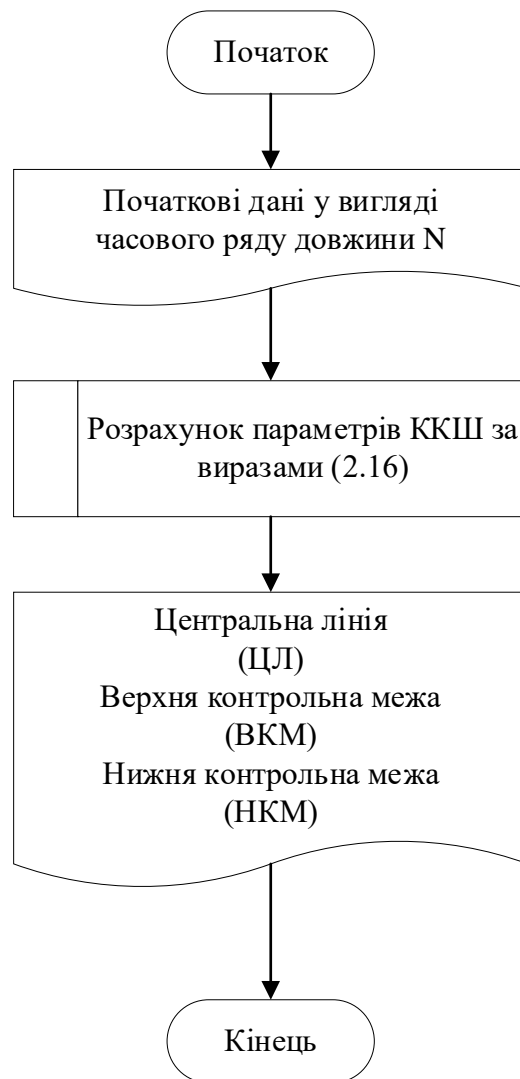


Рисунок 3.9 – Розрахунок контрольних параметрів ККШ

Отримуючи керуючі параметри у вигляді ЦЛ, ВКМ та НКМ, ми маємо інструменти для застосування правил та формування висновку про майбутню поведінку часового ряду. Однак цього недостатньо зробити висновок, так як у

вирішальних правилах (табл. 3.1-3.5) можуть виникати колізії і протиріччя. Ця ситуація потребує вирішення шляхом розробки відповідних стратегій.

3.2 Робота з генеративними правилами для вирішення конфліктів

Для генерації рішення сформуємо словник символів (граматику) на основі вихідних даних (табл. 3.2–3.6) для прийняття рішення [7, 11, 18]. Словник складається з трьох підмножин:

1. Підмножини P імен доменних об'єктів (або передумови)
2. Підмножини Q властивостей (або дій) об'єктів (атрибутів об'єктів);
3. Підмножина V допустимих значень атрибутів (або висновків) розв'язувача.

Підмножини і перекриваються в загальному випадку або збігаються (як в нашій конкретній ситуації). Надалі будемо вважати, що $P \equiv V$, тобто об'єкти предметної області і результати дій з ними відносяться до однієї граматики і збігаються. Ця граMATика має вигляд триплетного (векторного) об'єкт – атрибут – значення. Вектор (p, q, v) існує, якщо $p, v \in P$ і $q \in Q$. Самі вектори відповідають зведенню правил розв'язувача. Вимоги до правил:

1. Попередні породжені правила повинні відповідати допустимим базисним структурам (закономірностям) з області визначення – множини P .
2. Наслідки повинні містити результати маніпулювання цими базисними структурами, породжуватися діями на область визначення з боку елементів множини Q і приводити до результату з множини V (P , так як $P \equiv V$)

Схематично породжуючі правила у виробничій системі можна представити в узагальненому вигляді:

$$(P_1, \dots, P_n) \xrightarrow{q} (P_1, \dots, P_n), q \in (Q_1, \dots, Q_n) \quad (3.1)$$

який трактується за стандартним логічним принципом «якщо \rightarrow то» так: «якщо передумови (умови, стани) P_1, \dots, P_n правильні, то виконуються дії Q_1, \dots, Q_n , що призводять до наслідків (умов, станів) P_1, \dots, P_n ».

Для виконання такого тлумачення необхідне рішуче правило, наявність якого обумовлено необхідністю відповідності поточного елемента граматики на основі функції, визначеної в таблиці. Правила прийняття рішень згідно з пунктом (3.1) задаються у вигляді таблиці переходів. один до одного. Перед запуском розв'язувача його слід перевести в деяке вихідне положення, що характеризує початкову позицію задачі.

Таблиця 3.2 – Правила для параметру «Частка ангідриду сірчистої кислоти»

Правило	Варіанти виходу	Вирішення проблеми
№ 1	1	Зменшити дозацію клінкеру на 1%
	2	Збільшити дозацію клінкеру на 1%
	3	Збільшити дозацію гіпсу на 1%
№ 2	1	Збільшити дозацію гіпсу на 2%
	2	Зменшити дозацію гіпсу на 2%
	3	Збільшити дозацію гіпсу на 4%
№ 3	1	Зменшити дозацію клінкеру на 2%
	2	Збільшити дозацію клінкеру на 2%
	3	Збільшити дозацію гіпсу на 2%
№ 4	1	Збільшити дозацію гіпсу на 3%
	2	Зменшити дозацію гіпсу на 3%

Таблиця 3.3 – Правила параметру «Питома поверхня цементу»

Правило	Варіанти виходу	Вирішення проблеми
№ 1	1	Зменшити частоту обертання ротора сепаратора на 5%
	2	Збільшити частоту обертання ротора сепаратора на 5%
	3	Зменшити частоту обертання ротора сепаратора на 3%
№ 2	1	Зменшити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3 %
	2	Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3%
№ 3	1	Зменшити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%, зменшити частоту обертання ротора сепаратора на 1%
	2	Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%, збільшити частоту обертання ротора на 1%
	3	Зменшити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3%
	4	Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3%
№ 4	1	Перевірити пропускну здатність фільтру сепаратора. За відсутності неполадок знизити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%
	2	Перевірити пропускну здатність фільтру сепаратора. При відсутності неполадок підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%
	3	Збільшити частоту обертання приводу цементного млина на 1%

Таблиця 3.4 – Правила для параметру «Частка опоки»

Правило	Варіанти виходу	Вирішення проблеми
№ 1	1	Зменшити дозацію опоки на 1%
	2	Збільшити дозацію опоки на 1%
	3	Збільшити частоту обертання приводу цементного млина на 1%
№ 2	1	Збільшити дозацію клінкеру на 2%
	2	Зменшити дозацію клінкеру на 2%
	3	Збільшити дозацію опоки на 4%
№ 3	1	Зменшити дозацію опоки на 2%
	2	Збільшити дозацію опоки на 2%
	3	Збільшити частоту обертання приводу цементного млина на 2%
№ 4	1	Збільшити дозацію опоки на 3%
	2	Зменшити дозацію опоки на 3%

Таблиця 3.5 – Правила для параметру «Частка оксиду кальцію»

Правило	Варіанти виходу	Вирішення проблеми
№ 1	1	Збільшити дозацію гіпсу на 1%
	2	Зменшити дозацію гіпсу на 1%
	3	Збільшити дозацію гіпсу на 2%
№ 2	1	Збільшити дозацію гіпсу на 3%
	2	Зменшити дозацію гіпсу на 2%
№ 3	1	Збільшити дозацію гіпсу на 4%
	2	Зменшити дозацію гіпсу на 3%
№ 4	1	Збільшити дозацію гіпсу на 5%
	2	Зменшити дозацію гіпсу на 4%

Таблиця 3.6 – Правила для параметру «Відсотковий вміст вологи»

Правило	Варіанти виходу	Вирішення проблеми
№ 1	1	Зменшити відкриття шиберу забору повітря на 5%
	2	Зменшити відкриття шиберу забору повітря на 3%
	3	Зменшити частоту приводу цементного млина на 2 %
№ 2	1	Зменшити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3 %
	2	Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3%
№ 3	1	Зменшити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%, зменшити частоту обертання ротора сепаратора на 1%
	2	Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%, збільшити частоту обертання ротора сепаратора на 1%
	3	Зменшити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3 %
		Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 3%
№ 4	1	Перевірити пропускну здатність фільтру сепаратора. За відсутності неполадок знизити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1%
	2	Перевірити пропускну здатність фільтру сепаратора. За відсутності неполадок Підвищити розрідженість повітря у фільтрі сепаратора на 1 %
	3	Збільшити частоту обертання приводу цементного млина на 1%

3.3 Побудова машини опорних векторів (SVM)

Альтернативним підходом до розробки експертної системи є використання методів класифікації, заснованих на принципах лінійного (лінійний регресійний аналіз) або квадратичного програмування.

Одним з найбільш ефективних методів є метод опорного вектора з побудовою системи класифікації, яка називається машиною опорного вектора (SVM) [5, 18, 23]. Основною перевагою цього підходу, побудованого на алгебраїчних операціях, є природне рішення проблеми невизначеності в просторі рішень, що характерно для підходу, реалізованого в експертних системах. При цьому існуюча невизначеність усувається без вирішення логічних умов. Істотною перевагою методу опорних векторів є можливість представлення нейронної мережі у вигляді так званого ядра класифікатора, що значно спрощує рішення.

Якщо використовується метод опорних векторів, то вираз (3.1) можна представити у вигляді лінійної комбінації на базисі:

$$q_k(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) q_i(t - \Delta t) \quad (i, k \in \mathbb{N}, \Delta t) \quad (3.2)$$

де $\{a_i(t)\}$ - множина коефіцієнтів (координат) вектора $q_k(t)$ в просторі станів (рішень) на поточний момент часу; $\{q_i(t - \Delta t)\}$ – це множина векторів на попередньому кроці часу, що утворюють векторний базис.

Вирішальне правило δ в даному випадку може бути однозначно визначено множиною координат вектора в просторі в поточний момент часу:

$$\delta(t) \leftrightarrow \{a_i(t)\}, \delta(t) = f(q_1(t - \Delta t), q_2(t - \Delta t), \dots, q_N(t - \Delta t)) \quad (3.3)$$

Тоді задача знаходження функції буде визначатися необхідністю тренування механізму прийняття рішень. Цей етап схожий на навчання нейронної мережі [12].

Сформулюємо проблему в термінах SVM [18]. В якості початкових значень маємо множину класів декартового простору $X = \mathbb{R}^N$, побудовану на основі правил (табл. 4.1), умови приналежності до яких можна представити у вигляді N-

вимірного базису в множині, що відповідає за розмірністю. Виводи з цих правил можуть бути представлені у вигляді набору відповідей Y , взагалі кажучи, розмірності M , не обов'язково однакових за значенням N . Згідно з (3.3), існує цільова залежність $\delta: X \rightarrow Y$, яка зіставляє умови з висновками. Тоді, якщо є відомі коефіцієнти $\delta: X^t \rightarrow Y$ на деякій множині, що передує в часі X^t , то можна розглянути прецедентну задачу (засновану на деякій передісторії) $\langle X, \delta(t), X^t, Y \rangle$, основним призначенням якої буде побудова апроксимальної функції $\delta(t): X \rightarrow Y$ по всьому простору статистичної вибірки.

Тоді нехай:

$x = (x^1, x^2, \dots, x^N)$ – вектор атрибуту приналежності до певного класу в N -мірному базисі.

$w = (w^1, w^2, \dots, w^N)$ – вектор состояния класифіцируемого об'єкта в N -мірному базисі.

w_0 – так званий скалярний поріг - величина, що характеризує відхилення від класифікаційної ознаки.

Якщо ввести скалярний добуток векторів $\langle x, w \rangle$, то в разі колінеарності (повного збігу) векторів x, w він буде дорівнює нулю. Тоді вираз

$$(\langle x, w \rangle - w_0) = \left(\sum_{i=1}^N x^i w^i - w_0 \right) \quad (3.4)$$

характеризує відхилення від колінеарності двох векторів або збіг вектора класифікованого об'єкта з вектором класифікуючої ознаки з точністю до скалярного порогу (абсолютна похибка) w_0 . Отриманий вираз можна нормалізувати до одиниці, тоді можна буде оперувати з відносною похибкою.

Якщо застосувати до виразу кусково-постійну функцію (3.4)

$$\text{sign}(\langle x, w \rangle - w_0) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^N x^i w^i - w_0 \right), \quad (3.5)$$

Тоді ми отримуємо дискретний тригер, що дозволяє контролювати умову класифікації (приналежність до обраного класу). У цьому випадку гіперплощина в N -вимірному просторі визначається виразом

$$Q(w, w_0) = (\langle x, w \rangle - w_0) = 0 \quad (3.6)$$

і визначає інтерфейс між множинами, що підлягають класифікації. Для більш точного поділу може знадобитися інтерфейс класу, який визначається з умови

$$\begin{aligned} \langle x, w \rangle - w_0 &\leq 0 - \varepsilon, \\ \langle x, w \rangle - w_0 &\geq 0 + \varepsilon, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де ε – напівширини полоси розділу.

Таким чином, ідея класифікації полягає в побудові розділової поверхні (гіперплощини) в N -вимірному просторі, в якому розділені множини були б рівномірно віддалені від поверхні розділу на половину ширини розділової смуги. Якщо звести вираз (3.7) до одиниці, то отримуємо семантичний аналог виразу (3.5) щодо гіперплощини інтерфейсу класифікованих множин:

$$\begin{aligned} \langle x, w \rangle - w_0 &\leq -1, \\ \langle x, w \rangle - w_0 &\geq +1. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Умова (3.8) виражає відношення множини щодо гіперплощини розбиття на два випадки: належність до множини (класу) або неналежність.

Тоді, для кожного j -го – визначаючого правила $x_j = (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^N)$ з переліку (табл. 3.2), є двійкова відповідь: $y_j \geq +1$ – належить до цього класу і $y_j \leq -1$ – не належить до цього класу. Класифікаційний вираз (3.8) для j -го класу буде виглядати так:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_j^i w^i - w_0 &\leq y_j = -1, \\ \sum_{i=1}^N x_j^i w^i - w_0 &\geq y_j = +1. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Для отримання висновку для всіх класів по множині рішень, необхідно до всіх класифікуючих ознак циклічно застосовувати вирази (3.9).

Проблема класифікації за методом опорних векторів зводиться до побудови оптимальної гіперплощини, щодо якої можна було б точно розділити вектори N -вимірному простору. Що стосується побудованої гіперплощини, то процедури проводяться за типом (3.9) для кожної з ℓ класифікаційних ознак, визначених множинами (класами), за якими здійснюється класифікація. Задача побудови оптимальної відокремлюваної гіперплощини еквівалентна задачі на знаходження сідлової точки функції Лагранжа [16, 21] в термінах квадратичного програмування:

$$\begin{aligned}
 -\mathcal{L}(\lambda) &= -\sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j + \sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^{\ell} \lambda_i \lambda_j y_i y_j (\langle x_i, x_j \rangle) \rightarrow \min_{\lambda}, \\
 \lambda_j &\geq 0, (1 \leq j \leq \ell, j \in \mathbb{N}), \\
 \sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j y_j &= 0,
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

де $\mathcal{L}(\lambda)$ – функція Лагранжа.

У разі розв'язування задачі (3.10) вектор w визначається відповідно до виразу.

$$w = \sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j y_j x_j. \tag{3.11}$$

Поріг w_0 обчислюється з виразу $\langle w, x_i \rangle - w_0 = y_j$ для будь-якого опорного вектору x_j в навчальній вибірці. Для підвищення стійкості чисельного рішення порогове значення береться з виразу для медіани:

$$w_0 = \text{med}(\langle w, x_j \rangle - y_j : \lambda_j > 0, 1 \leq j \leq \ell, j \in \mathbb{N}), \tag{3.12}$$

а механізм класифікації (3.5), (3.9) буде таким:

$$a(x) = \text{sign} \left(\sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j y_j \langle x_j, x \rangle - w_0 \right). \quad (3.13)$$

При цьому реальне підсумовування йде не для всієї вибірки, а тільки для тих опорних векторів, для яких $\lambda_j \neq 0$.

Для випадку лінійної нероздільності множин використовується узагальнення методики SVM. Відмінність від моделі (3.10) полягає в тому, що

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}(\lambda) &= -\sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j + \sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^{\ell} \lambda_i \lambda_j y_i y_j (\langle x_i, x_j \rangle) \rightarrow \min_{\lambda}, \\ 0 &\leq \lambda_j \leq C, (1 \leq j \leq \ell, j \in \mathbb{N}), \\ \sum_{j=1}^{\ell} \lambda_j y_j &= 0, \end{aligned} \quad (3.14)$$

де C - керуюча константа методу. На практиці вирішується саме задача (3.14), а не (3.10).

Альтернативний підхід до вирішення лінійної нероздільності за допомогою функціональних ядер передбачає заміну скалярного добутку на функціональне співвідношення такого ж значення у виразах (3.13-3.14):

$$\langle x_j, x \rangle = K(x_j, x), \quad (3.15)$$

де $K(x_j, x)$ – ядро (kernel function).

Вираз прийме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \lambda_S^T Q_{SS} \lambda_S + C e_C^T Q_{CS} \lambda_S - e_S^T \lambda_S &\rightarrow \min_{\lambda_S}, \\ y_S^T \lambda_S + C e_S^T y_C &= 0. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Розв'язок цієї задачі дає вектор λ , що дає можливість обчислити значення w і w_0 за формулами (3.11) і (3.12) відповідно.

Наступні кроки полягають у класифікації елементів вибору x_i , обчисленні відступів m_i і перевірці правильності початкового набору правил $\{1, \dots, \ell\} = I_0 \cap$

$I_c \cap I_s$. При формуванні підмножин I_0, I_c, I_s можуть виникати протиріччя, які вимагають перевизначення підмножин на основі таких правил:

$$(i \in I_s) \wedge (\lambda_i \leq 0) \Rightarrow x_i \text{ переводиться з } I_s \text{ в } I_0$$

$$(i \in I_s) \wedge (\lambda_i \geq C) \Rightarrow x_i \text{ переводиться з } I_s \text{ в } I_c$$

$$(i \in I_0) \wedge (m_i \leq 1) \Rightarrow x_i \text{ переводиться з } I_c \text{ в } I_s$$

$$(i \in I_c) \wedge (m_i \geq 1) \Rightarrow x_i \text{ переводиться з } I_c \text{ в } I_s$$

Після кожної модифікації підмножин I_0, I_c, I_s відповідно до цих правил задача (3.16) перераховується циклічно. Таким чином, ми отримуємо наступний алгоритм реалізації підтримуваної векторної машини з навчанням на відомому зразку (рис. 3.10).

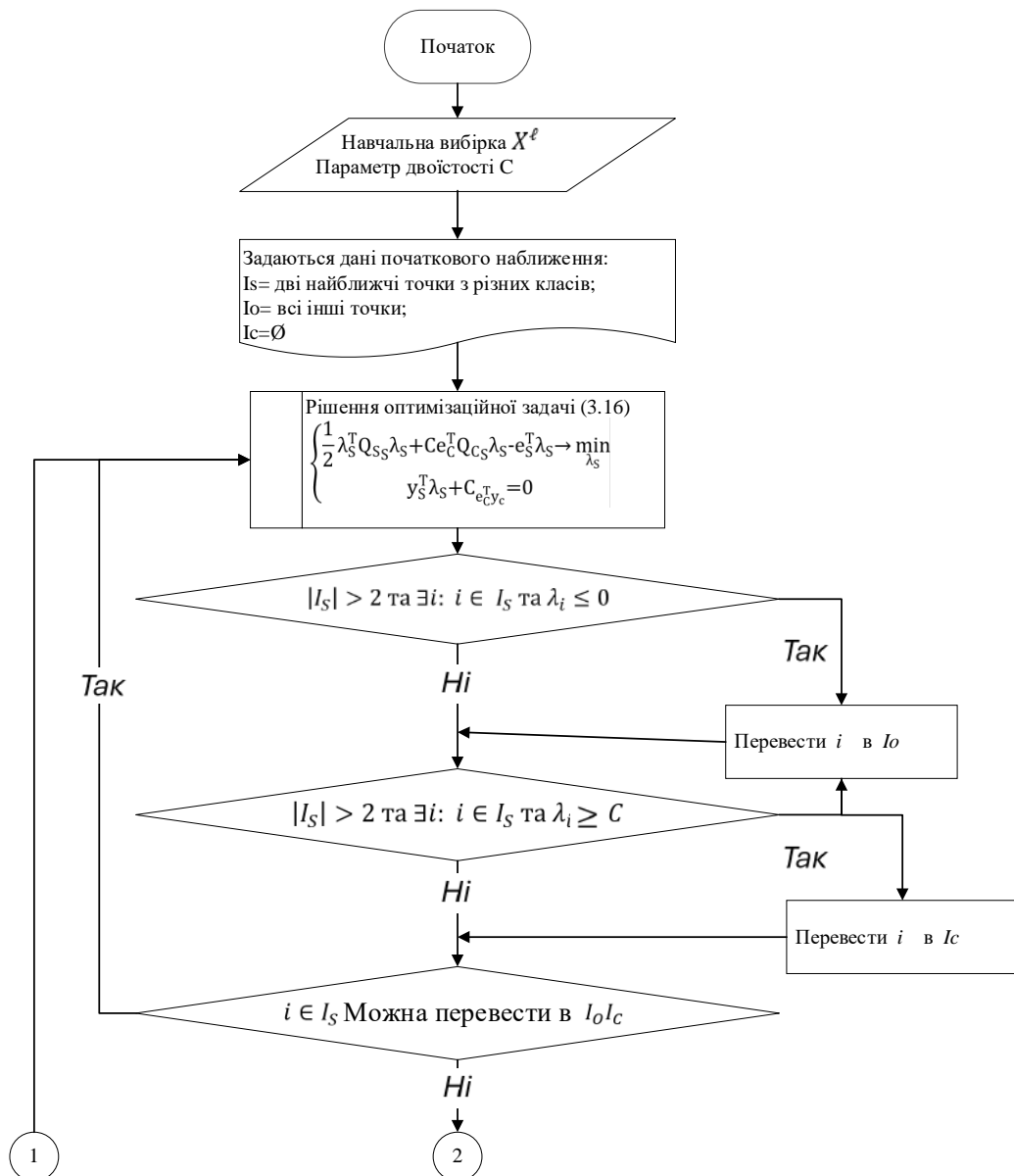


Рисунок 3.10 – Алгоритм SVM – машини опорних векторів

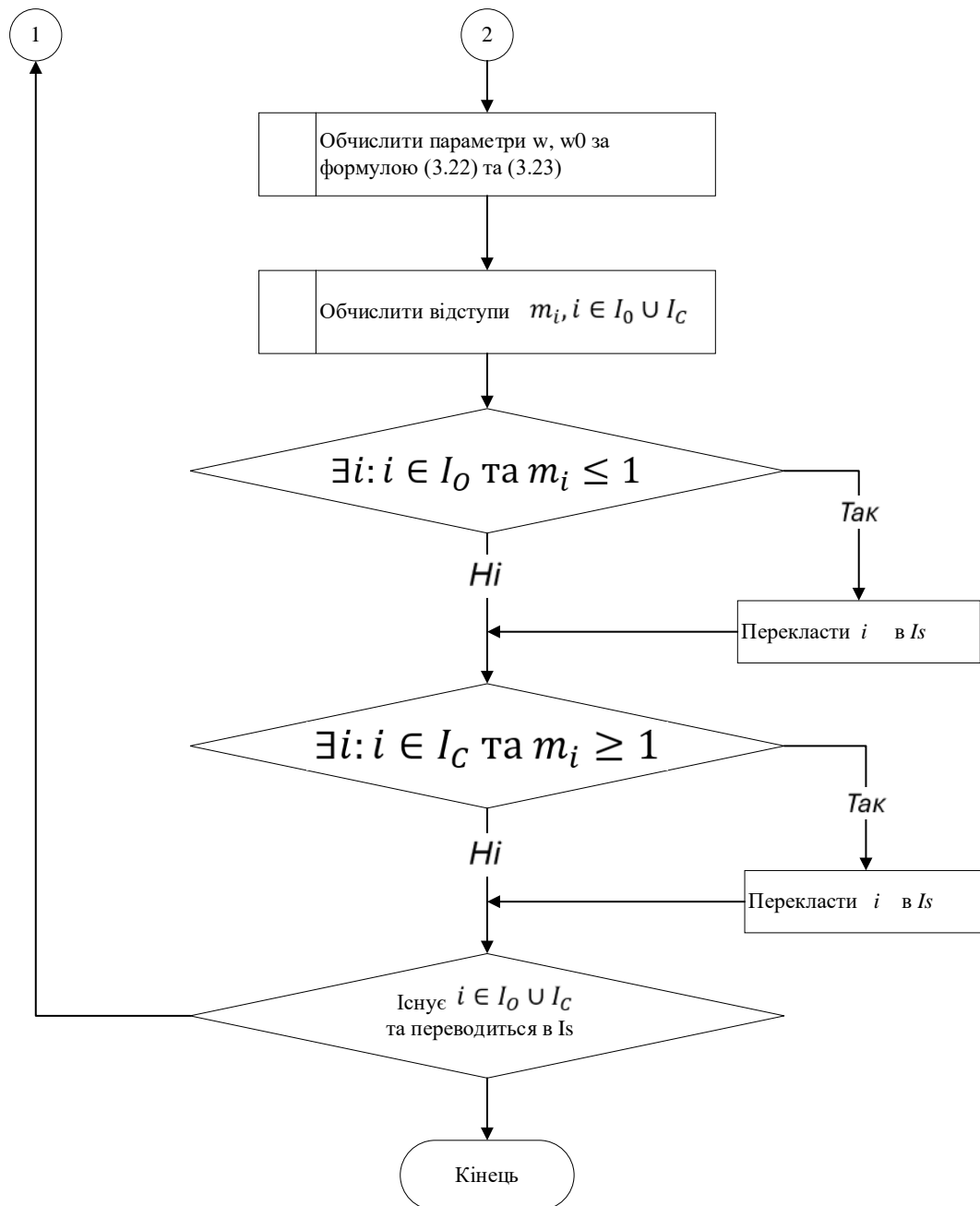


Рисунок 3.10, аркуш 2

Таким чином, крім контрольованого параметра, на вхід машини SVM повинні подаватися додаткові характеристики, щоб провести більш точну класифікацію. Алгоритм використання класифікатора SVM наведено на рис. 3.11. При активації модуля ККШ в разі втрати статистичної керованості зчитуються значення контрольованих і додаткових параметрів, після чого ці дані надходять на вхід SVM машини. Після процесу класифікації з накопиченої бази знань вибирається необхідне правило і виводиться на екран оператор [24].



Рисунок 3.11 – Алгоритм використання класифікатора SVM

В якості інструменту для програмної реалізації цього методу було вирішено використовувати безкоштовну бібліотеку LIBSVM [21]. В рамках обчислювального експерименту було проведено навчання моделей на основі радіально-базисних, лінійних та поліноміальних ядер. Виконано пошук гіперпараметрів у сітці для значень.

Масштабуються всі числові ознаки, включаючи залежну змінну. Важливо, серед іншого, щоб функції з навчальної підмножини та підмножини валідації масштабувалися однаковими функціями з однаковими параметрами. В іншому випадку це може призвести до ситуації, коли будь-які змінні в тестовому наборі лежать в інших інтервалах, ніж змінні в навчальній множині.

Результати обчислювальних експериментів представлені в табл. 3.2. Для кожної з розроблених моделей розраховується значення коефіцієнта детермінації.

Виходячи з отриманих даних, було обрано сердечник на радіальній основі для навчання всіх моделей системи.

Таблиця 3.2 – Значення R^2 для моделей рівня MCD

Набір даних	Радіально-базисне ядро	Лінійне ядро	Поліноміальне ядро
1	0,806 316 9	0,346 153 6	0,295 337 7
2	0,857 454 8	0,306 827 6	0,525 364 8
3	0,828 975 9	0,3318 891 9	0,365 391 4

Щоб домогтися максимально ефективної класифікації, потрібно зробити наступне:

- Перевести числові дані, що відповідають виходу ТП за межі статистичної керованості, у формат інформаційної системи за допомогою SVM.
- Масштабувати дані в діапазоні від 0 до 1 [10].
- Використовувати ядро RBF:

$$k(x, x') = \exp\left(-\gamma \|x - x'\|^2\right).$$

- Використовувати перехресну перевірку, щоб знайти найкращі параметри для C та γ . Константа C є керуючим параметром методу і дозволяє зробити компроміс між максимізацією відстані між двома гіперплощинами та мінімізацією кумулятивної похибки.

- Використовувати знайдені значення C і γ для навчання моделі для отримання класифікатора для конкретного параметра процесу.

- Перевірити отриманий класифікатор на тестовому прикладі.

У загальному формулюванні розробки комерційного програмного комплексу доречно порушити питання про автоматизацію системи управління збереженою інформацією, в першу чергу базою знань. На даний момент управління базою правил алгоритмічно вирішується у вигляді послідовності дій, представленої на рис. 3.12.

Зібравши всі блоки комплексу, розгорнемо збільшену схему (рис. 3.1) в алгоритм вирішення завдання (рис.3.13).

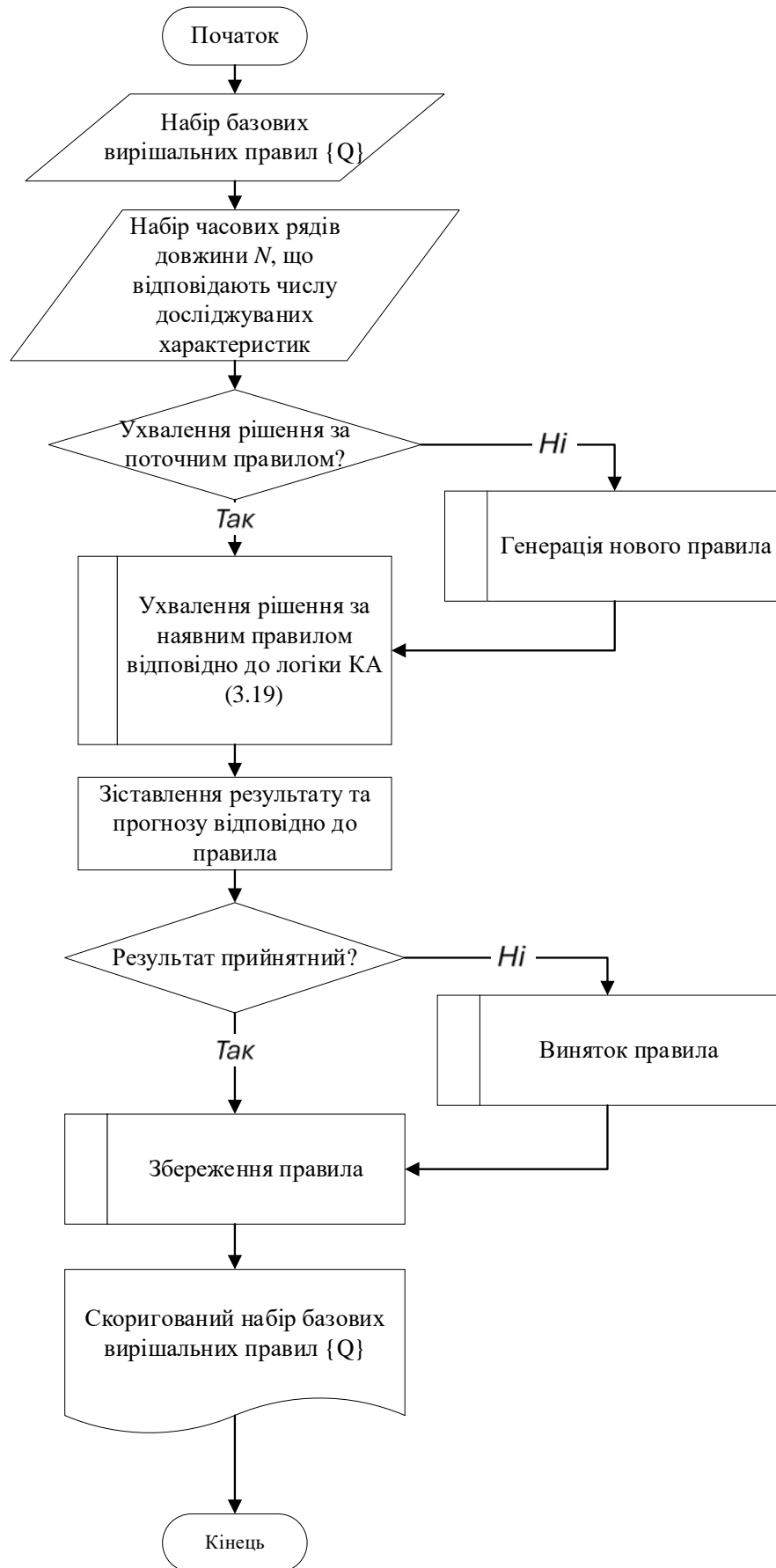


Рисунок 3.12 – Алгоритм накопичення ефективних рішень на основі уточнених даних

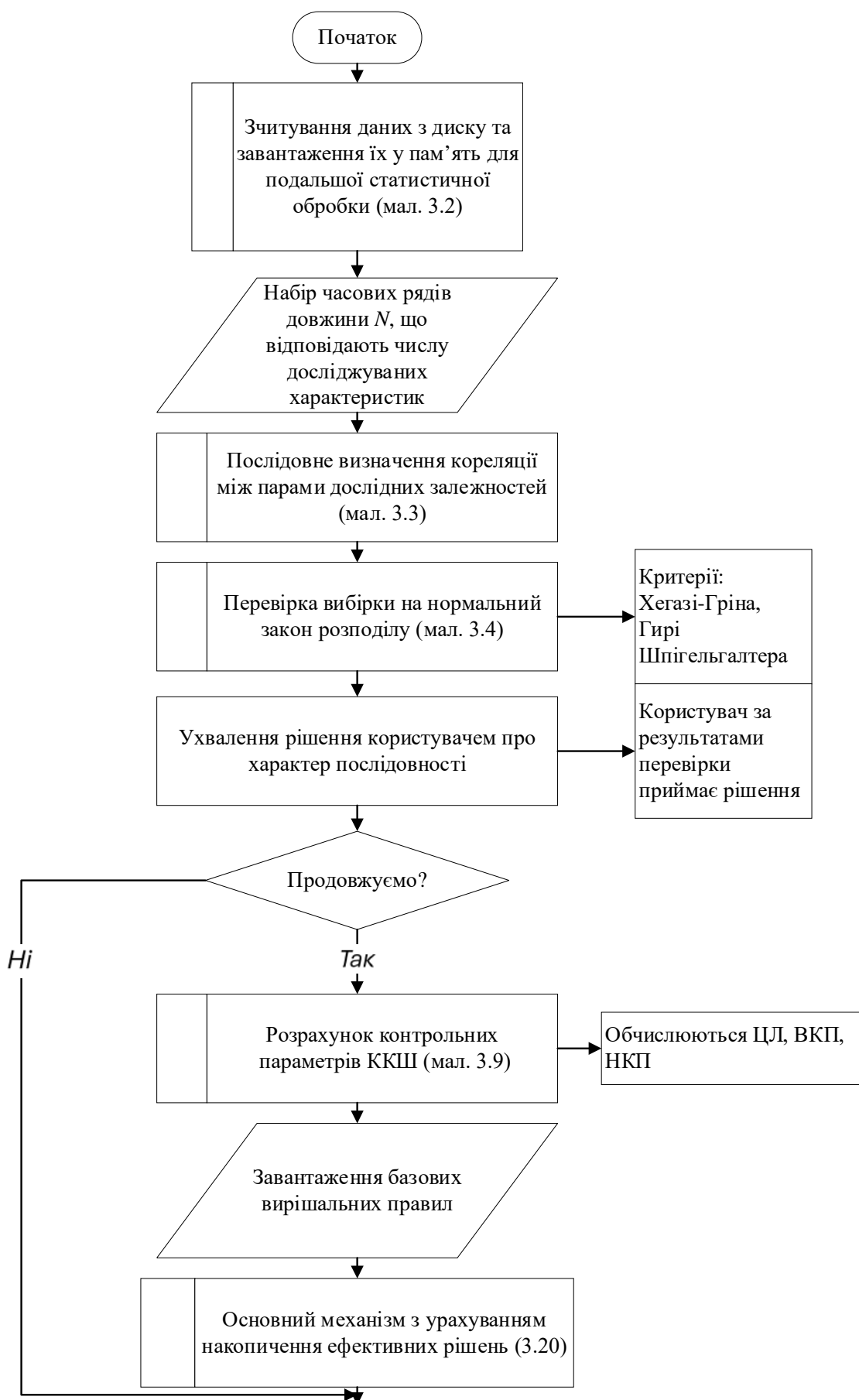


Рисунок 3.13 – Алгоритм складання програмного комплексу

3.4 Приклад варіанту реалізації запропонованої системи

За допомогою SQL Server Management Studio можна відкрити базу даних готового проекту, а за допомогою SQL-запитів імпортувати необхідні поля таблиці в нову базу даних для системи APC. Унікальність таблиць не порушується, а зв'язок їх полів з сигналами, що надходять від контролерів, зберігається. Структура впровадженої системи (рисунок 3.14) працює з декількома базами даних, які з'єднані між собою за допомогою описаних раніше інтерфейсів.

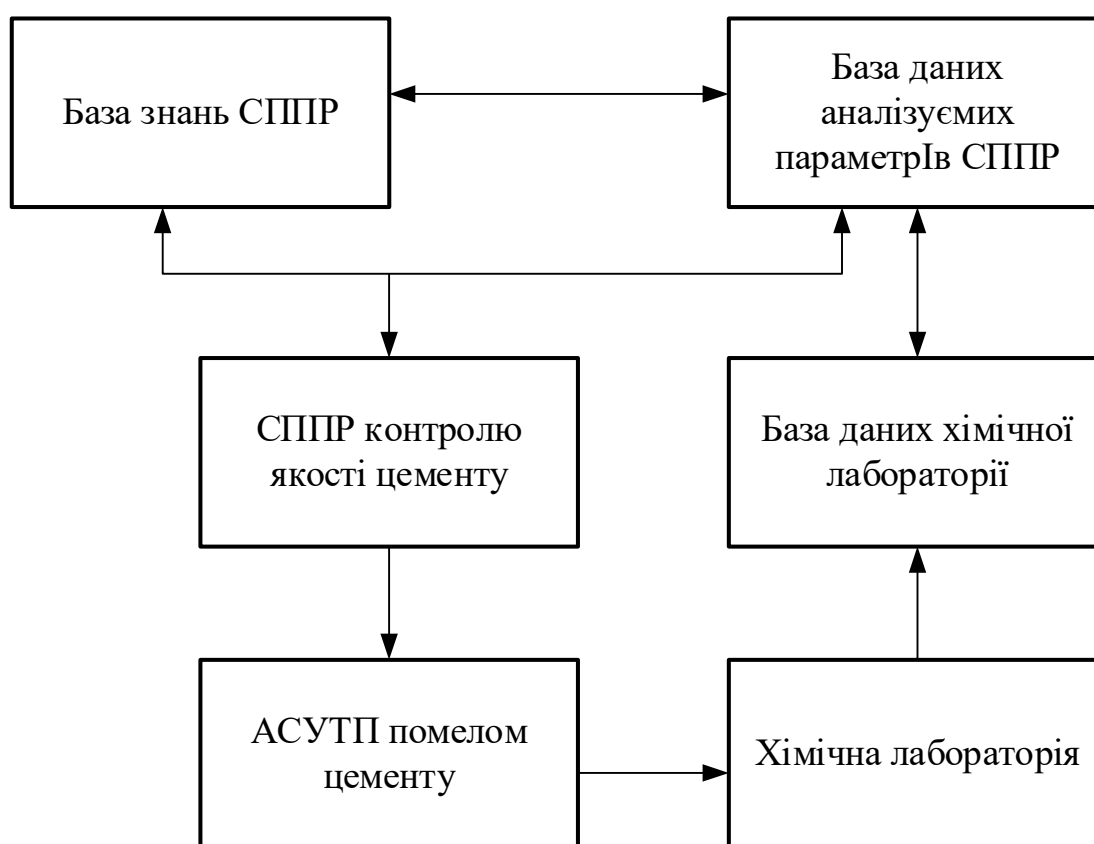


Рисунок 3.14 – Структура системи APC, що підлягає впровадженню

Наступним кроком є створення мнемосхем для системи APC. Для цього використовується додаток Graphic Designer, що входить до складу WinCC. У його бібліотеці є велика кількість графічних шаблонів для створення інтерфейсу. Ви також можете перетягувати будь-яку графіку з інших проектів WinCC. Після

створення читабельного та ергономічного інтерфейсу необхідно підключити графічні об'єкти мнемосхеми та сигнали, які система отримує від контролерів.

Для реалізації потрібних аналітичних функцій WinCC має можливість включення скриптів, написаних на С або Visual Basic. Після того, як вони будуть скомпільовані, вони імпортуються в проект. Це дозволяє здійснювати більш ефективно управління, оперативно реагувати на будь-які виробничі ситуації і вживати адекватних заходів для скорочення простоїв і кількості бракованої продукції, витрат на переробку продукції, зберігання оптимальної кількості запасу готової продукції. Основні архітектурні елементи системи представлені на рисунку 3.15.

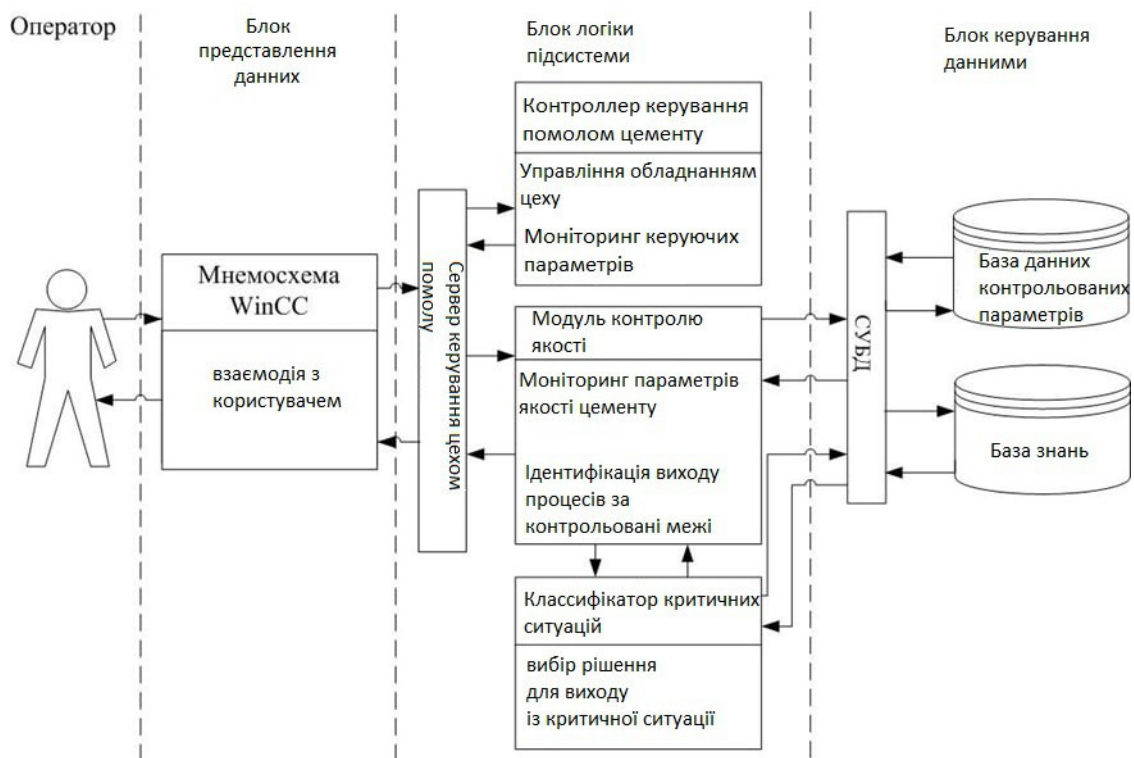


Рисунок 3.15 – Архітектурні елементи системи APC

Взаємодія оператора з автоматизованою системою управління процесом помелу цементу відбувається через людино-машинний інтерфейс WinCC. Нижче наведені мнемонічні схеми (рис. 3.16) існуючої системи контролю подрібнення цементу.

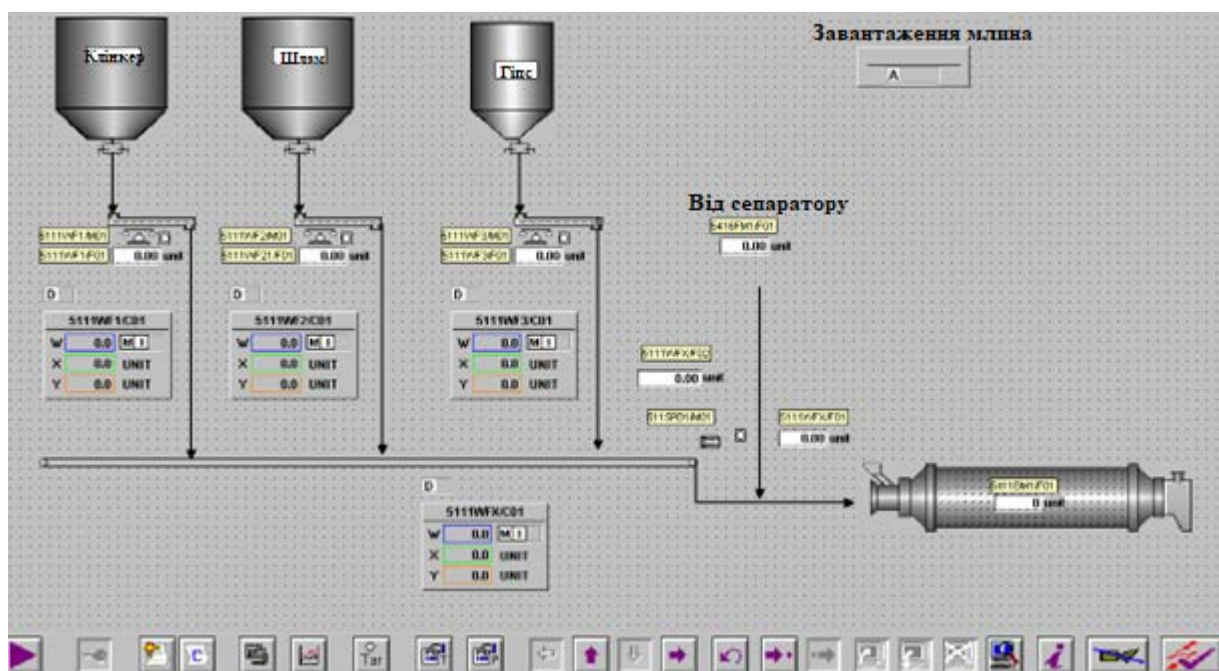


Рисунок 3.16 – Мнемотехніка контролю шліфування цементу

Під час випробування та впровадження системи АРС контролю якості помелу цементу всі дії оператора щодо вирішення аварійних ситуацій, що призводять до втрати якості продукції, фіксуються в базі знань і відображаються на схемі використання (рис. 3.17).

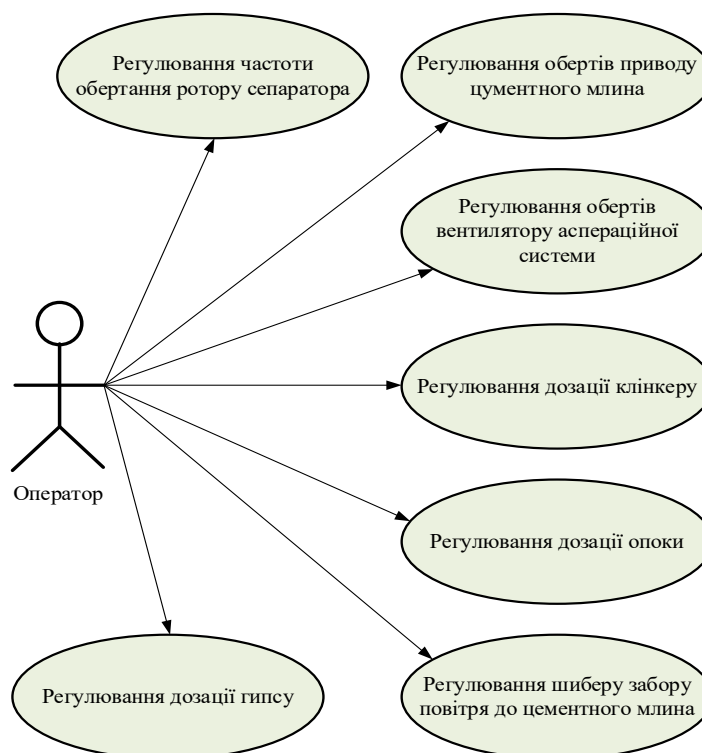


Рисунок 3.17 – Схема варіантів використання дій оператора

Висновки за розділом

На основі моделей і підходів, сформульованих в попередніх розділах, дається рішення задачі на алгоритмічному рівні. Будується загальний алгоритм рішення з урахуванням взаємодії людини і машини, виявляються проблемні зони, а саме:

- логіка прийняття рішень при оцінці характеру розподілу як нормального;
- порядок вибору стратегії вирішення конфліктів на зводі вирішальних правил.

Показано, що для автоматизованого комплексу контролю якості продукції необхідно використовувати віртуальний аналізатор для автоматизованого прийняття рішень або підтримки прийняття рішень із пропозицією можливих сценаріїв вирішення конфліктної ситуації. Найкраще для цієї мети підходить опорно-векторна машина (SVM).

В рамках розв'язаної задачі запропоновано алгоритм реалізації опорного вектора машини. Показано його зв'язок з нейромережевим підходом до проблеми.

Вказані варіанти вдосконалення віртуального аналізатора, засновані на використанні різних функціональних сердечників, що використовуються в машині опорного вектора, які підключаються в різних ситуаціях для кращої класифікації об'єктів.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Актуальним є завдання створення системи контролю та управління якістю випускаємої продукції з можливістю прогнозування виходу показників якості за допустимі межі. Система попередить оператора і надасть йому пораду щодо виходу з нестандартної ситуації. Оскільки цемент – це порошкоподібна речовина, яка виробляється у дуже великих кількостях, неможливо забезпечити тотальний контроль якості всієї продукції

Покращення якості обумовлене застосуванням не лише безпосередніх фізичних методів контролю та управління, що впливають в першу чергу на системні помилки, але й різних статистичних методів, що знижують залежність від випадкових помилок у технологічному процесі. Водночас такі сучасні технологічні комплекси, як набір інструментальних засобів, мають значну структурну складність. Збільшення структурної складності, в свою чергу, призводить до зростання помилок випадкового характеру. Вивчення технологічного комплексу в цілому з точки зору системного підходу закладає основи оптимального управління технологічними процесами. На основі таких знань стає можливим формувати алгоритми безпосереднього управління, розробляти виробничі регламенти та керівні документи, що сприяють зростанню продуктивності та високій якості продукції, безпечній експлуатації складної техніки. Системний науковий підхід до покращення якості випускаємої продукції дозволяє сформулювати вимоги до основ управління технологічними процесами.

1. Ідентифікація технологічного процесу подрібнення цементу як динамічної системи з використанням регресійних методів дозволила створити математичну модель цього процесу. Так як перехідний процес носить стаціонарний характер й неможливо використовувати контроль за зворотним зв'язком зроблено висновок, що найбільш ефективним інструментом виявлення позаштатних ситуацій та підтримки прийняття рішень у даній виробничій сфері виробництва цементу буде використання статистичних методів контролю.

2. Аналіз та узагальнення досвіду у сфері контролю якості цементу дозволило показати, що найбільш ефективним інструментом виявлення аварійних ситуацій у даній виробничій сфері буде використання статистичних методів контролю. Аналіз технологічного процесу подрібнення цементу дозволив вибрати контрольовані технологічні дані і отримати результати для побудови програмно-математичного комплексу. Аналіз технологічних даних показав, що обрані параметри є некорельованими (слабо корельованими). Зроблено висновок про можливість використання контрольних діаграм Шухарта для задачі управління якістю. Були обрані методи (Гірі, Шпігельхальтера, Хегазі-Гріна) для перевірки загальної вибірки на приналежність до нормального розподілу і проведена статистична перевірка вихідних даних з використанням обраних критеріїв верифікації. На підставі проведених перевірок обґрунтовано висновок про те, що метод контрольної діаграми Шухарта має найвищу ефективність у порівнянні з іншими статистичними методами статистичної оцінки виробничих параметрів якості цементу.

3. На основі сукупності характеристик і можливостей обраних методів щодо використання в складі програмно-комп'ютерного комплексу оцінки якості виробленого цементу вказується фізична модель, на основі якої розроблена математична модель для оцінки статистичних параметрів виробничих процесів.

4. На основі сформульованих моделей і підходів будується загальний алгоритм створення віртуального аналізатора з урахуванням взаємодії людини і машини, виявляються проблемні зони.

Показано, що для автоматизованого комплексу контролю якості продукції необхідно використовувати віртуальний аналізатор для автоматизованого прийняття рішень або підтримки прийняття рішень із пропозицією можливих сценаріїв вирішення конфліктної ситуації.

Обґрунтовано ефективність використання для цієї мети опорно-векторної машини (SVM). В рамках розв'язаної задачі був створений віртуальний аналізатор на основі опорно-векторної машини. Показано його зв'язок з нейромережевим підходом до проблеми та можливість підвищення ефективності

прийняття рішень на основі статистичного накопичення даних, їх облік у базі даних правил ККШ, на підставі яких приймається контрольне рішення.

Таким чином, найбільш прийнятними для впровадження у віртуальний аналізатор контролю та управління якістю при виробництві цементу є статистичні методи контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузенков А. М. Автоматизована підсистема контролю якості цементу на основі використання карт Шухарта // *Цемент: управління та високі технології*. 2014. № 4. С. 168–180.
2. Кузенков А. М. Вдосконалення системи контролю якості помелу цементу на основі статистичних контрольних карт” // *Науково-технічний вісник*. 2017. № 3. С. 115–117.
3. Лемешко Б. Ю., Рогожніков А. П. Про нормальність помилок вимірювань у класичних експериментах та потужності критеріїв, застосовуваних для перевірки відхилень від нормального закону // *Метрологія*. 2012. № 2. 112с.
4. X. S. Lu, M. Xie, T. N. Goh, C. D. Lai Control chart for multivariate attribute processes // *International Journal of Production Research*. 2011. № 12. P. 327–338.
5. Magoules F. Analysis of Cement Grinding Technologies Using Modern Algorithms and Artificial Intelligence Models // *Cement and Concrete Research*, 2016. 171 p.
6. Nelson L. S. “Comparison of Various Cement Grinding Methods and Their Impact on the Physical-Mechanical Properties of Concrete” // *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2016. Vol. 16, № 4 (Oct.). P. 237 –239.
7. Сердюк О., Маринич І. Система візуалізації роботи пиловловлюючої установки з контролем її основних технологічних параметрів в умовах цементного виробництва. // *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, №3, 2021. С.38-46.
8. Шахова Л. Д, Черкасов Р. А. Интенсификация процесса измелчения клинкера с применением интенсификаторов помола // *Вісник СумДПУ*. 2014, №4, с.142-154
9. “Іванов С .П., Горяїнов О.І. Оптимізація процесу помелу цементу для зменшення споживання енергії та підвищення продуктивності // *Construction and Building Materials*. 2014., №2, с.97-112

10. X. S. Lu, M. Xie, T. N. Goh, C. D. Lai Control chart for multivariate attribute processes // *International Journal of Production Research*. 1998. № 12. P. 3477–3489.
11. Dong. B. Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region // *Energy and Buildings*. 2006. Vol. 37, № 5. P. 545–553
12. Fine S. INCAS: An incremental active set method for SVM. Scheinberg. Tech. rep., 2002. 78 p.
13. Geary R. C. Testing for Normality // *Biometrika* 1937. Vol.2. P. 209–242.
14. Gitlow H. S. Viewing statistics from a quality control perspective // *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2001. Vol.18, № 2. P. 169-179.
15. Hahn G. The role of statistics in business and industry. N.Y.T: John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 79 p.
16. Hegazy Y. A. S. Some new goodness-of-fit tests using order statistics. *Applied Statistics*. 1975. Vol. 24, № 3. P. 299–308.
17. Першин П. С, Серпов К. С. Дослідження впливу різних параметрів помелу на мікроструктуру та реологічні властивості цементного пастоподібного матеріалу, // *Advances in Cement Research*. 2012., №2, с.76-94
18. Дунин-Барковский И. В. Смирнов Н. В., Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М. : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1955. 321 с.
19. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М. : Сов. радио, 1962. 67 с.
20. Якубайтис Э. А. Теория автоматов в теории вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. М., ВИНТИ, 1976. С. 109–188.
21. Bartlett P. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers. Cambridge, USA : MIT Press, 1998.76 p.

22. Nelson L. S. The Shewhart Control Chart – Tests for Special Causes // *Journal of Quality Technology*. 1984. Vol. 16, № 4 (Oct.). P. 237–239.
23. Osuna E. An improved training algorithm for support vector machines / *Neural Networks for Signal Processing VII. IEEE Workshop*, 1997. P. 276–285.
24. Winston P. H. *Artificial Intelligence*. 3rd Edition, Addison-Wesley Pub Co, 1992. 134 p.
25. Woodall W. H. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control // *Journal of Quality Technology*. 2000. Vol. 32, № 4 (Oct.). P. 341–350.
26. 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.
27. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
28. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
29. 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)
30. 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)