

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" _____ " _____ 2025р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої
освіти

на тему

**«Система автоматизованого проєктування експрес-аналізу складу матеріалів
на основі фотоелектричного та кондуктометричного методів»**

**Computer-aided design system for rapid analysis of material composition based on
photoelectric and conduct-metric methods**

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-21

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані

технології»

_____ Піріг В.Г.

" _____ " _____ 2025р

Керівник роботи

доцент, к.т.н

_____ Мірошніченко М. С.

" _____ " _____ 2025р

Рецензент

" _____ " _____ 2025р

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ	2
1 Аналіз методів та пристроїв дисперсних систем	4
1.1. Методи аналізу дисперсного складу	4
1.2. Методи підготовки проби	7
1.3. Вимірювачі диференціальних методів	9
1.4. Аналіз систем контролю та управління дисперсним складом	17
2 Математичне моделювання аналізатора	22
2.1. Структура моделі аналізатора	22
2.2. Моделювання матеріального потоку часточок	27
2.3. Моделювання первинних перетворювачів	31
2.4. Моделювання вимірювального каналу аналізатора	33
3 Синтез аналізаторів дисперсного складу	35
3.1. Аналіз об'єму вибірки	35
3.2. Визначення законів дисперсних систем	37
3.3. Методика побудови імітаційних моделей дисперсних систем	40
3.4. Вибір структури аналізатора	46
4 Аналіз систем управління дисперсним складом металевих порошків	47
4.1. Технологічний процес виробництва дисперсних систем	47
4.2. Вибір параметрів технологічного агрегату розпилювання	49
4.3. Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом розпилювання	50
4.4. Система керування процесом розпилювання металевого розплаву	54
4.5. Вдосконалення систем керування виробництва металевих порошків	57
Висновки	59

ВСТУП

Дисперсні системи (ДС) оточують існування людини як у його повсякденному житті, так й у процесі виробничої діяльності. При цьому під дисперсними системами розуміють гетерогенну систему, яка складається з двох або більше фаз: дисперсійного середовища та дисперсної фази. За структурою дисперсні системи поділяють на два класи - вільнодисперсні, у яких частинки дисперсної фази не пов'язані між собою й можуть вільно переміщуватися (як приклад: порошки, емульсії, суспензії, золи, аерозолі) та пов'язнодисперсні системи, у яких одна з фаз не переміщується вільно, так як структурно пов'язана (гелі, холодці, сплави, плівки, піни).

Дисперсні матеріали широко використовуються у порошковій металургії, хімічній, атомній, електронній, абразивній, скляній, цементній, керамічній, вогнетривкій, будівельній, гірничо-перероблюваній, текстильній, поліграфічній, харчовій, фармацевтичній, мікробіологічній, парфумерній промисловостях та ін.

У низці галузей матеріали піддають подрібненню для отримання порошкоподібної форми, яку згодом змішують з іншими компонентами. Це характерно, зокрема, для виробництва будівельних матеріалів, таких як цемент, скло, кераміка або композиційні сполуки, а також у процесах збагачення руд. В інших випадках тверді тіла з неоднорідним складом дроблять з метою виділення певного компонента, що має корисні властивості й входить до їхнього складу — наприклад, під час обробки харчових продуктів. Як правило, тверде й рідке паливо найчастіше використовують у вигляді порошку або аерозолю для ефективного спалювання.

У бакалаврській роботі розглянуті вільнодисперсні системи таких типів; порошки, аерозолі, суспензії, дисперсна фаза яких при цьому визначається морфологічними характеристиками частинок. Такі дисперсні системи характеризуються такими основними параметрами [1]: станом поверхні частинок, дисперсним складом, щільністю упаковки, питомою поверхнею, об'ємною масою, адгезійними і аутогезійними властивостями, коефіцієнтами внутрішнього та зовнішнього тертя, вільноутворенням, злежуваністю тощо.

Властивості дисперсних систем значною мірою залежать від їхнього дисперсного складу, адже саме він визначає фізико-хімічні характеристики систем, що, у свою чергу, впливає на технологічні показники якості та сфери застосування. Наприклад, параметри дисперсного складу мають вирішальне значення для якості електрорадіоматеріалів, люмінофорів, композиційних речовин, вибухових сумішей тощо. У випадку порошкового рідкого вугільного палива, яке використовується у вигляді аерозолі, ступінь дисперсності визначає повноту згоряння, а отже — й ефективність роботи котлів. У цементі цей показник впливає на такі важливі характеристики бетону, як міцність, морозостійкість та час тверднення. Дисперсний склад абразивних порошоків безпосередньо впливає на точність шліфування деталей. Гігієнічна оцінка аерозолів також базується на аналізі їх дисперсного складу, зокрема при вивченні рівня їх шкідливості. Крім того, дисперсний аналіз є ключовим у фармацевтичному виробництві, дослідженні спор, клітин крові та багатьох інших сферах. Отже, аналіз дисперсного складу порошоків важливий у процесі виробництва, переробки та споживання при оперативному контролі та управлінні технологічними процесами у різних галузях промисловості. Тому нормативні матеріали на дисперсні системи містять різноманітні параметри, а аналіз дисперсного складу має бути обов'язковим методом контролю при цьому. Зважаючи на різноманіття таких систем та широту їх використання, методи дисперсного аналізу порошоків знаходять широке застосування, як у промисловості, сільському господарстві, так й у екології, метеорології та медицині. Найбільш інформативною характеристикою дисперсного складу системи є функція розподілу частинок за відповідними розмірними параметрами, що дає змогу кількісно визначати вміст будь-якої фракції дисперсної фази.

Технологічні процеси виробництва та обробки дисперсних систем супроводжуються високими енергетичними й матеріальними витратами, ускладнюються обмеженістю апріорної інформації, запізненнями в керуванні та неконтрольованими збуреннями, що знижує якість готових порошоків. Тому розробка систем контролю та оперативного управління дисперсним складом є актуальною науково-технічною задачею.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

1.1. Методи аналізу дисперсного складу

Під час аналізу дисперсного складу передусім необхідно ввести поняття розміру частинок. Основним морфологічним критерієм розміру частинки зазвичай є її лінійна характеристика — найчастіше діаметр. Однак слід зазначити, що такий параметр однозначно описує лише частинки з геометрично правильною формою, які можна охарактеризувати єдиним розмірним параметром. У випадках, коли частинки мають складну або неправильну форму, виникає потреба у використанні додаткових розмірних характеристик. У більшості таких випадків за розмір частинки приймають певну статистичну середню величину, що репрезентує усереднений діаметр серед сукупності різних вимірюваних значень. [1, 2]. При цьому чисельне значення розміру буде залежати від способу усереднювання. Найчастіше використовують середньоарифметичні або середньо геометричні розміри. Найчастіше задля порівнювання розмірів частинок різної форми застосовують поняття еквівалентного діаметру. Тобто, форма частинок - це одна з класифікаційних ознак аналізу дисперсного складу. Повне уявлення про форму частинок дає аналітичний вираз для поверхні, яка її обмежує. Однак подібні вирази вдається скласти, коли форма частинок має форми правильних геометричних фігур. На практиці для кількісного опису форми частинок використовуються різноманітні системи морфологічних критеріїв, зокрема показники ущільненості, сферичності, подовженості та інші. Ці критерії дозволяють здійснити порівняння форми досліджуваної частинки з формою ідеалізованої сферичної моделі. Ступінь відхилення від сферичної геометрії визначається за допомогою відповідних морфологічних характеристик, що вводяться у вигляді коефіцієнтів, чинників або критеріїв форми.

Такі морфологічні індекси дають змогу стандартизовано оцінювати частинки з нерегулярною формою, що є особливо важливим при розробці матеріалів з прогнозованими властивостями. Зокрема, вони широко використовуються у порошковій металургії, фармацевтичній технології, гірничій справі та

нанотехнологіях, де форма частинок істотно впливає на фізико-хімічні та експлуатаційні характеристики кінцевих продуктів. [1].

Знання форми частинок необхідне при проектуванні технологічних пристроїв виробництва та переробки дисперсних систем (зادля розрахунку швидкості осадження частинок різної форми). Переходячи від розмірів окремих частинок до характерних параметрів систем у цілому, виділяють: умовні усереднені параметри – квадратичний, кубічний, середній арифметичний діаметри частинок, медіанний діаметр, медіана розподілу маси частинок, зовнішня поверхня, повна поверхня, питома поверхня дисперсної фази. Повною характеристикою дисперсного складу при цьому виступає функція розподілу частинок за масою, об'ємом, поверхнею й ін. Сучасні методи аналізу забезпечують визначення таких параметрів. Наразі відомі більше 160 методів аналізу, які засновані на різних принципах перетворення інформації. Враховуючи різноманітність та численність методів, задля отримання інформації про параметри дисперсних систем, слід обрати метод аналізу, який би щонайповніше відповідав вимогам споживача. Для цього проведемо класифікацію методів.

Будемо виходити з наступних міркувань: фізична суть методу; спосіб отримання інформації; діапазон розмірів частинок. При цьому будемо віддавати перевагу такому методу, який дозволить розробити систему з високою точністю.

Пропонуємо уточнену класифікацію методів аналізу дисперсного складу (рис. 1.1), яка поділяє існуючі методи на два класи: інтегральні – дають інформацію про усереднений статистичний параметр; диференціальні – дають інформацію про результати вимірювань параметрів поодиноких частинок. У свою чергу, інтегральні методи поділяються на дві групи – селективних та методів, що засновані на взаємодії з об'ємом дисперсних систем.

Інтегральні методи характеризуються низькою точністю та швидкодією, це обмежує їх використання у системах експрес-контролю та оперативного управління дисперсним складом у технологічних процесах.

Диференціальні методи розподіляють на три підгрупи. У першу входять методи, які засновані на механічній взаємодії рухомих частинок порошку з

чутливими елементами первинних перетворювачів (ПП), які забезпечують отримання сигналу про розміри частинок у результаті удару, у другу – методи, які засновані на взаємодії частинок порошку з електромагнітним випромінюванням, й у третю – методи, які засновані на взаємодії частинок з електричним полем.

До першої групи методів відносять методи, які використовують п'єзоефект [6]. Суть методу у тому, що на п'єзокристал прямує потік частинок з певною швидкістю. У результаті механічного збудження п'єзокристалу генерується імпульс струму, при цьому параметри пропорційні масі частинки й швидкості зустрічі її з поверхнею кристалу. За постійної швидкості частинок в момент удару амплітуда імпульсів буде пропорційна масі частинок. Надалі отримують певні статистичні параметри, які й характеризують дисперсний склад. У якості недоліків методу відзначають неможливість простими засобами забезпечити стабілізацію швидкості всього діапазону мас частинок. Використання методу також обмежене високим порогом чутливості (понад 1мм) [5].

Друга група методів розподіляється також на оптичні й електронні, перші використовують електромагнітне випромінювання видимого діапазону спектру, другі – потік електронів. Оптичні методи діляться на візуальні та фотоелектричні. око спостерігача є детектором у візуальних методах, а у фотоелектричних – світлоприймач, це перетворює енергію електромагнітного випромінювання у електричні сигнали. Найбільш ефективними задля визначення розміру частинок являються методи, які засновані на розсіянні світла такого ж порядку, що й довжина хвилі падаючого випромінювання [5].

Основою індукційного методу є визначення заряду, який індукється на електроді у вигляді кільця, коли крізь нього рухаються заряджені частинки. Зарядка частинок при цьому відбувається під дією коронного розряду. Такий метод особливо ефективний при аналізі крупних частинок.

Метод, який заснований на змінюванні електропровідності двофазного середовища при проходженні через мікроотвір зважених частинок, отримав назву кондуктометричного. Суть його у тому, що електропровідність гетерогенних середовищ має залежати від дисперсного складу частинок. Кондуктометричний

метод є одним з найбільш точних. Перевагою його є висока швидкість та відсутність залежності матеріалу частинок від оптичних властивостей. До недоліків методу відносять невеликий діапазон розмірів частинок, аналізованих одним капіляром, засмічення мікроотвору каналу датчика та необхідність його очищення.

Найбільш перспективним, експресним та інформативним вважається фотоелектричний та кондуктометричний методи.

1.2. Методи підготовки проби

Етапи виконання диференціального методу: відбір проби, підготовки її, подача частинок у зону аналізу первинного перетворювача (ПП).

Відбір проби відбувається при статичному стані системи, чи при її русі у потоці дисперсного середовища. На періодичність відбору проб впливають вимоги технологічного процесу. Відбір проби може здійснюватися різними шляхами у залежності від виду дисперсної фази. Задля виконання відбору проби використовують різні пристрої – місткості, огорожні пристрої пневматичного або гідравлічного типів [3].

Існують методи руйнування агрегатів, класифікація яких наведена на рис.1.1.

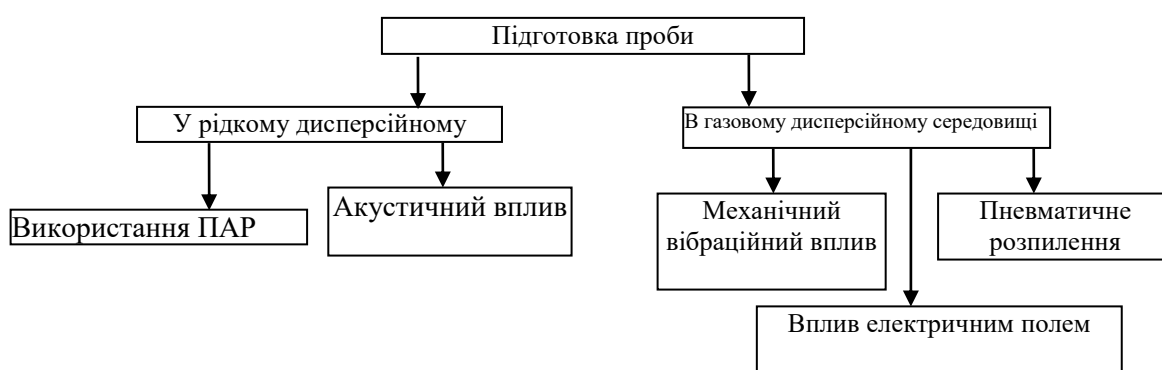


Рис. 1.1. Класифікація методів руйнування агрегатів

Аналіз пристроїв підготовки проби свідчить, що досягнення потрібного результату не можливе неповним руйнуванням агрегатів.

Під час аналізу дисперсного складу інтегральними методами пробу, як правило, вводять у зону аналізу вручну або за допомогою простих механізмів — живильників чи дозаторів. У разі використання диференціальних методів аналізу, вимоги до систем подачі проби істотно зростають. Це зумовлено необхідністю забезпечення упорядкованого, послідовного надходження частинок до зони дії первинного перетворювача, що потребує більш складної технічної реалізації.

Для досягнення таких умов застосовують різноманітні способи формування контрольованого потоку частинок. Зазвичай це передбачає введення частинок у відповідне дисперсійне середовище (газоподібне, рідке чи інше), а потім транспортування утвореної системи в зону аналізу. Фокусування потоку досягається за допомогою пневматичних, гідродинамічних, механічних або електричних методів, що дозволяє мінімізувати флуктуації та забезпечити високу точність диференціального вимірювання.

Такі підходи є критично важливими в прецизійних аналітичних системах, де необхідна не лише достовірна оцінка розміру частинок, але й стабільність умов вимірювання для порівнянності результатів. Механічне фокусування відбувається звуженням каналу, по якому поступають частинки й як правило являється попереднім для решти способів фокусування. Формуванням коаксіальних потоків рідини або газу здійснюється пневматичне та гідродинамічне фокусування, при цьому зовнішній потік чистого газу або рідини рухається з більшою швидкістю, ніж внутрішній потік з досліджуваними частинками.

Електричне фокусування відбувається у повітряному середовищі під дією неоднорідного електричного поля на аналізовані частинки. Формується таке поле спеціальними профільованими електродами еліпсоїдної чи овальної форми, подачею на них високої напруги постійного струму, імпульсної або синусоїдальної форми чи їх комбінацією.

Таким чином, при дослідженні дисперсних систем у газоподібному дисперсійному середовищі найчастіше застосовують електричне поле як засіб впливу на частинки, що дозволяє керувати їх рухом та орієнтацією. Для транспортування частинок у зону аналізу використовують методи пневматичного,

електричного або комбінованого фокусування потоку, що забезпечує стабільність та точність подачі.

У випадку рідкого дисперсійного середовища особливу увагу приділяють руйнуванню агломератів та агрегатів частинок, що є необхідною умовою для достовірного аналізу. З цією метою застосовують методи механічного перемішування або впливу ультразвуковими коливаннями, які сприяють диспергуванню частинок та забезпечують гомогенність системи перед проведенням вимірювань.

1.3. Вимірювачі диференціальних методів

Первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП), що використовуються в межах диференціальних методів аналізу дисперсного складу, здійснюють перетворення розмірних параметрів частинок у відповідні електричні сигнали, пропорційні їх геометричним або фізичним характеристикам (наприклад, об'єм, маса, площа проекції тощо). Таке перетворення дозволяє здійснювати реєстрацію та подальшу обробку сигналів із використанням автоматизованих засобів контролю та обчислювальних систем.

Основними метрологічними та функціональними характеристиками ПВП є:

- швидкодія — здатність перетворювача оперативно реагувати на зміну сигналу при русі частинок;
- функція перетворення — математична залежність між розмірними параметрами частинки та електричним вихідним сигналом;
- діапазон аналізованих розмірів — межі розмірів частинок, в яких забезпечується точне перетворення;
- методичні похибки — систематичні або випадкові відхилення результатів від істинного значення;
- роздільна здатність — здатність приладу розрізняти частинки зі схожими розмірами;
- чутливість — мінімальні зміни розміру частинок, які можуть бути зафіксовані перетворювачем.

Крім того, важливими є такі показники, як стійкість до зовнішніх збурень, температурна стабільність, надійність в експлуатації та відповідність нормам калібрування. Вибір того чи іншого типу ПВП залежить від характеру дисперсної системи, вимог до точності аналізу та умов експлуатації (наприклад, у лабораторних чи промислових середовищах)..

1.3.1. Вимірювачі на взаємодії з випромінюванням

Найбільш поширеним методом серед оптичних є мікроскопічний метод аналізу часточок, які розташовані на наочному склі. Перевага його – пряме спостереження, визначення форми, можливість вимірювання розмірів. Поріг чутливості залежатиме від довжини хвилі випромінювання й складає

0,3 – 0,5 мкм у білому світлі;

0,12 – 0,2 мкм в ультрафіолетовому світлі;

0,0006 – 0,001 мкм у потоці електронів.

Розроблені безліч варіантів телевізійних та оптико-механічних методів аналізу на основі мікроскопічного методу, у яких в якості чутливого елемента використовують різні фотоприймачі, наприклад фотодіоди і прилади із зарядовим зв'язком. Як недолік мікроскопічного методу відзначають трудомісткість й складність підготовки проби задля аналізу, необхідність підстроювання фокусної відстані за вимірювання дрібних (< 10 мкм) та крупних (>100 мкм) часточок.

Серед методів аналізу дисперсного складу особливу увагу привертають фотоелектричні методи, засновані на явищі поглинання або екранування світлового потоку частинками, що проходять через зону аналізу. Ці методи, відомі також як тіньові методи, дозволяють реалізувати високошвидкісні первинні вимірювальні перетворювачі, здатні працювати в широкому діапазоні розмірів частинок.

Перевагою фотоелектричних методів є їхня здатність забезпечувати безперервний контроль розмірів часточок у реальному часі з високою швидкістю обробки сигналів. Однак важливо враховувати, що нижня межа чутливості таких систем зазвичай перевищує 2 мкм, що обмежує їх застосування для нанодисперсних та субмікронних систем.

До цієї підгрупи належать вимірювальні прилади, які функціонують на принципах щілинної спектрофотометрії. Її суть полягає у фіксації зміни інтенсивності світлового потоку, який проходить через вузьку або широку щілину, освітлену джерелом електромагнітного випромінювання. Частинки, що рухаються крізь цю освітлену зону, створюють тінь, проекція якої сприймається фотоприймачем, розташованим за щілиною. Залежно від форми, розміру та кількості частинок, змінюється сигнал, що дозволяє оцінити їх морфометричні параметри.

Удосконалення таких систем часто передбачає використання лазерних джерел випромінювання, високочутливих фотодетекторів, а також автоматизованого оброблення сигналів, що розширює діапазон застосування фотоелектричних методів у матеріалознавстві, фармацевтиці, екології та інших наукоємних галузях. (рис.1.2). У якості джерела випромінювання використовують лампу розжарювання чи джерело когерентного монохроматичного випромінювання (для прикладу лазер або лазерний діод). Фотоприймачем (ФП) є фотодіод, фототранзистор, лінійка фотодіодів.

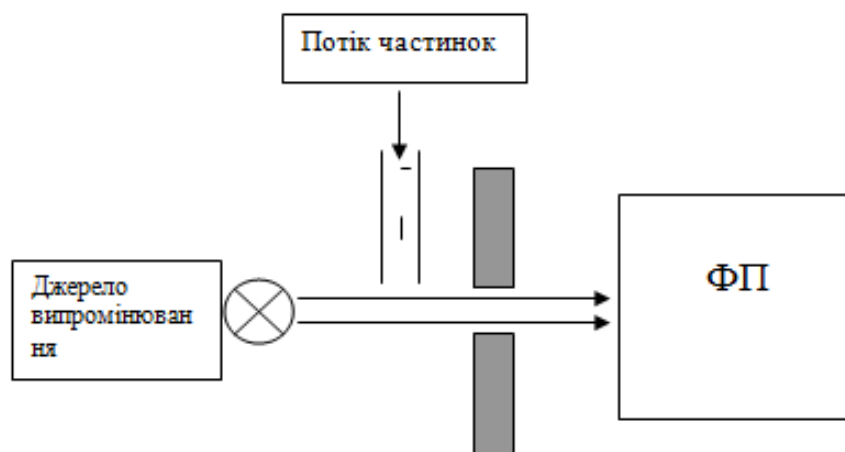


Рис. 1.2. Вимірювачі на основі методу щілинної спектрофотометрії

До цієї ж підгрупи відносять перетворювачі, що засновані на методах вимірювання розсіяного частинками світла під різними кутами ($0 \dots 180$ градусів), це дає можливість визначати й розміри частинок. У таких вимірювачів також у якості

чутливих елементів використовують – фотодіод, фототранзистор, матрицю фотоелементів. Метод використовують задля аналізу частинок від 0,1 мкм до 20 мкм. Перевагою може служити можливість експресного вимірювання великої вибірки частинок. У якості недоліку відзначають залежність параметрів відображеного випромінювання від матеріалу частинок й невеликий діапазон аналізованих розмірів.

1.3.2. Кондуктометричний перетворювач

Кондуктометричний метод ґрунтується на вимірюванні змін електропровідності електролітної суспензії, що містить дисперсні частинки, під час їх проходження через мікроотвір (капіляр), який має попередньо задані геометричні параметри. По обидва боки мікроотвору розміщують електроди, підключені до джерела постійної або змінної напруги. У такій системі створюється стабільне електричне поле, через яке проходять частинки, піднесені потоком рідини.

Коли окрема частинка проходить через мікроотвір, вона частково витісняє електропровідний розчин, чим спричиняє короткочасне локальне підвищення електричного опору між електродами. Це, у свою чергу, викликає короткий спад струму в електричному колі, що реєструється як імпульс напруги на опорі навантаження. Амплітуда цього імпульсу пропорційна об'єму частинки, яка спричинила зміну.

Такий підхід дозволяє не лише підраховувати кількість частинок у заданому об'ємі, а й оцінювати розподіл їх за об'ємними характеристиками. Метод демонструє високу точність у діапазоні від приблизно 0,5 до 400 мкм, і тому активно застосовується в медико-біологічних дослідженнях (наприклад, для підрахунку клітин крові), а також у фармацевтичній і харчовій промисловості.

Серед переваг — висока роздільна здатність, можливість роботи з малими об'ємами проб і здатність до автоматизації. Водночас недоліками є вимога до електропровідного середовища та чутливість до шумів і агрегованих частинок, які можуть змінювати форму сигналу. [4]. Проаналізуємо принцип дії кондуктометричного вимірювача. У стінці закритої скляної пробірки 1 (рис. 1.3)

мається круглий мікроотвір 2. Пробірку, що заповнена електролітом, опускають у стакан 3 з суспензією досліджуваних часточок у електроліті. Від джерела постійної напруги 4 крізь опір навантаження R_n , електроди 5 та 6 й мікроотвір протікає постійний струм. Якщо кран 7 відкритий, зовнішнє джерело розрідження 8 піднімає ртуть у правому коліні U-утворюючого манометра 9 й опускає її у лівому. Далі кран закривають. Оскільки стовпчик ртуті виведений з рівноваги під дією сили тяжіння прагне вирівнятися, тому досліджувана суспензія засмоктується із стакана крізь мікроотвір до пробірки.

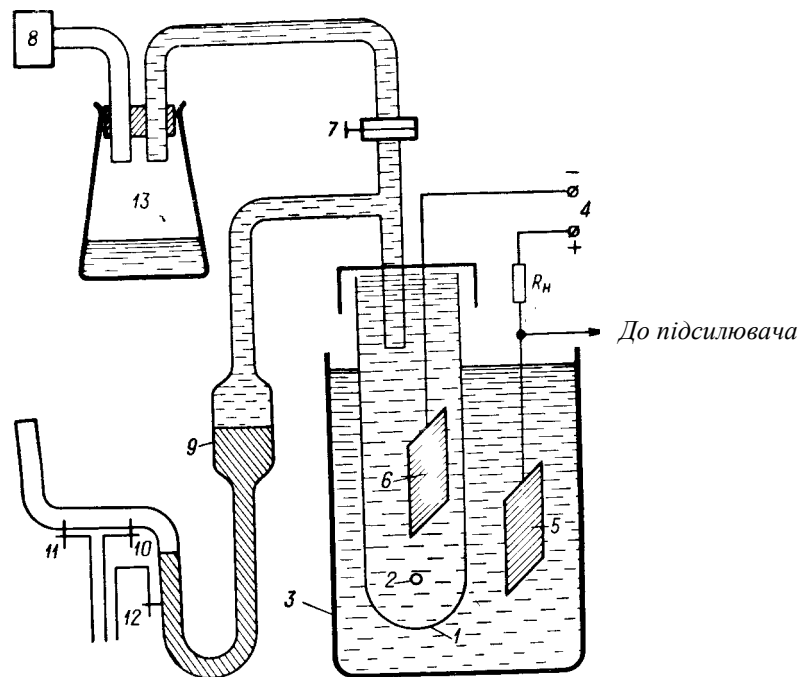


Рис. 1.3. Кондуктометричний перетворювач:

1—пробірка; 2 — мікроотвір; 3—стакан; 4—джерело постійної напруги; 6 — електроди; 7 — кран; 1 — зовнішнє джерело розрідження; 9 — U-утворюючий манометр 10—12 — контакти; 13 — розділова ємність.

Стовпчик ртуті, який піднімається у лівому коліні манометра, при замиканні контакту 10 включає при цьому лічильник приладу, при замиканні контакту 11 відповідно вимикає його. Відстань між контактами 10 та 11 визначає дозу аналізованої суспензії. Після закінчення циклу відліку, кран 7 знов відкривають й ртуть у правому коліні манометра знову піднімається. Відпрацьована суспензія зливається у ємність 13.

Так як сигнал від частинки пропорційний її об'єму, тому діапазон аналізованих розмірів визначається за відношенням 1:32 за діаметром, це є недоліком кондуктометричного методу. Перевагою методу є точність визначення об'ємів часточок незалежно від їх оптичних властивостей матеріалу, щільності та маси.

1.3.3. Імпульсні перетворювачі

Імпульсні методи об'ємної гранулометрії базуються на фізичній залежності між геометричними параметрами частинки та її електричною ємністю. Загальний електричний заряд, що може бути переданий частинці за умови прикладеного потенціалу, є функцією її розміру, зокрема об'єму або площі поверхні.

Принцип дії імпульсних перетворювачів можна проілюструвати на прикладі експериментальної схеми з плоским конденсатором. Частинки, що підлягають аналізу, розміщуються на нижній пластині конденсатора, після чого між пластинами подається висока напруга — зазвичай у межах 5–10 кВ. У результаті цього частинка заряджається і під дією електростатичних сил відривається від поверхні, переміщуючись у напрямку верхньої пластини. У момент руху між пластинами частинка виступає як дискретний носій заряду, що викликає короткочасний струмовий імпульс у зовнішньому електричному колі.

Коли частинка досягає верхньої пластини, відбувається її перезарядження, і в колі фіксується імпульс струму, амплітуда якого прямо пропорційна об'єму або ефективному розміру частинки. Таким чином, можна не лише реєструвати присутність частинок, але й оцінювати їхній розмірний розподіл.

Завдяки високій чутливості до об'ємних характеристик частинок, імпульсні методи знаходять застосування в дослідженнях високодисперсних систем, зокрема у фізиці аерозолів, контролі чистоти технологічних середовищ, а також у фундаментальних дослідженнях електростатичних властивостей частинок різної природи. Однак для точного вимірювання необхідна ретельна калібровка обладнання та дотримання стабільних умов електричного поля. (рис. 1.4).

Перевага методу у його експресності, а недолік - високий поріг чутливості.

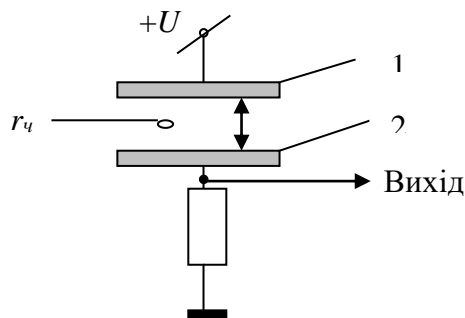


Рис.1.4. Імпульсний перетворювач

1.3.4. Індукційний перетворювач

У основу індукційного перетворювача покладено визначення індукованого на електроді 1 вимірювальної камери 2 заряду, який виникає при русі крізь камеру заряджених часточок дисперсної фази (рис. 1.5).

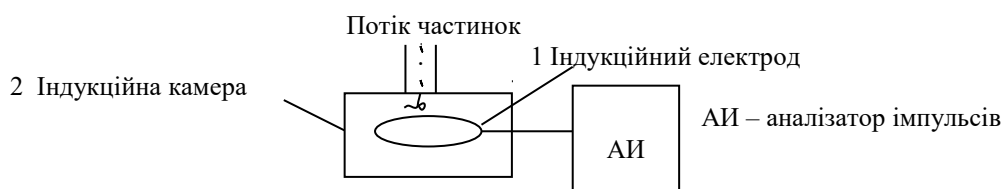


Рис. 1.5. Індукційний метод аналізу

Серед основних недоліків імпульсного методу об'ємної гранулометрії слід відзначити технічну складність досягнення граничного зарядового стану частинок, що є критичним для забезпечення відтворюваності результатів. У ряді випадків повна зарядка частинок може не реалізуватися через неоднорідність їх фізико-хімічних властивостей або вплив зовнішніх факторів, таких як вологість та температура.

Крім того, чутливість методу залишається обмеженою, особливо для частинок малого розміру, оскільки величина електричного сигналу, індукованого ними, може бути недостатньою для достовірної реєстрації. Це звужує сферу ефективного застосування методу для нанодисперсних систем або систем з широким розподілом частинок за розміром.

Ще одним суттєвим обмеженням є необхідність індивідуального градування (калібрування) для кожного типу матеріалу, оскільки електрофізичні характеристики (наприклад, діелектрична проникність, форма частинок, електропровідність) істотно впливають на параметри заряду та, відповідно, на сигнал, який реєструється системою. Це підвищує складність практичного використання методу та обмежує його універсальність у багатокомпонентних або гетерогенних середовищах.

1.3.5. П'єзоелектричний перетворювач

П'єзоелектричний метод ґрунтується на використанні ефекту, за якого механічна дія частинок на поверхню п'єзокристалу призводить до виникнення електричних імпульсів. Зокрема, під час зіткнення часточки з п'єзоелементом у матеріалі кристалу формується електричний заряд, амплітуда якого є функцією імпульсу сили удару, а отже, прямо або опосередковано залежить від маси, швидкості та розміру частинки.

Цей метод дає змогу не лише реєструвати факт взаємодії частинки з детектором, а й здійснювати кількісну оцінку енергетичних параметрів частинок, що дозволяє встановити їх розмірний або масовий розподіл. Чутливість п'єзоелектричних систем визначається типом кристалу, його геометрією, частотою власних коливань, а також електронікою обробки сигналу. Метод має певні обмеження, серед яких — чутливість до шумів, необхідність точного калібрування, а також залежність результатів від механічних властивостей самих частинок (наприклад, твердість, еластичність). Через це його застосування найдоцільніше у тих галузях, де частинки мають порівняно стабільні фізичні характеристики — зокрема, в аерозольній техніці, у виробництві порошкових матеріалів або при контролі чистоти в техногенних середовищах. На рис. 1.6 наведена схема п'єзоелектричного методу аналізу дисперсного складу.

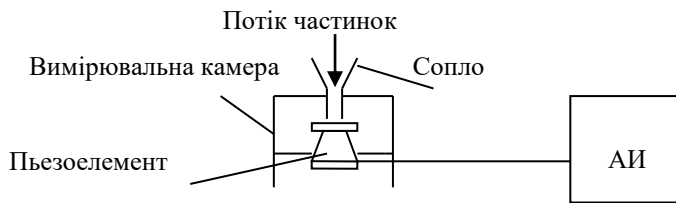


Рис. 1.6. П'єзоелектричний метод аналізу

Таким чином, серед усіх розглянутих диференціальних методів найбільшу цікавість являють фотоелектричний метод сканування щілиною, що придатний для багатьох матеріалів і має великий діапазон аналізованих розмірів (2...500 мкм) та кондуктометричний метод, який забезпечує найбільшу точність.

1.4. Аналіз систем контролю та управління дисперсним складом

Системи контролю дисперсного складу, зазвичай засновані на диференціальних методах й призначені для використання у системах контролю та управління виробництва дисперсних систем. На сьогодні існують тільки окремі прилади задля аналізу аерозолів базовані на щілистій спектрофотометрії у рідині. За кордоном існують кондуктометричні, фотоелектричні зразки, які засновані на дифракційному розсіянні світла, при цьому оснащені мікропроцесорами або ПЕОМ.

Технологічні процеси, пов'язані з виробництвом і переробкою дисперсних систем, характеризуються складною сукупністю взаємопов'язаних операцій, таких як класифікація, змішування, подрібнення, дозування, пресування, термічна обробка тощо. У процесі їх реалізації методи виробництва повинні забезпечувати не лише досягнення заданого фізико-хімічного складу системи, але й формування оптимальних морфологічних і структурних характеристик, які в подальшому визначають якість кінцевої продукції.

Якість готових виробів, виготовлених із дисперсних систем, значною мірою зумовлюється дисперсним складом, формою та структурою частинок, а також функцією їх розподілу за розмірами. Саме ці параметри відіграють ключову роль у визначенні таких властивостей, як механічна міцність, пористість, реакційна здатність, термічна стабільність та інші технологічно значущі характеристики.

У даний час на практиці у значній мірі переважає ручний контроль з відбором проб та проведенням лабораторного аналізу [3]. Подібний контроль вимагає великих часових, матеріальних та людських ресурсів. Для прикладу, на збагачувальних фабриках флотацій кількість працівників, які зайняті на відборі та обробці мінералогічних й технічних проб, складає до 31% від загального числа. У процесах виробництва та переробки багатокомпонентних сумішей та шихт число відбору проб зростає у декілька разів. Аналогічна ситуація спостерігається у порошковій металургії, абразивній, скляній, будівельній та ін. галузях.

Керування дисперсним складом у технологічних системах зазвичай здійснюється шляхом регулювання параметрів процесу, що виконується вручну на основі періодичних лабораторних аналізів. Тривалість таких аналізів, як правило, становить від кількох до десятків хвилин, що суттєво обмежує оперативність прийняття рішень та ефективність поточного контролю.

Унаслідок цього в більшості випадків забезпечення стабільної якості продукції досягається не шляхом безперервного коригування дисперсного складу, а через стабілізацію ключових технологічних параметрів (таких як швидкість подрібнення, тривалість обробки, температура, вологість тощо), які опосередковано впливають на формування розмірного розподілу частинок.

Такий підхід, хоча й не дозволяє оперативно реагувати на зміну характеристик сировини або зовнішніх збурень, забезпечує відносну сталість процесу при достатньо добре вивчених умовах. Однак із розвитком сенсорних технологій та систем автоматичного контролю дедалі актуальнішою стає розробка високочастотних або безперервних методів аналізу дисперсного складу, які дозволять реалізувати принципи адаптивного або навіть інтелектуального керування технологічними процесами. Схема управління технологічним процесом виробництва наведена на рис. 1.9

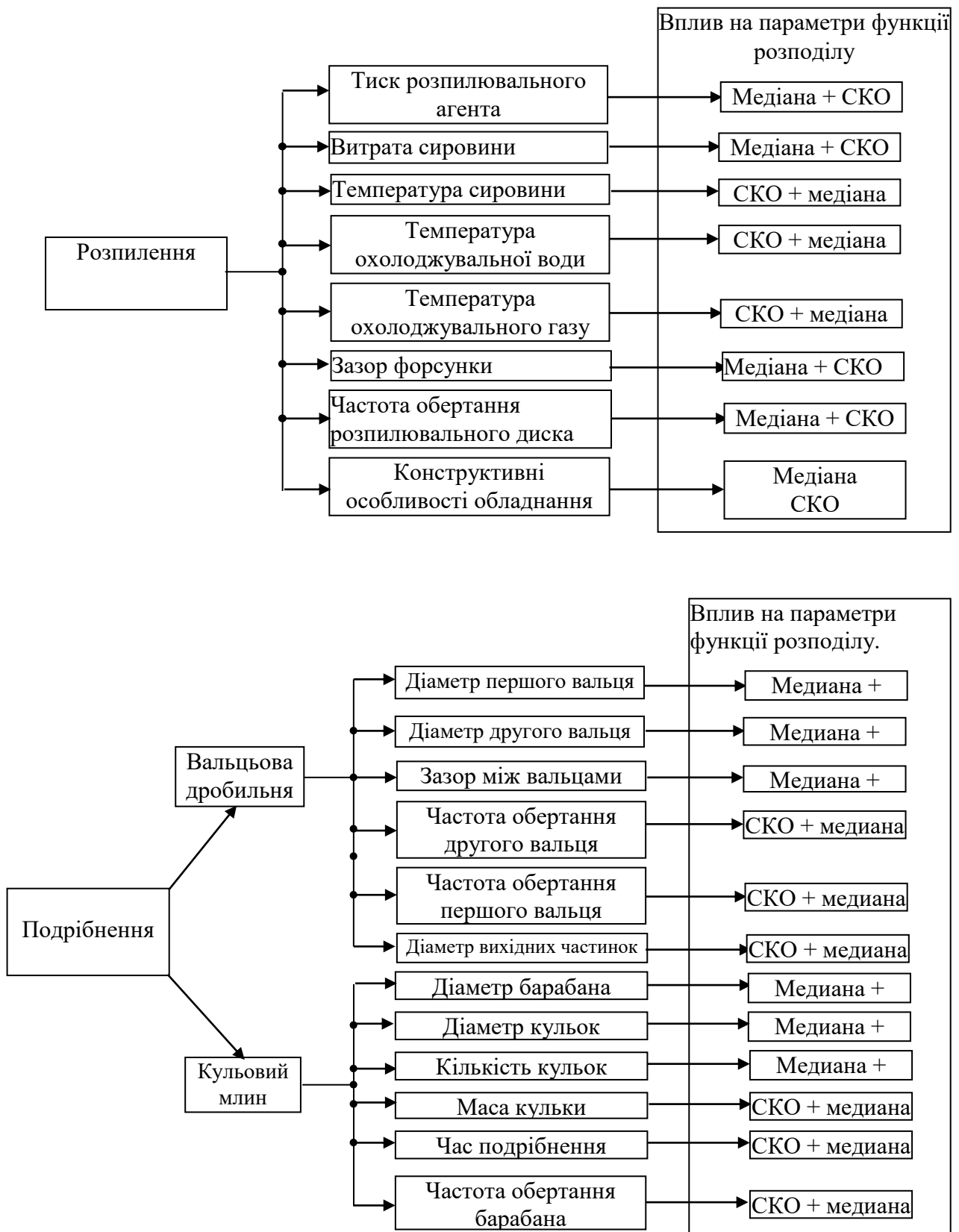


Рис. 1.8. Види керуючих дій та їх вплив на параметри функції розподілу

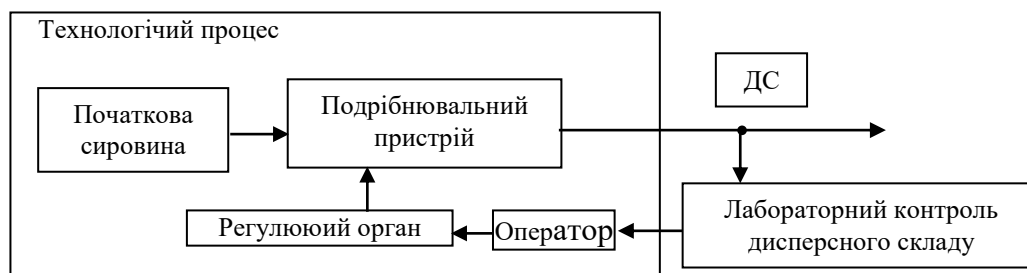


Рис.1.9. Схема управління ТП

Оперативність управління у такій схемі не задовольняє вимоги технологічного процесу й якість управління не досягається. Окрім того, якість контролю дисперсного складу та його швидкодія не задовольняють запитам технології. Недостатній рівень розвитку систем оперативного керування дисперсним складом значною мірою зумовлений відсутністю ефективних експрес-методів контролю, здатних забезпечувати як швидкий лабораторний аналіз, так і інтеграцію в автоматизовані системи керування технологічними процесами в режимі реального часу.

Наявні методи зазвичай потребують тривалого збирання проб, їх підготовки та обробки, що унеможлиблює безперервний моніторинг параметрів розмірного розподілу частинок без зниження загальної ефективності виробництва. Унаслідок цього процеси керування часто здійснюються з великим часовим запізненням, що спричиняє втрати якості продукції та зниження ресурсної ефективності.

Таким чином, розробка та впровадження високошвидкісних і надійних засобів контролю дисперсного складу є актуальним напрямом у галузі хімічного машинобудування, порошкової металургії, фармацевтичної технології та інших виробництв, де властивості кінцевої продукції критично залежать від характеристик дисперсної фази.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛІЗАТОРА

2.1. Структура моделі аналізатора

Різноманіття конструктивних підходів до створення аналізаторів дисперсних систем, що функціонують на основі вимірювання параметрів окремих частинок, у поєднанні зі значними часовими та матеріальними витратами на розробку та випробування дослідних зразків, зумовлює необхідність упровадження сучасних наукових засад системного аналізу та синтезу, а також використання інструментів автоматизованого проектування.

У такому контексті аналізатор доцільно розглядати як інформаційно-вимірювальну систему (ІВС), яка виконує функції збору, обробки та представлення даних про дисперсні характеристики досліджуваного середовища. Застосування системного підходу до проектування ІВС дозволяє цілісно враховувати всі ключові компоненти системи: об'єкт керування, сенсорні пристрої збору первинної інформації, засоби обробки та інтерпретації даних, а також вимоги кінцевого користувача щодо точності, форми подання та інтервалів оновлення інформації.

Такий інтегрований підхід значно підвищує ефективність розробки, дозволяє оптимізувати архітектуру аналізаторів відповідно до специфічних умов експлуатації та забезпечує адаптивність системи до змінних параметрів технологічного процесу. Судячи із класифікації інформаційно-вимірювальних систем [7], аналізатор дисперсних систем відносять до керуючих інформаційних систем. За розробки таких систем слід формувати їх математичні та інформаційні моделі. Таким чином, процес проектування аналізатора дисперсного складу повинен охоплювати розробку математичних моделей ключових функціональних вузлів системи, а також побудову інформаційної моделі, яка комплексно описує усі етапи взаємодії з об'єктом контролю — тобто з частинками дисперсної системи.

Інформаційна модель має враховувати:

- отримання первинної числової інформації про параметри окремих часточок;
- транспортування цієї інформації між функціональними блоками системи;
- перетворення та обробку даних із використанням чисельних методів для виділення статистично значущих характеристик (наприклад, середній діаметр, дисперсія, форма розподілу тощо);
- розрахунок керуючих параметрів, необхідних для інтеграції аналізатора в замкнені або відкриті системи автоматичного керування технологічними процесами.

Застосування такого підходу забезпечує не лише точність та достовірність оцінки дисперсного складу, але й адаптивність системи до умов реального виробництва, підвищуючи ефективність керування якістю кінцевого продукту. Так як до найбільш інформативних характеристик дисперсного складу відноситься функція розподілу часточок за розмірними параметрами, то й оцінкою отримання про неї максимально достовірної інформації виступає квадрат мінімальної різниці між отриманою стандартизованими методами функцією розподілу ДС $F_c(\delta)$ та функцією $F_a(\delta)$ отриманою за використання аналізатора. Отже, цільову функцію аналізатора можна представити у вигляді:

$$\Phi_A = \min \left[\int_0^{\infty} [F_c(\delta_i) - F(\delta_i)]^2 d\delta \right] = \min \int_0^{\infty} [f_c(\delta_i) - f_a(\delta_i)]^2 dx,$$

де $F_c(\delta_i)$, $F_a(\delta_i)$ – функції розподілу часточок за розмірами δ ;

$f_c(\delta_i)$, $f_a(\delta_i)$ – щільність вірогідності, яка отримана відповідно стандартизованими методами з використанням аналізатора.

$f(\delta)$

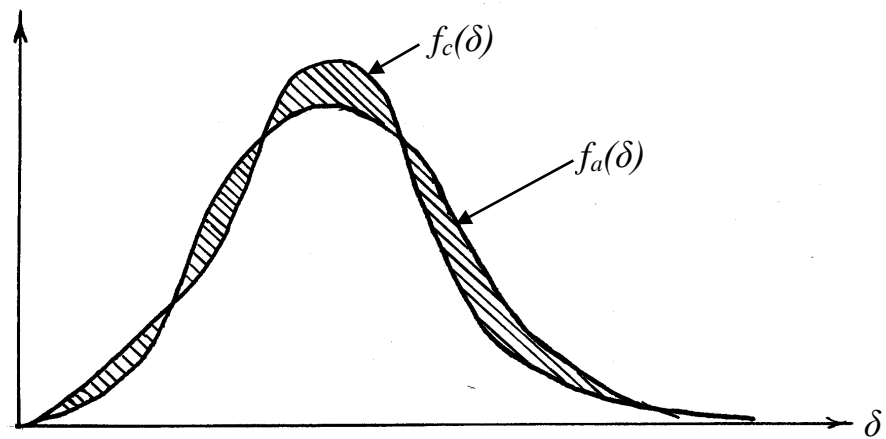


Рис 2.1. Геометричне представлення цільової функції аналізатора

Отже, цільова функція аналізатора це інтегральне відхилення експериментальних даних від дійсної функції розподілу, а її геометричне представлення є площею смуги відхилення між функціями розподілу $F_c(\delta_i)$ та $F_a(\delta_i)$ (рис. 2.1).

З урахуванням проведеного аналізу існуючих методів та засобів контролю дисперсного складу, доцільно перейти до побудови відповідних структурно-функціональних та інформаційних моделей, які відображають властивості систем і пристроїв, що реалізують вимірювальні та аналітичні функції.

При цьому за основу моделювання прийматимемо припущення, що кожен елемент системи виконує автономну функцію, здатен діяти незалежно в межах своїх технічних характеристик і забезпечує виконання необхідних операцій для отримання достовірної, статистично обґрунтованої інформації про параметри дисперсного складу.

У процесі побудови моделей буде враховано особливості агрегатного стану контрольованих систем, зокрема найбільш поширені в практиці — порошкові, суспензійні та аерозольні форми. Кожен із цих станів вимагає специфічного підходу до реалізації подачі проби, її диспергування, фокусування та реєстрації характеристик частинок, що буде відповідним чином відображено в структурі побудованих моделей.

Таке моделювання є основою для подальшого розроблення оптимальних архітектур аналізаторів, алгоритмів обробки сигналів та інтеграції систем контролю до технологічних ліній сучасного виробництва. За використання системного підходу наведемо наступну схему (рис.2.2), яка складається з трьох самостійних функціональних частин.

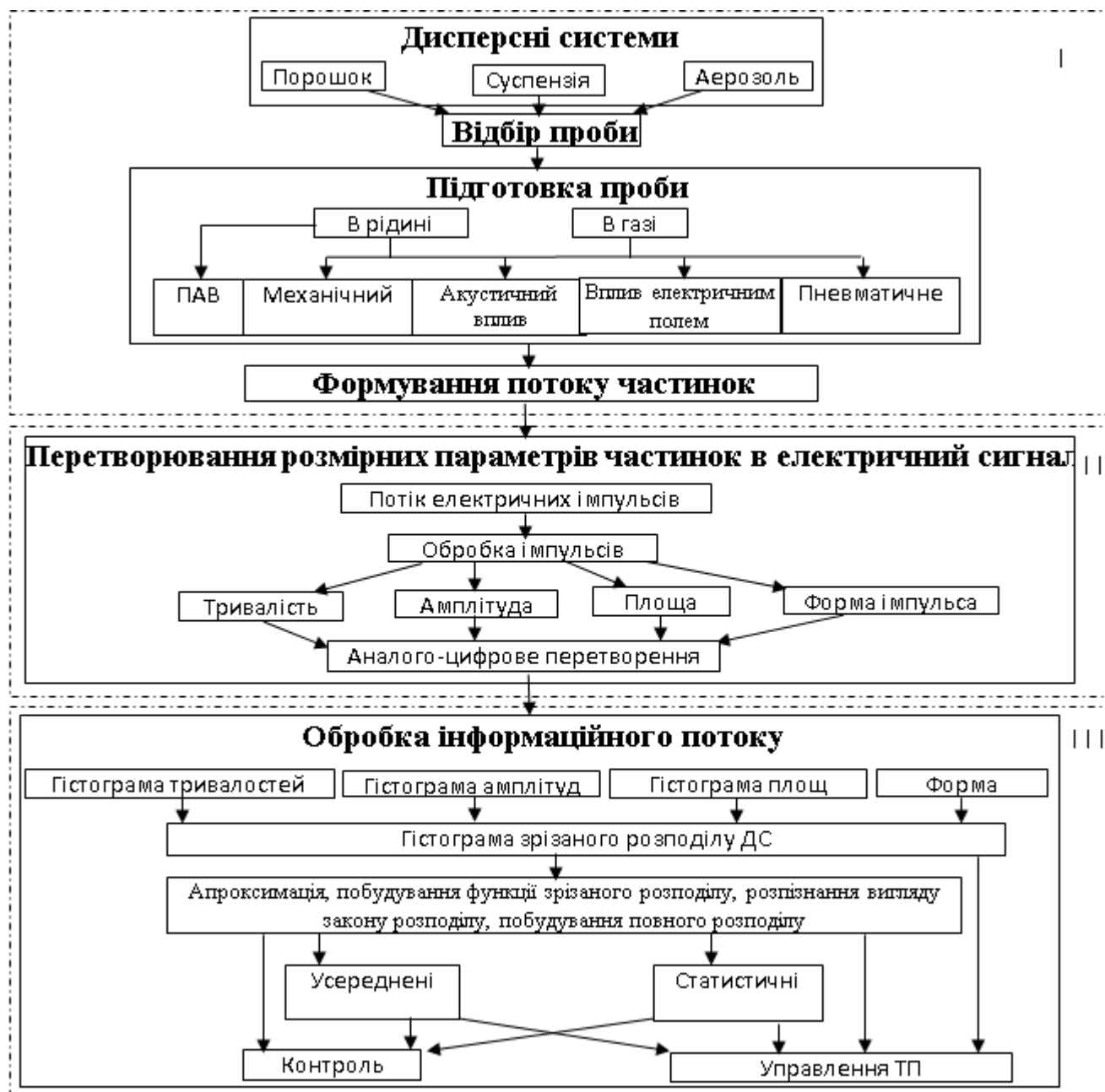


Рис. 2. Схема розподілу матеріальних і інформаційних потоків при аналізі дисперсного складу ДС

Формування матеріального потоку часточок здійснюється у першій частині, у другій - перетворюються розмірні параметри часточок у аналогові електричні сигнали, надалі вони перетворюються у цифрову форму, а у третій частині відбувається перетворення та обробка інформаційного цифрового потоку.

Переходячи до структурної схеми аналізатора, її також можна представити у вигляді 3х блоків, а окремі вузли аналізатора виконують при цьому операції, які здійснюються цими блоками (рис. 2.3). Процес функціонування аналізатора дисперсного складу умовно можна розділити на три основні функціональні блоки, кожен з яких реалізує певний етап обробки інформації про частинки. Перший блок виконує функції транспортування та подачі дисперсної фази до зони аналізу, забезпечуючи послідовне або контрольоване надходження окремих часточок у вимірювальну область. Реалізація цієї функції залежить від агрегатного стану системи (порошок, суспензія, аерозоль) і передбачає використання відповідних механізмів диспергування, дозування, фокусування тощо. Другий блок відповідає за перетворення розмірних характеристик кожної часточки в електричний сигнал, що є пропорційним до її геометричних параметрів. Надалі цей аналоговий сигнал оцифровується, готуючи його до подальшої цифрової обробки. На цьому етапі реалізуються функції первинного вимірювання, калібрування та аналого-цифрового перетворення. Третій блок забезпечує обробку отриманого потоку цифрової інформації, що містить дані про індивідуальні частинки. У межах цього блоку здійснюється розрахунок статистичних параметрів дисперсного складу (середні діаметри, дисперсія, функція розподілу тощо), а також формування інформаційного масиву, придатного для подальшого використання у системах моніторингу та автоматичного керування технологічними процесами. Ця структурована побудова дозволяє ефективно розподіляти функціональні навантаження між модулями системи та адаптувати аналізатор до специфіки конкретного технологічного середовища.

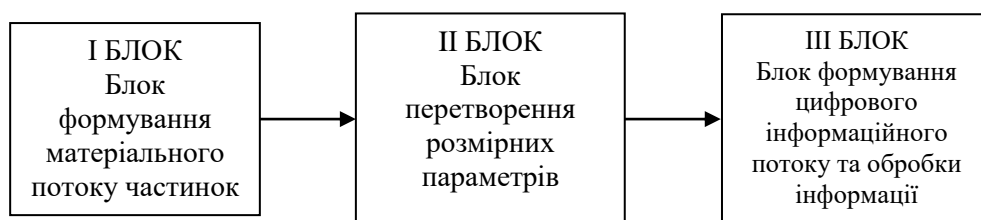


Рис. 2.3. Блок-схема аналізатора

Математична модель аналізатора являє собою систему рівнянь, яка описує ці блоки. Математична модель першого блоку аналізатора включатиме рівняння пристрою підготовки проби (УПП), пристрою відбору проби (УОП), пристрою подачі часточок до зони аналізу. Математична модель другого блоку включає перетворювач, який має забезпечувати узгодження рівнів сигналів перетворювачів та аналого-цифрового перетворювача (АЦП). У другому блоці може бути застосований функціональний перетворювач (ФП), а також аналогові або цифрові пристрої вибірки-зберігання (УВХ). Третій блок являє собою пристрій цифрової обробки сигналів, який забезпечує розрахунок параметрів.

2.2. Моделювання матеріального потоку часточок

До блоку формування матеріального потоку часточок входить УОП проби досліджуваної системи, яка виконує відбір, УПП готує проби, УПЧ здійснює поодинокую подачу часточок до зони аналізу (рис.2.4).

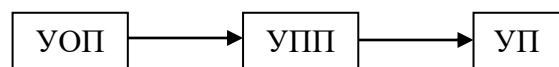


Рис.2.4. Структурна схема формування блоку матеріального потоку часточок

2.2.1. Математична модель УОП

Основною вимогою до УОП виступає забезпечення показності проби, а під цим розуміється вміст у ній всіх часточок, які складають дану статистичну сукупність [7]. Відбір проб регламентується відповідними галузевими або державними стандартами[4]. У більшості випадків, пробу характеризують певною масою або масою дисперсної фази з певною концентрацією.

Відбір проб у технологічному процесі може бути безперервним або періодичним, здійснюватися за статичного стану системи чи в потоці дисперсного середовища. У разі відбору суспензій або аерозолів з трубопроводів, вирішальне значення для якості проби мають місце відбору та конструкція пробовідбірника, які повинні мінімізувати спотворення потоку. Вимоги технологічного процесу

визначають періодичність відбору проб. Для прикладу, періодичність відбору проб складає від 10 хвилин до 1 години для збагачувальних фабрик [6].

2.2.2 Математична модель пристрою підготовки проби

У блоці УПП відбувається руйнування агрегатів задля виконання достовірного визначення розмірних параметрів часточок. Руйнування агрегатів відбувається дією сили $F_{pn} > F1$, які викликають агрегацію часточок [7].

Достатньою умовою руйнування агрегатів під дією електричного поля [10], є придбання часточками зарядів, достатніх для їх відриву від нижнього електроду та досягнення певної швидкості руху, за якою $F_{pn} > F1$. Відомо, що силами, які викликають аутогезію часточок порошку у повітрі є

$$F1 = FM + FK + FЭ + F_{мз}$$

де FM 0,01.0,1 мкН – сили Ван-дер-Ваальса, які мають молекулярну природу та залежні від природи матеріалу часточок та відстані між ними;

FK 0,01.100 мкН – сили когезійної взаємодії, які мають природу, аналогічну силам, які діють між молекулами у середині часточок;

$FЭ$ – сили електричної взаємодії складаються з кулонівських, або тих, які визначають взаємодію часточок та електричних сил, викликаних різницею потенціалів дотичних часточок, тобто ($FM < FЭ < FK$);

$F_{мз}$ – сили механічного зачеплення, які характерні для часточок неправильної форми.

Таким чином, під час побудови математичної моделі установки подачі проби (УПП) необхідно враховувати умови деструкції агрегованих частинок залежно від впливу зовнішніх сил. З метою аналізу розглянемо процес руйнування агрегатів сухих порошкових матеріалів під дією електричного поля, створеного між плоскими електродами, при цьому порошкова маса розміщується на нижньому електроді (рис. 2.5). Агрегат доцільно уявити у вигляді тетраедричної упаковки, у вершинах якої розташовані рівноймовірні за масою частинки. Руйнування структури агрегату відбувається внаслідок удару об верхній електрод, і для реалізації цього процесу необхідно, щоб кінетична енергія частинок перевищувала сили аутогезії, які утримують їх у складі агрегату. Такий підхід дозволяє врахувати вплив

електродинамічних умов на ефективність диспергування під час подачі проб до зони аналізу. Швидкість v_0 агрегату масою m_{agr} у момент зіткнення описується нерівністю

$$\frac{m_{agr} v_0^2}{2} > W$$

де W – енергія взаємодії між часточками агрегату.

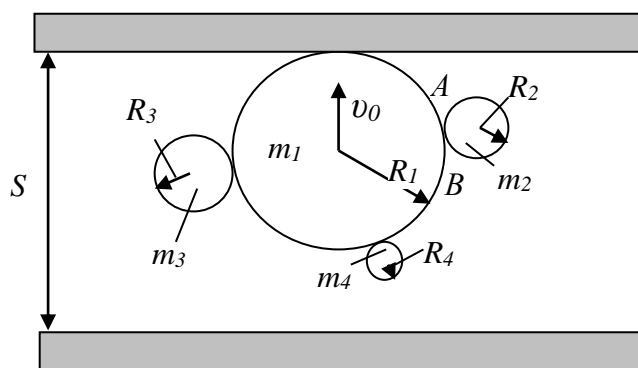


Рис. 2.5. Зіткнення з електродом

Надалі математична модель визначає відстань між електродами та значення електричної напруги, яка прикладається до електродів задля створення необхідної напруженості.

Блок-схема математичної моделі УПП наведена на рис. 2.6.

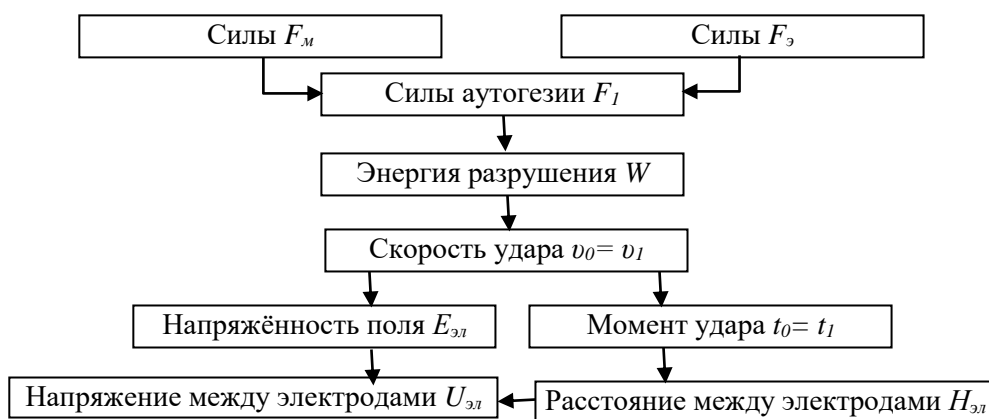


Рис.2.6. Блок-схема УПП

Математична модель УПП визначає необхідне значення напруги, яка прикладається до пластин у залежності від відстані між ними задля забезпечення руйнування агрегатів та фізико-механічних властивостей дисперсних систем.

2.2.3. Математична модель пристрою подачі часточок

Пристрої подачі частинок формують рухомий потік поодиноких частинок і транспортують його до зони аналізу. У разі порошків це здійснюється шляхом псевдозрідження з переходом в аерозоль або введенням у рідке дисперсне середовище, де рух забезпечується надмірним тиском або вакуумом.

Для рідких систем частинки подаються через тонку трубку в кювету (у фотоелектричних методах) або мікрокапіляр (у кондуктометричних методах). У газовому середовищі (за фотоелектричного, індукційного чи п'єзоелектричного аналізу) подача здійснюється через трубку у вимірювальну камеру. Часто трубка має звуження для механічного фокусування.

Щоб зменшити похибки й покращити точність вимірювання, використовують гідро- або пневмодинамічне фокусування, створюючи коаксіальні потоки. Рідина або газ у зовнішній трубці рухається швидше, що формує радіальний градієнт швидкості, орієнтуючи частинки в потоці. Структура потоку залежить від режиму течії за числом Рейнольдса, що впливає на орієнтацію часточок.

Оскільки частинки розподілені випадково, формування потоку забезпечує статистичний характер надходження до зони аналізу, що є важливим для точності вимірювань. Тоді сформулюємо основні вимоги до потоку часточок:

- концентрація часточок у дисперсному середовищі має зводити до мінімуму можливість подачі декількох часточок до зони аналізу одночасно;
- швидкість дисперсного потоку має бути постійною.

Математичну модель УПЧ представимо функціоналом, який описує залежність силової дії (тиск P) на дисперсне середовище задля забезпечення заданої швидкості руху часточок різних розмірів δ до зони аналізу, враховуючи параметри потоку

$$F_{\text{упч}}(P) = f(\delta, x_n, c, p_{\text{сп}})$$

де x_l – швидкість потоку;

c , ρ_{cp} – щільність матеріалу часточок та щільність дисперсного середовища відповідно.

2.3. Моделювання первинних перетворювачів

Первинні перетворювачі аналізу виконують операції перетворення розмірних параметрів окремих часточок у електричний сигнал та є функцією $F = l(x, \delta)$, де F – параметр електричного сигналу; x – швидкість руху часточок до зони аналізу; δ – параметр розмірів часточки.

Математична модель будь-якого перетворювача аналізу дисперсного складу описується функціоналом

$$Y(t) = d [tu(f,k), A(f,k), Su(f,k)]$$

де $Y(t)$ – вектор апріорі невідомих параметрів, які характеризують розмір часточки у довільний момент часу у зоні аналізу;

$tu(f, \delta_0)$ – тривалість імпульсу від часточки;

$A(f, \delta_0)$ – амплітуда імпульсу від часточки;

$Su(f, \delta_0)$ – площа імпульсу від часточки;

δ_0 – коефіцієнт орієнтації часточок у зоні аналізу;

$K\phi$ – критерій форми часточок.

Критерій форми часточок $K\phi$ у свою чергу, також є функціоналом апріорі невідомих параметрів

$$K\phi(r) = v(r_1, r_2, r_3)$$

де r_1, r_2, r_3 – параметри, які характеризують розмір часточки відповідно за вісями X, Y, Z .

Отже, математична модель диференціальних методів є системою рівнянь, що пов'язують амплітуду та тривалість імпульсу з розміром частинок.

Форма частинок впливає на точність аналізу, оскільки моделі базуються на припущенні про сферичну геометрію. Відхилення форми від сферичної призводить до розбіжностей між реальними й розрахунковими даними дисперсного складу.

. Отже, критерієм форми може виступати міра сферичності, яка має значення $K_f=1$, для часточок сферичної форми та монотонно убуває за мірою відхилення форми часточки від сфери. Задля вибору подібного критерію форми, врахуємо екстремальну властивість площі поверхні сферичного тіла, при цьому у якої площа поверхні приймає щонайменше значення серед усіх площ поверхонь, які еквівалентні за об'ємом тіл.

Тоді остаточно критерій форми набуває вигляду

$$K_f = 4,836 \frac{\sqrt[3]{V^2}}{S} \quad (2.1).$$

2.3.1. Математична модель за кондуктометричного методу

Кондуктометричний первинний перетворювач зазвичай є електрохімічною коміркою, що складається з ємності з електролітом, розділеної перегородкою з мікрокапіляром. З обох боків капіляра розташовані електроди, до яких подається постійна напруга. При проходженні суспензії з частинками через капіляр виникає зміна струму, що генерує імпульс сигналу, амплітуда якого пропорційна об'єму частинки.

Залежності для визначення параметрів цих імпульсів здебільшого отримані експериментально й базуються на теорії електропровідності гетерогенних систем. Проте вони не враховують нерівномірний розподіл силових ліній електричного поля, що виникає під час входження частинки в капіляр, і це може спричинити похибки у визначенні її розміру.

Тому при побудові математичної моделі важливо визначити уточнені залежності амплітуди, тривалості імпульсів і фронтів сигналу з урахуванням реальної взаємодії частинки з електричним полем у капілярі. Для цього приймемо такі допущення. Форма часточок – сферична. Положення та геометричні розміри електродів, розмір капіляра будемо вважати відомими. Другий електрод К₂, який розташований симетрично першому, зображений у вигляді прямої GH. На підставі існуючих уявлень про просторовий розподіл електричного поля [8], уявимо електроліт, який знаходиться між електродами, у виді трубок однакового струму чи

провідності, й силові лінії рівної напруженості прямими. Електричне поле усередині капіляра вважатимемо постійними й рівномірними. Водночас краєвими ефектами, що викликані спотворенням електричного поля на торцях капіляра, знехтуємо. Враховуючи такі допущення, визначимо амплітуду імпульсу за руху часточки у капілярі.

Рівень сигналу U_0 при відсутності часточок у електричному полі пропорційний потоку вектора напруженості, який проходить крізь отвір капіляра діаметром MN та рівний

$$U_0 = E_n + I_0(R_n + R_k)$$

де $R_k = \chi \frac{l}{S}$ – опір електроліту за протікання струму крізь капіляр довжиною l

та площею поперечного перетину S ;

χ – питома електропровідність електроліту;

R_n – опір навантаження у ланцюзі перетворювача;

E_n – напруга поляризації (наприклад, для електродів з платини $E_{nn} = 2,2,2,6$ В, для електродів з неіржавіючої сталі $E_{nn} = 1,1,2$ В).

2.4. Моделювання вимірювального каналу аналізатора

Система як цілісна структура передбачає обмін сигналами між її компонентами, що реалізується через аналогові та цифрові інтерфейси.

Аналогові інтерфейси застосовуються від первинного перетворювача (ПП) до аналого-цифрового перетворювача (АЦП). У вимірювальний канал входять: функціональний перетворювач, підсилювач, пристрій вибірки-зберігання та АЦП.

Для коректної обробки сигналів перед АЦП необхідно виконати підсилення та проміжне аналогове перетворення. До складу такого перетворювача можуть входити ІУ та ФП.

У загальному випадку ІУ та ФП відносять до класу функціональних підсилювачів (ФЕ) [7]. Амплітудну функціональну характеристику (ФАХ) підсилювачів у загальному вигляді можна записати як функцію $e = f(n)$ вихідного

ефекту e від вхідної дії n . Фізичну сутність роботи ФЕ найповніше відображає диференціальний коефіцієнт передачі підсилювача, рівний $b = de/dn$.

Коефіцієнт b описують функцією алгебри або трансцендентної.

Любий реальний функціональний підсилювач за достатньо малої вхідної дії n працює у лінійному режимі, а надалі за певного рівня вхідної дії n переходить до функціонального (нелінійного) режиму роботи.

При цьому $b(n) = Kn$ та амплітудна характеристика

$$f(n) = nKn.$$

При n_{nn} ФЕ переходить до функціонального режиму роботи. За роботи підсилювача у функціональному режимі амплітудна характеристика має вигляд [7]:

$$\varepsilon = f(v) = b(v) + C = (v) + C.$$

У якості моделі аналого-цифрового перетворювача було обрано дискретизатор з елементом випадкової затримки, який є достатньо універсальним засобом моделювання, що адекватно відображає особливості роботи будь-якого типу АЦП з зовнішнім запуском.

3 СИНТЕЗ АНАЛІЗАТОРІВ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ

3.1. Аналіз об'єму вибірки

Під час аналізу підходів до визначення обсягу вибірки встановлено, що для достовірної оцінки параметрів дисперсних систем необхідно експериментально побудувати функцію розподілу частинок за розмірними характеристиками на основі обробки відповідної гістограми.

Проте питання обґрунтування мінімально достатнього обсягу вибірки при заданому рівні похибки залишається відкритим. Для його розв'язання пропонується методика, що базується на припущенні про можливість наближення будь-якої функції розподілу через її емпіричні моменти з прийнятною точністю. Необхідний об'єм вибірки N за обчислення емпіричних моментів можна отримати, якщо використовувати їх збіжність за зростання вибірки. А тоді, за безперервного потоку сигналів випадкової величини, отримане значення емпіричного моменту буде прагнути до теоретичного, тобто $\lim_{n \rightarrow \infty} m_k(N) = Ex^k$, звідки

$$|m_k(N+1) - m_k(N)| \leq \varepsilon \quad (3.1)$$

де ε – довільне позитивне мале число;

Ex^k – математичне очікування емпіричного k -го початкового моменту.

Якщо задавати абсолютну похибку ε емпіричного моменту, то процес його обчислення зупиняється за дотримання нерівності (3.1), а тоді кількість випадкових величин, що відповідають умові (3.1), і буде визначати необхідний об'єм вибірки. Алгоритм знаходження об'єму вибірки наведений на рис. 3.1.

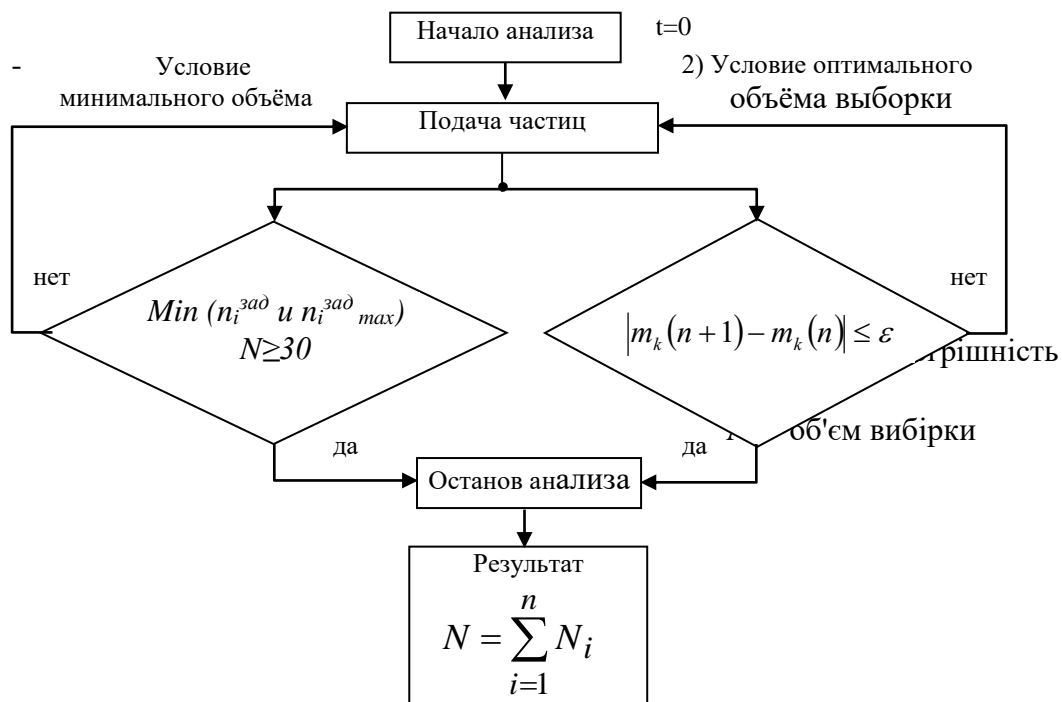


Рис.3.1. Алгоритм визначення об'єму вибірки

Аналіз дисперсного складу є точним за умови урахування похибок вимірювання, які впливають на визначення емпіричних частот через перенесення значень у сусідні інтервали.

При нормальному розподілі похибки та відомому середньоквадратичному відхиленні, ширина інтервалу, що перевищує його утричі, забезпечує компенсацію таких похибок і підвищує достовірність аналізу. Отже, за ширини інтервалу, рівному 3σ , апаратні похибки вимірювання випадкової величини не будуть викликати похибок емпіричних частот гістограми. Отже, найменшу ширину інтервалу DP визначають з рівності

$$DP = P_k - P_{k-1} = 3\sigma \quad (3.2)$$

де P – вимірюваний параметр;

do – номер інтервалу;

σ – середньоквадратична похибка вимірюваного параметра.

Кількість інтервалів визначають вимогою, що межі варіації відрізнялися між собою не менше, ніж на коефіцієнт розмаху

$$D_0 = P_n / P_0$$

де P_0, P_n – ліва й права відповідно межі розмаху варіації.

Перший інтервал при цьому представляє значення розмірів часточок у інтервалі (P_0, P_1) , а останній – у інтервалі (P_{n-1}, P_n) , а тоді максимальне число інтервалів

$$n \geq \frac{\Delta_0(K-1)}{\Delta P} = \frac{\Delta_0(K-1)}{3\sigma} \quad (3.3)$$

де Δ_0 - роздільна здатності методу вимірювання;

ΔP – ширина інтервалу рівного 3σ -ому інтервалу абсолютної похибки.

За відомій максимальній кількості інтервалів, дана методика пропонує обирати необхідне число каналів аналізатора з наступного:

- мінімальна точність аналізованого параметра, обумовлена технологічними вимогами;
- облік діапазону аналізованих розмірів;
- призначення аналізатора;
- простота технічної реалізації.

3.2. Визначення законів дисперсних систем

Існує функція залежності для кожного однопараметричного розподілу другого моменту від першого. Отже, критерій розпізнавання однопараметричного закону представляється у явному вигляді $m_2 = \psi(m_1)$ або у неявному вигляді

$$\Omega_1(m_1, m_2) = 0. \quad (3.3)$$

Ліва частина є критерієм розпізнавання однопараметричного закону за двох перших початкових моментах, а отже, за відомих емпіричних моментах m_1 та m_2 обчислюємо значення функції w_1 . Емпіричний розподіл однопараметричного закону краще згладжується, чим ближче це значення до нуля. Тобто, задля кожного однопараметричного закону існує така двовимірна функція $w_1(m_1, m_2)$, яка приймає при цьому нульові значення тільки задля конкретного закону.

Побудуємо аналогічні функції розпізнавання задля двопараметричних законів.

Аналогічно запишемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 = \phi_{12}(P_1, P_2) \\ m_2 = \phi_{22}(P_1, P_2) \\ m_3 = \phi_{32}(P_1, P_2). \end{array} \right. \quad (3.4)$$

З (3.4) зворотні функції

$$P_2 = \varphi_{12}(P_1, m_1); \quad P_2 = \varphi_{22}(P_1, m_2); \quad P_2 = \varphi_{32}(P_1, m_3).$$

Отримані три рівності можна звести до двох

$$\varphi_{12}(P_1, m_1) = \varphi_{22}(P_1, m_2)$$

$$\varphi_{12}(P_1, m_1) = \varphi_{32}(P_1, m_3).$$

Знаходимо дві зворотні функції

$$P_1 = \xi_1(m_1, m_2), \quad P_1 = \xi_2(m_1, m_3).$$

Прирівнявши праві частини, отримаємо

$$\xi_1(m_1, m_2) = \xi_2(m_1, m_3).$$

Після обчислення параметрів обирають теоретичний розподіл для апроксимації гістограми. Його придатність оцінюють за середньоквадратичним відхиленням між теоретичними й емпіричними частотами.

Найбільш інформативним критерієм є середньоквадратичне відхилення величини на всьому діапазоні, а адекватність розподілу перевіряють за умовами узгодженості.

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_i - \Delta F_i)^2 \leq \varepsilon,$$

де P_i - інтервальна емпірична вірогідність; $\Delta F_i = F_i - F_{i-1}$ - інтервальна теоретична вірогідність; ε - максимально допустиме відхилення.

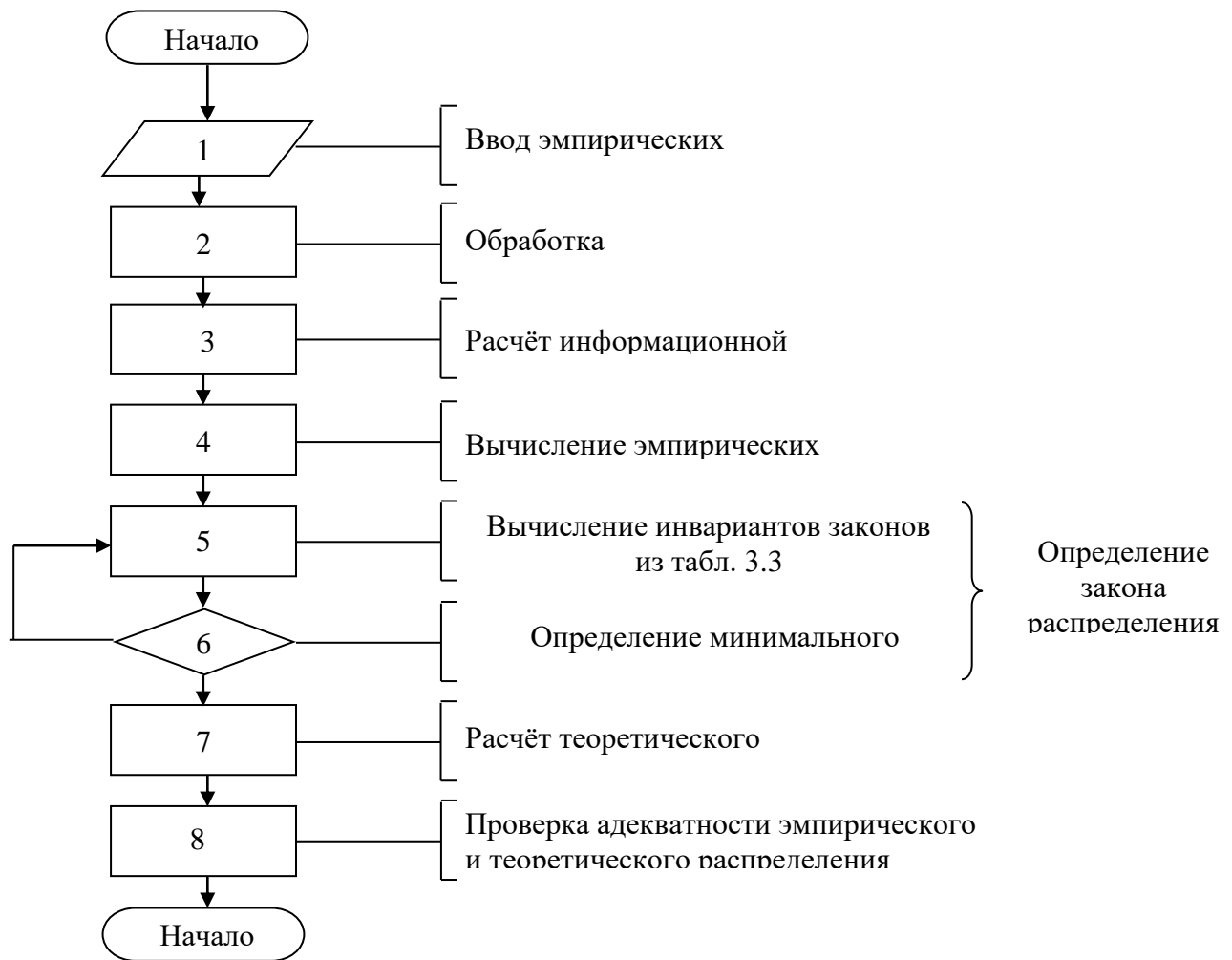


Рис. 3.2. Алгоритм распознавания законов распределения

Наведені способи обробки гістограм дозволяють побудувати усічений розподіл, який отримується експериментально за аналізу дисперсного складу у певному діапазоні розмірів. Для побудови повного розподілу використаємо формулу

$$f_y(\delta) = \frac{f(\delta)}{F(b) - F(a)} \quad (3.5)$$

де $F(a)$ – частка часточок, розміри яких менше a ; $F(b)$ – частка часточок, розміри яких більше b .

Значення $F(a)$ та $F(b)$ отримують експериментально.

3.3. Методика побудови імітаційних моделей дисперсних систем

Інформація, що надходить від перетворювачів, через випадковий розподіл частинок у дисперсному середовищі, має стохастичну природу та подається у вигляді непередбачуваної послідовності дискретних сигналів із варіаціями у часі та формі.

Оскільки аналітичні методи дають результати лише для обмежених типів сигналів, вони є малоефективними для повноцінної оцінки. Натомість статистичне моделювання забезпечує більш гнучкий і точний підхід до аналізу дисперсного складу, дозволяючи враховувати випадковий характер інформаційного потоку.. Використаємо задля програмування блокову організацію статистичної моделі (рис. 3.3), це дозволить моделювати широкий клас пристроїв аналізу [4]. Перевагою блокової організації моделі можна вважати, що можливе розширення програми відносно просто реалізується уведенням додаткових функцій до відповідних блоків чи введенням нових блоків.

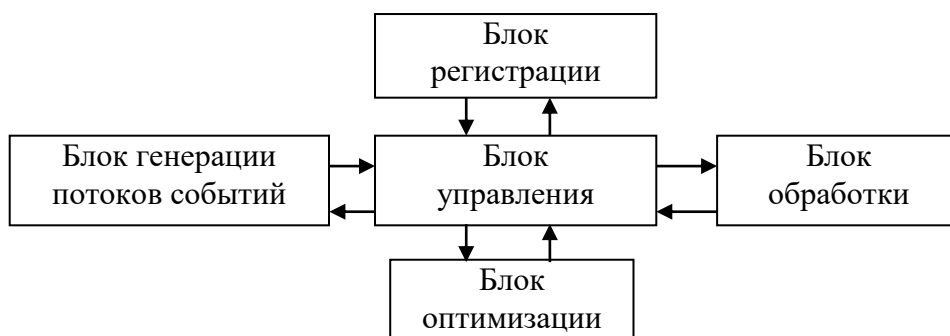


Рис. 3.3. Статистична імітаційна модель аналізатора

До блокової структури імітаційної моделі (рис. 3.3) входять блоки генерації потоків, реєстрації, управління, обробки результатів моделювання та оптимізації параметрів системи. Робота моделі базується на принципі особливих станів, що керується блоком управління. Він налаштовує всі модулі, встановлює зв'язки між блоками та визначає послідовність і передачу керування.

Для генерації одиничних або пов'язаних імпульсів використовується блок генерації зі заданими статистичними параметрами (тривалість, амплітуда, площа,

інтервали між імпульсами, діапазон зміни тощо), що відображають властивості мікрочастинок.

У процесі функціонування системи знайдені характеристики потоків визначають блоком реєстрації, він моделює функції пристрою реєстрації. Результати перевірки роботи моделі обробляє блок обробки результатів моделювання за заданими алгоритмами та здійснює накопичення статистичної інформації за оцінюваних параметрів. Подібна блокова структура дозволяє вже на етапі системного проектування оцінити ефективність різних технічних рішень, а також детально дослідити вплив окремих параметрів та характеристик аналізатора на остаточні результати функціонування системи [8].

3.3.1. Побудова імітаційних моделей дисперсного складу

Початковим етапом імітаційного моделювання є створення випадкових масивів часточок за заданим розподілом, що реалізується методом Монте-Карло з використанням генератора випадкових чисел.

Алгоритм генерації, який імітує задану щільність або функцію розподілу, подано на блок-схемі (рис. 3.4). Метод підходить для створення генераторів з різними законами розподілу.



Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму генерації закону розподілу

Аналіз результатів імітаційного моделювання свідчить, що за малих об'ємів вибірки спостерігаються значні коливання статистичних параметрів, але вони за мірою збільшення об'єму вибірки зменшуються.

3.3.2. Імітаційне моделювання оптимальної кількості інтервалів

Мінімальну кількість інтервалів визначають мінімальною зміною розмірів часточок, за яких не відбувається зміна якості чи отриманого з нього продукту за виробництва та використання дисперсних систем. Визначається оптимальна кількість інтервалів за одномодальної кривої розподілу часточок за розмірами застосуванням імітаційного моделювання за наступного алгоритму.

- 1) Задаємося кількістю інтервалів $n=4$ до $n_{\max}=192$;

2) За допомогою генератора випадкових чисел, вважаючи однаковими значеннями статистичних параметрів (математичного очікування $\bar{m}=10$, дисперсією $D=9$) формуємо вибірку об'ємом $N=100\dots 100000$, яка підкоряється: а) нормальному закону розподілу; б) логнормальному закону розподілу; в) Вейбулла;

3) Визначимо параметри дисперсного складу та будуємо гістограму по n інтервалах. У якості критерію оптимальної кількості інтервалів приймаємо умову відсутності провалів у гістограмі, тобто друга похідна кривої розподілу тільки один раз міняє знак;

4) За зміною другої похідної знаку більше одного разу далі послідовно зменшуємо число інтервалів, поки зміна знаку буде тільки одноразовою;

5) Повторюємо такі операції для різних об'ємів вибірки, при цьому визначаємо для кожного циклу значення такої кількості інтервалів, за яких виконується умова три.

Вибір необхідної кількості інтервалів остаточно має ухвалюватись з урахуванням технічних обмежень: розрядність АЦП, швидкодія АЦП а також особливості конкретних перетворювачів диференціального типу.

3.3.3. Моделювання пристрою подачі часточок

Оскільки установка подачі часточок (УПЧ) може бути джерелом значної похибки в результатах аналізу, важливо сформулювати основні вимоги до її конструкції та визначити параметри, що впливають на її ефективність.

Через неоднорідний просторовий розподіл часточок у дисперсному середовищі завжди існує ризик одночасного надходження кількох часточок у зону вимірювання. Це призводить до спотворення вихідного сигналу як за амплітудними характеристиками, так і за підрахунком часточок. Ймовірність збігу використовується як показник просторово-часової роздільної здатності таких систем.

Щоб забезпечити точну роботу аналізатора, необхідно мати дані про загальну кількість часточок, що подані, а також кількість успішно вимірянних і зареєстрованих

часточок, що й визначає вимоги до УПЧ. Припустимо, що за час аналізу, потік стаціонарний, ординарний без післядії та описується законом розподілу Пуассона

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

де λt – число часточок за час t ; $\lambda = 1/\mu$ – інтенсивність потоку за середнього часу μ між сусідніми часточками, які поступають до зони аналізу.

У якості початкових даних для моделювання виступає межа інтервалу часу T , закони розподілу $\varphi(\tau)$ і $f(\tau_p)$, кількість часточок, які забезпечують задану точність розрахунків N_n та початкові умови моделювання, або при $t=0$, приймемо t_j ; $m=0$; $n=0$; $N=0$. Блок схема такого алгоритму наведена на рис. 3.5.

Отримані результати свідчать про те, що запропонована методика імітаційного моделювання, розглянута в цьому розділі, є придатною для інженерного проєктування аналогічних пристроїв, оскільки дозволяє враховувати стохастичну природу процесів, оцінювати вплив ключових параметрів системи та оптимізувати її структурні й функціональні характеристики ще на етапі розробки.

Застосування такого підходу дає змогу знизити витрати на експериментальне налагодження, скоротити час проєктування та підвищити надійність і точність майбутніх вимірювальних систем.

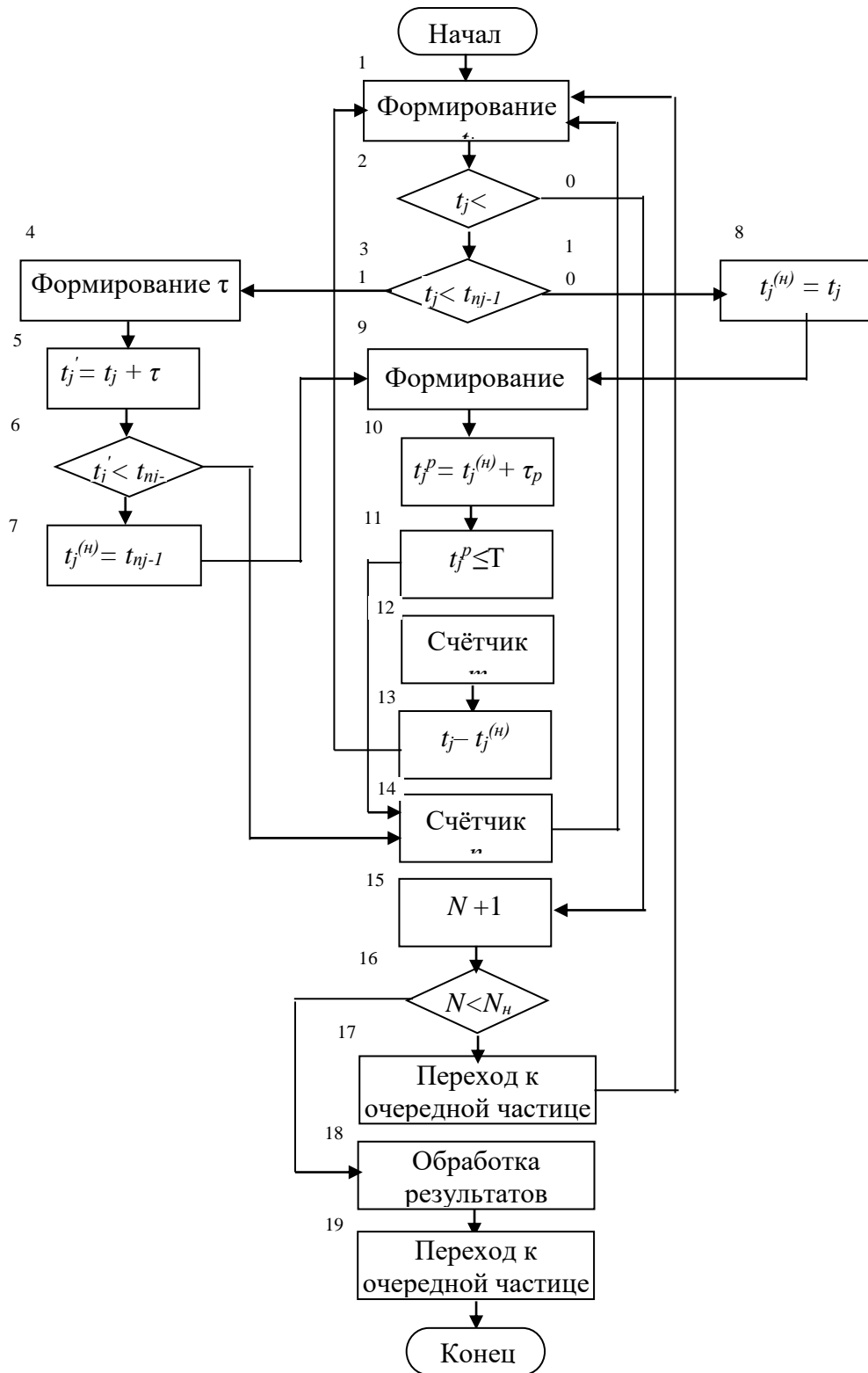


Рис. 3.5. Блок схема алгоритму імітаційного моделювання

3.4. Вибір структури аналізатора

Побудова аналізаторів як інформаційно-вимірювальних систем базується на системному підході, що забезпечує узгоджену роботу засобів збору, обробки та передачі інформації [5].

Структура аналізатора визначається через цільову функцію, сформовану відповідно до його призначення. Для аналізу дисперсного складу подається узагальнена структурна схема аналізатора. (рис.3.6).

Згідно цільової функції виділяємо такі типи аналізаторів за їх призначенням [10]:

- аналізатори задля дослідницьких цілей, як лабораторне устаткування;
- аналізатори задля заводських лабораторій;
- аналізатори задля технологічного контролю.

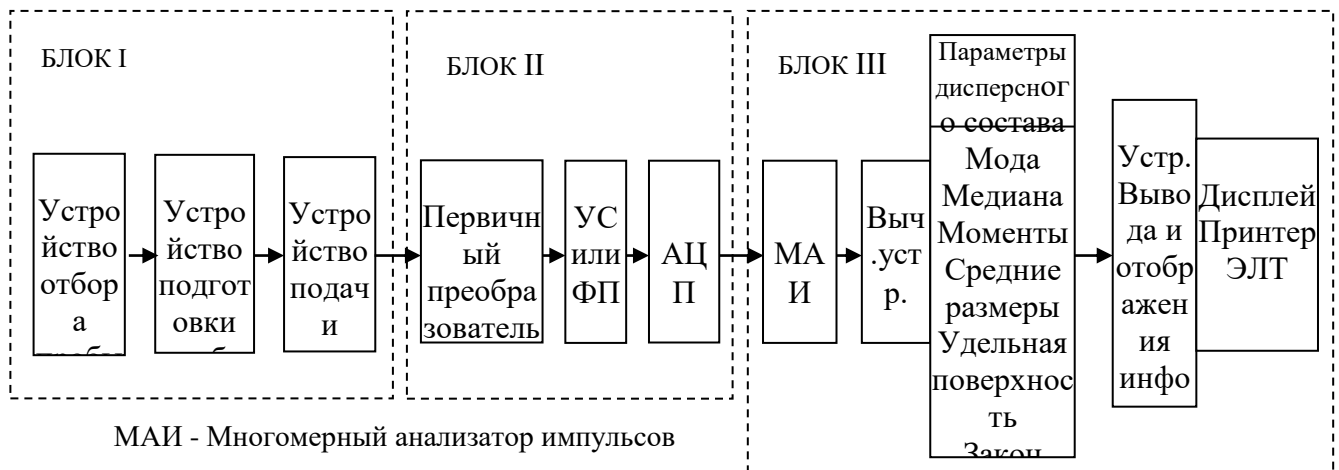


Рис.3.6. Структурна схема аналізатора

Побудова таких вузлів визначає головні технічні параметри та характеристики аналізаторів дисперсних систем.

4 АНАЛІЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДИСПЕРСНИМ СКЛАДОМ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ

4.1. Технологічний процес виробництва дисперсних систем

Процеси виробництва та переробки дисперсних систем являють собою доволі складні багатопараметричні нестационарні об'єкти керування [3]. Залежність дисперсного складу від різних факторів розглядають як функціонал

$$D = f(Fi, L, P, T, x, K) \quad (4.1)$$

де D – функція розподілу, отриманого з порошку за розмірами; Fi – витрати матеріалів, які подаються до подрібнюючого агрегату; L – рівень матеріалу; P – тиск чи зусилля, яке необхідне для руйнування матеріалу; T – температура процесу за руйнування; x – швидкість подрібнюючих органів; K – конструктивні особливості даного технологічного устаткування. Математичні моделі таких процесів будуються з припущеннями та не враховують усіх впливових факторів [6]. Хоч дисперсні системи широко застосовуються, точна формалізація технологічних параметрів часто відсутня, відомий лише їх якісний вплив.

Прикладом є виробництво металевго порошку на пульверизаційній установці методом розпилення ежекційною форсункою: розплав металу з ванни В подається через форсунку Ф під тиском інертного газу, розпилюється, охолоджується в кільці ОК і осідає у пилеосаджувачі ПО як готовий порошок (рис. 4.1). Дрібнодисперсна фракція, яка захоплюється газом прямує до циклону Ц та послідовно сполучених рукавних фільтрів РФ1.РФ4. Очищений газ знов подається до компресора К. З пилеосаджувача пульверизат подається до гуркоту Г, який забезпечує виділення різних фракцій металевго порошку. Керування дисперсним складом задля отримання різних марок порошку виконують вручну зміною тиску газу, який подається доа форсунки, на підставі результатів аналізів заводської лабораторії.

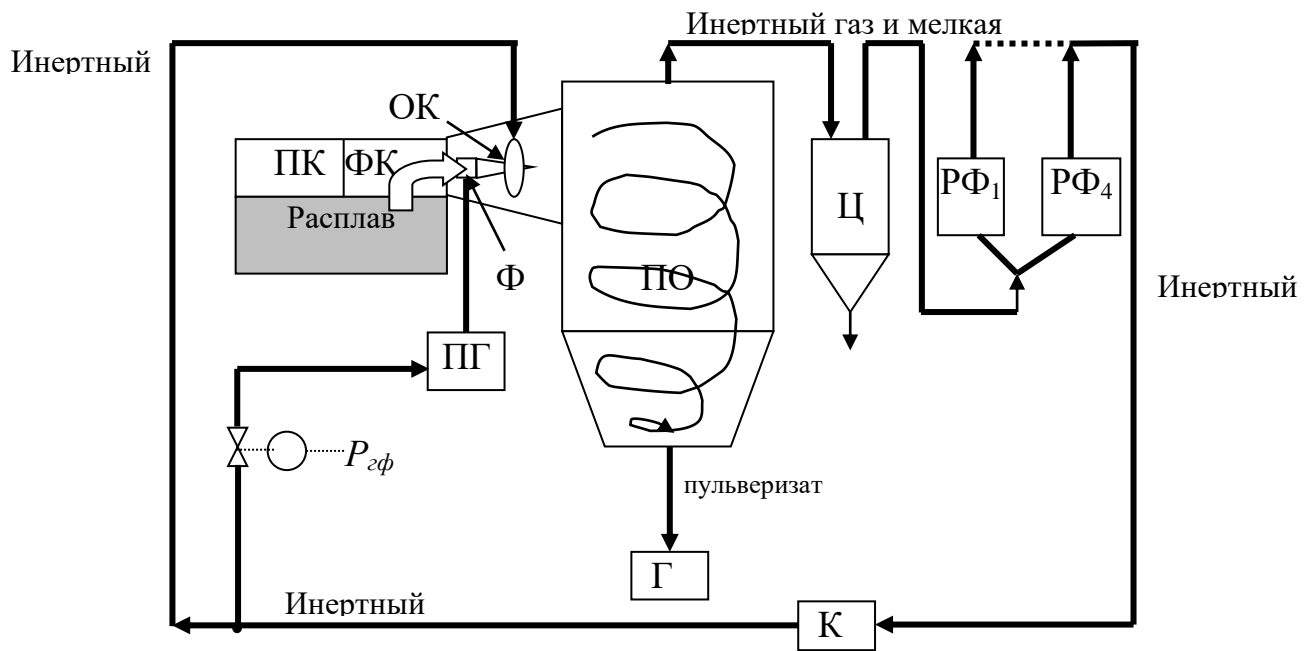


Рис. 4.1. Схема технологічного процесу отримання металевого порошку розпилюванням ежекційною форсункою
 ПК – плавильна камера, ФК – форкамера, ПГ – підігрівач газу

Тривалість безперервної роботи форсунки приблизно 8...12 годин. Лабораторний аналіз виконується двічі на зміну та його тривалість близько двох годин.

Технологічний процес включає технологічні агрегати розпилювання : ПК, ФК, Ф, ПО, які відносяться до об'єкту керування. Продуктивність установки пудверизації за отримуваного пудверизату становить від 500 до 1200 кг/год, у залежності від її дисперсного складу та режимних параметрів. Основною вимогою при цьому є максимальний вихід різних фракцій у залежності від конкретних марок порошку. Крупніші фракції при цьому (близько 100.160 мкм) знаходять обмежене застосування, а більші практично не використовують та становлять відходи виробництва.

Виробництво металевих порошків характеризується взаємозалежністю режимних параметрів технологічного процесу та функції розподілу частинок, яка у більшості випадків підпорядковується логнормальному закону або розподілу Вейбулла.

4.2. Вибір параметрів технологічного агрегату розпилювання

Аналіз технологічних процесів виробництва металевих порошків засвідчує, що єдиний узагальнений критерій оптимізації, відповідно до якого здійснюється регулювання дисперсного складу, на сьогодні відсутній [6]. Це пояснюється значною варіативністю типів дисперсних систем, способів їх отримання, а також відсутністю номенклатурно визначених засобів експрес-контролю параметрів, здатних функціонувати в безперервному режимі безпосередньо в умовах технологічного процесу.

У контексті виробництва металевих порошків основною вимогою до системи керування, що водночас виконує роль цільової функції, є максимізація виходу частинок у межах заданого розмірного діапазону, тобто отримання цільової фракції. Забезпечення цієї умови сприяє зменшенню витрат вихідної сировини та оптимізації енергоспоживання, зокрема за рахунок мінімізації втрат, пов'язаних із невідповідністю фактичної функції розподілу вимогам, а також необхідності додаткової обробки або переробки отриманого продукту. Отже, така умова має бути інтегральним критерієм за дисперсним складом та характеризувати необхідну фракцію розмірів часточок (рис. 4.2) у вигляді

$$K_{\partial} = F(\delta_2) - F(\delta_1) \quad \text{або} \quad K_{\partial} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} f(\delta) d\delta, \quad 0 < \delta_1 < \delta_2 < 1$$

де δ_1, δ_2 – мінімальний та максимальний розмір часточок фракції;

$F(\delta)$ – функція розподілу часточок за розмірними параметрами;

$f(\delta) = \frac{dF}{d\delta}$ – щільність вірогідності.

Забезпечення максимального виходу певної фракції відбувається у результаті процедури максимізації критерію за дисперсним складом, у результаті отримуємо таку функцію розподілу часточок, параметри якої відповідають критерію K_{∂} . Кількість незалежних параметрів функції розподілу часточок за розмірами, як правило, не перевищують три, а найбільш типовий випадок - це залежність функції розподілу від 2х параметрів [7]. При цьому процедуру визначення критерію K_{∂} ,

зводять до знаходження найбільшої вірогідності відомого розподілу, за значеннями якої й визначають відповідні параметри функції розподілу $F(\delta)$. Отже, задача найбільшого значення вірогідності

$$P(\delta_1 < \delta < \delta_2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} f(\delta) d\delta = F_2 - F_1$$

де $f(\delta)$ – відома щільність вірогідності випадкової ознаки.

Залежність між $F(\delta_2)$ та $F(\delta_1)$ запишемо за допомогою ряду Тейлора

$$F(\delta_2) = F(\delta_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{F^{(k)}(\delta_1)}{k!} (\delta_2 - \delta_1)^k.$$

Звідси

$$F(\delta_2) - F(\delta_1) = f(\delta_1)(\delta_2 - \delta_1) + \frac{f'(\delta_1)}{2} (\delta_2 - \delta_1)^2 + \dots$$

Прирівнюючи до нуля обидві приватні похідні маємо систему рівнянь відносно невідомих параметрів розподілу m і σ .

$$\begin{cases} (\ln \delta_1 - m)^2 - \left(\frac{2\delta_1}{\Delta\sigma} - 1 \right) (\ln \delta_1 - m) + 1 = 0 \\ \sigma^4 - n \left[n + \frac{2(1 + \delta_1)\Delta\delta}{2\delta_1 - \Delta\delta} \right] \delta^2 - n^3 \frac{2\delta_1\Delta\delta}{2\delta_1 - \Delta\delta} = 0, \end{cases} \quad (4.3)$$

де $n = \ln \delta_1 - m$.

4.3. Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом розпилювання

У більшості процесів виробництва металевих порошків тверді часточки перебувають у газовому або рідкому дисперсному середовищі. Для їх аналізу зазвичай застосовують фотоелектричні та кондуктометричні методи в рідкому середовищі, а у газовому — переважно фотоелектричний метод.

З метою стабілізації якості пульверизата реалізовано систему керування дисперсним складом, у якій як вимірювальний елемент використовується аналізатор на основі фотоелектричного методу зі скануванням вузькою щілиною. На виході з

пилеосаджувача встановлено пристрій відбору проб, що забезпечує надходження часточок до експрес-аналізатора (ЕА) [6]. Робота ЕА може здійснюватися у двох режимах:

Перший режим забезпечує неперервний збір інформації в реальному часі з послідовним усередненням за вибіркою без урахування першої часточки;

Другий режим функціонує аналогічно з аналогічним принципом обробки даних.

Визначення параметрів розподілу часточок за розмірами дозволяє системі формувати необхідну кількість керуючих дій. При цьому оперативні дані надає ЕА, а періодичне коригування результатів виконується засобами лабораторного контролю. (рис.4.2). Задаючими параметрами у системі виступають параметри функції розподілу.

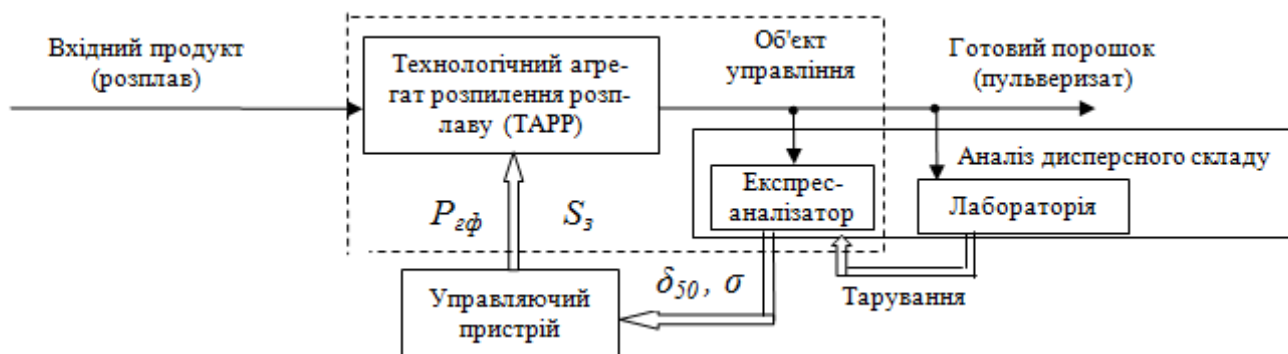


Рис. 4.2. Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним агрегатом

Метрологічні вимоги до ЕА послаблені, так як основний метрологічний контроль виконують стандартизованими лабораторними методами, результати яких використовують для корегування ЕА.

4.3.1. Технологічний агрегат розпилювання як об'єкт керування

З метою побудови системи керування дисперсним складом слід розглянути технологічний агрегат, як об'єкт керування та визначити параметри, які

впливають на дисперсний склад пульверизата, та які можна використовувати у якості керованих.

Структурна схема має наступний вигляд (рис. 4.3)

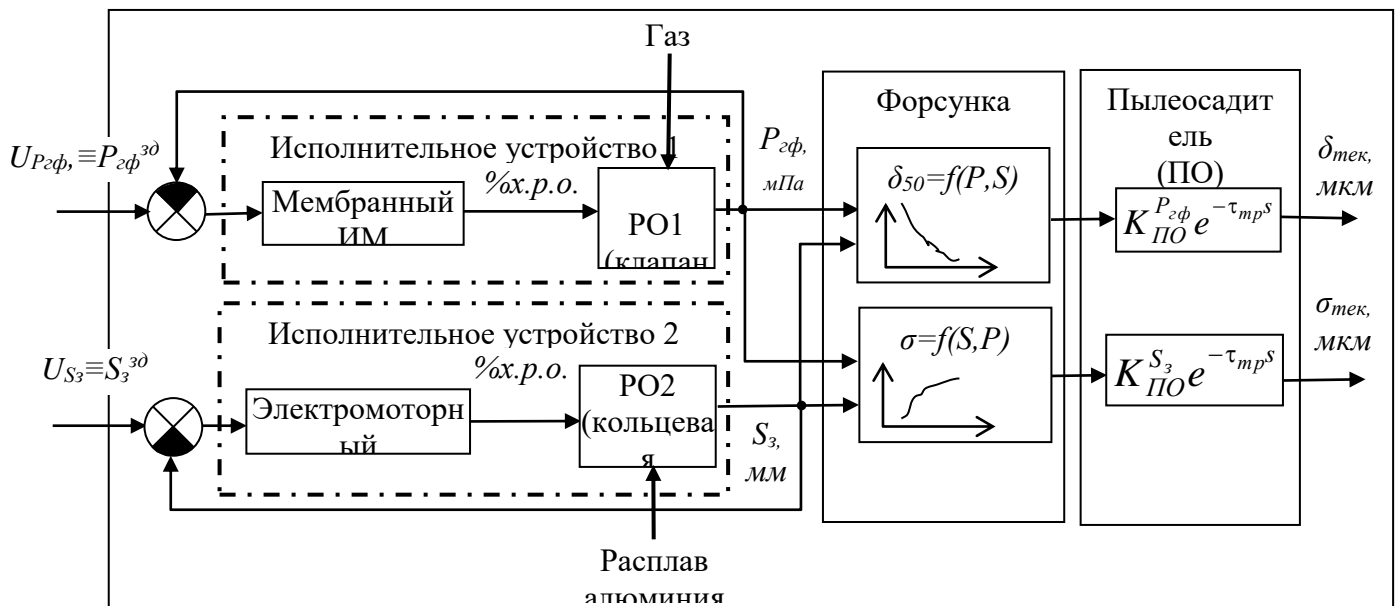


Рис. 4.3. Структурна схема агрегату як об'єкту керування

4.3.2. Аналізатор як ланка системи керування

Оцінити стан об'єкта керування без аналізатора неможливо, тому його доцільно розглядати як інтегровану частину об'єкта керування. Модель аналізатора можна подати у вигляді системи з затримкою, що складається з двох основних елементів:

- вузла транспортного запізнення, де здійснюється відбір проби, формування потоку часточок, її підготовка, вимірювання та розрахунок параметрів функції розподілу;
- вузла усереднювання, який реалізується як фільтр рівномірного усереднення.

У цій структурі експрес-аналізатор (ЕА) функціонує як ланка, що послідовно виконує перетворення розмірних характеристик часточок на електричні та цифрові сигнали, і забезпечує обробку вибірки для визначення розподілу.

Для спрощення моделювання дискретні результати усереднення наближуються безперервними, що є обґрунтованим за умов упорядкованого надходження часточок до перетворювача та достатнього статистичного обсягу вибірки. Структурна схема моделі аналізатора наведена на рис. 4.4.

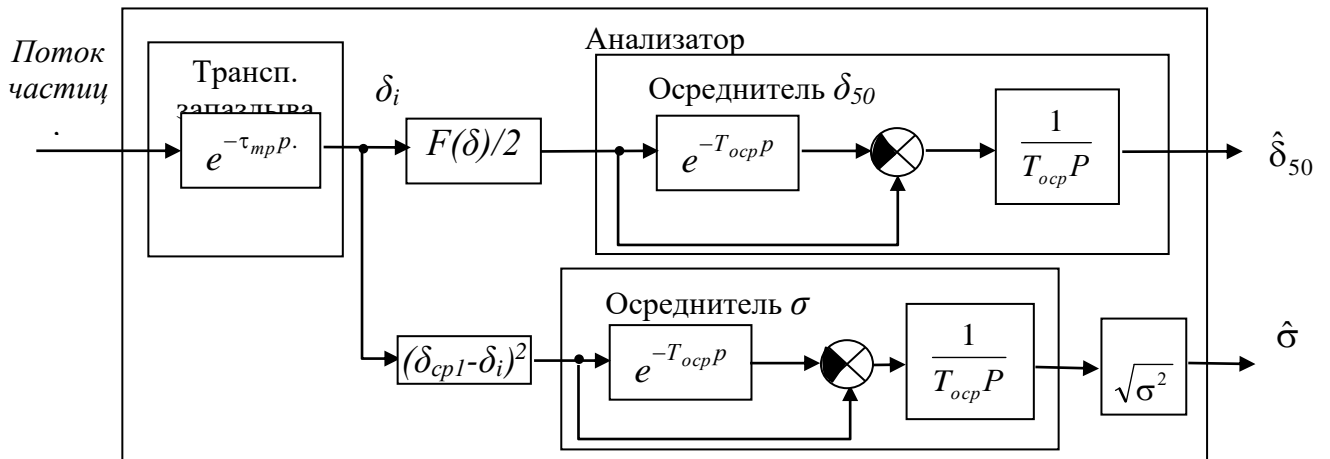


Рис. 4.4. Структурна схема аналізатора

Аналітичні вирази, за якими розраховуються оцінки i $\hat{\delta}$

$$\hat{\delta}_{50}(t) = \frac{0,5}{T_{ocp}} \int_t^{t+T_{ocp}} F(\delta_i)(t - \tau_{mp}) dt, \quad (4.7)$$

$$\hat{\sigma}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{ocp}} \int_t^{t+T_{ocp}} (\delta_i(t - \tau_{mp}) - \delta_{cp1})^2 dt},$$

де τ_{mp} – час транспортного запізнювання;

T_{ocp} – час усереднювання статистичної інформації про параметри порошку.

Вирази (4.7), записані у операторній формі

$$T_{ocp} \hat{\delta}_{50}(t) p = (0,5 - e^{-T_{ocp}p}) F[\delta_i(t)] T_{ocp} \hat{\sigma}(t) p = \sqrt{(1 - e^{-T_{ocp}p} - \delta_{cp1})^2} dt.$$

4.4. Система керування процесом розпилювання металевого розплаву

Аналіз залежностей свідчить, що заміна параметрів дисперсного складу відбувається як за зміною тиску газу, так й за зміною площі кільцевого зазору форсунки.

Для керування зміною обох керуючих параметрів, застосовуємо просту двовимірну систему регулювання за урахування впливу перехресних зв'язків за наступною структурною схемою, у якій решту всіх інших дій приймемо як збурюючі (рис. 4.5).

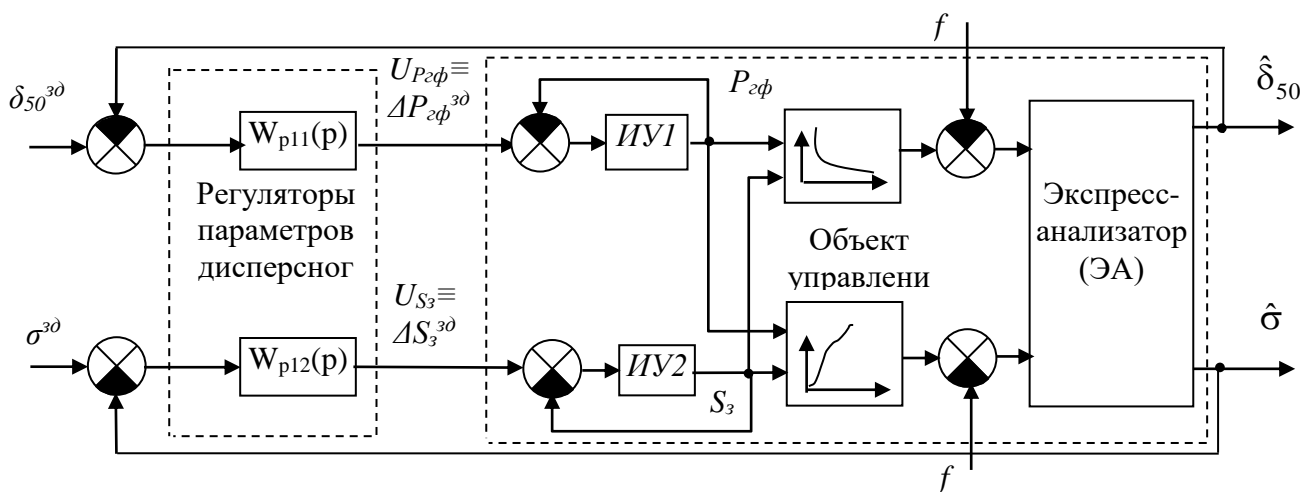


Рис. 4.5. Структурна схема системи регулювання

де δ_{50}^{zd} , σ^{zd} – значення медіанного розміру часточок пильверизата та середньоквадратичного відхилення функції розподілу пильверизата, які задаються, f – збурюючі дії

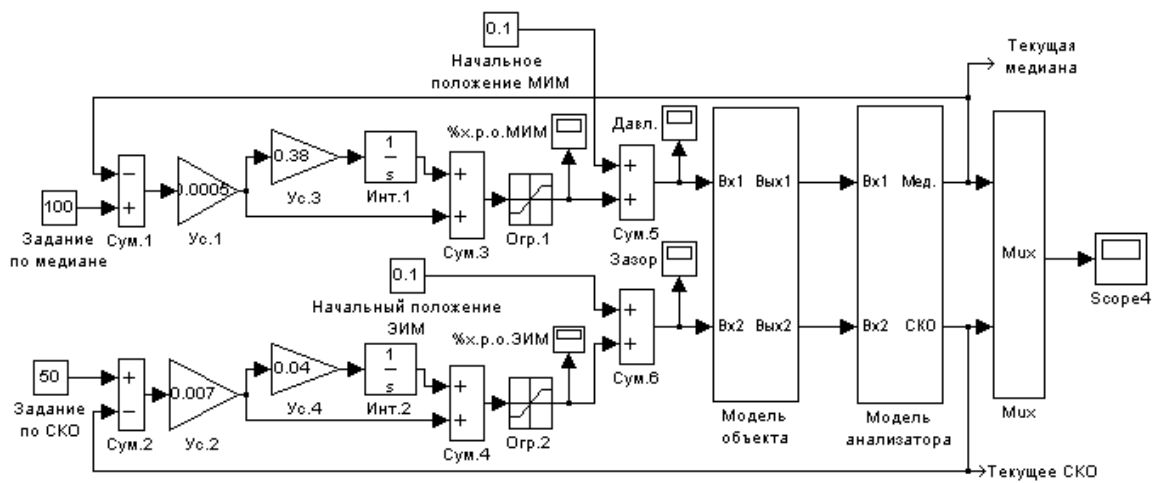


Рис.4.6. Схема моделювання системи регулювання дисперсного складу

У якості керуючого пристрою використали модель ПІ регулятора (рис.4.6).

Аналіз перехідних процесів показує, що в пускових режимах, при початковому положенні регулюючих елементів, виникають значні динамічні відхилення керованих параметрів від заданих значень, а також спостерігається тривалий перехідний період до досягнення стабільного робочого режиму.

Задля забезпечення ефективного запуску технологічного устаткування використаємо модель системи регулювання з метою формування початкових значень дій $P_{гф}^{нач}$ і $S_3^{нач}$ (рис.4.7) на базі алгоритму їх розрахунку та моделі об'єкту керування, до якої виключені запізнюючі вузли (ИУ1, ИУ2, ПО).

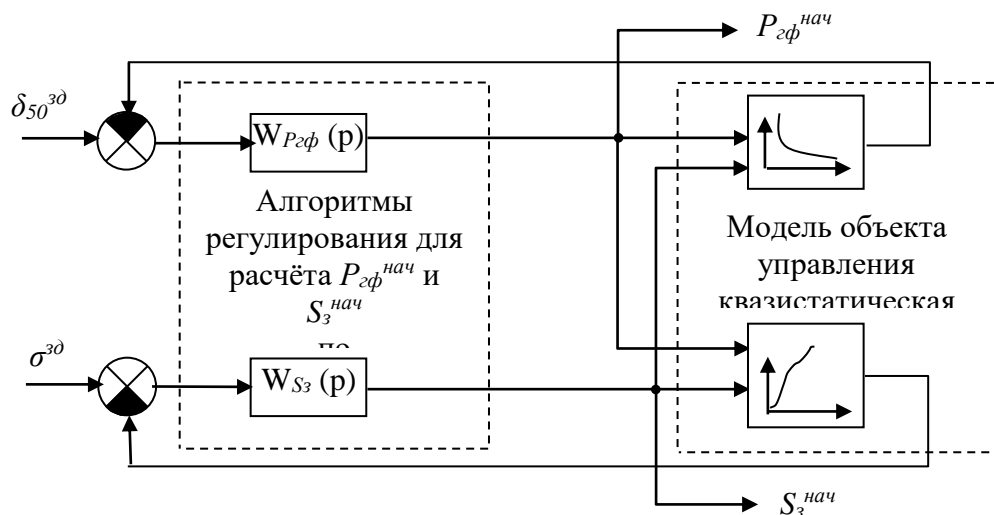


Рис. 4.7. Модель системи регулювання для розрахунку керуючих дій

На рис.4.8 наведена схема моделювання блоку розрахункових керуючих дій.

Структурна схема система регулювання дисперсним складом наведена на рис.

4.9.

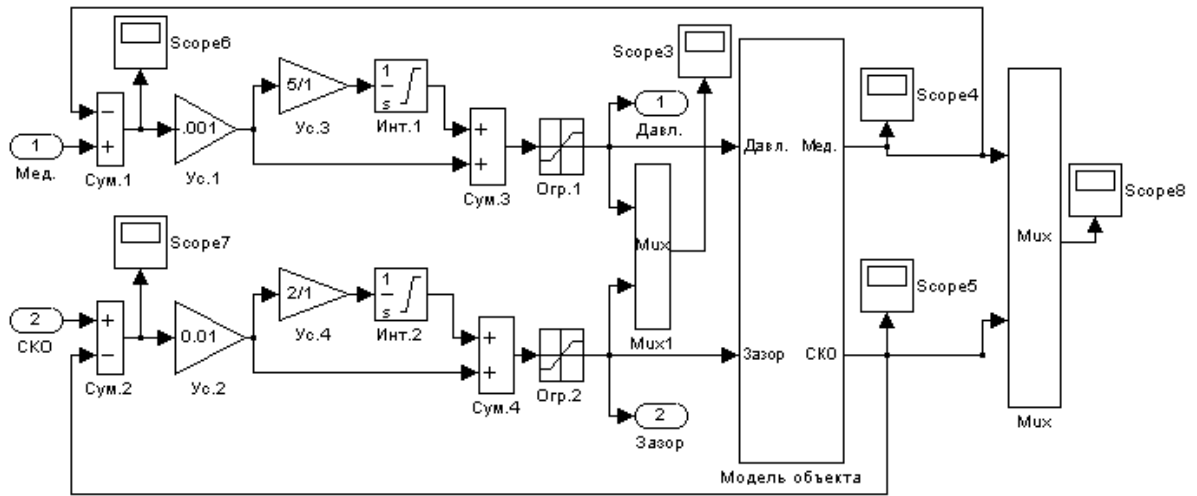


Рис. 4.8. Моделювання блоку розрахунку керуючих дій

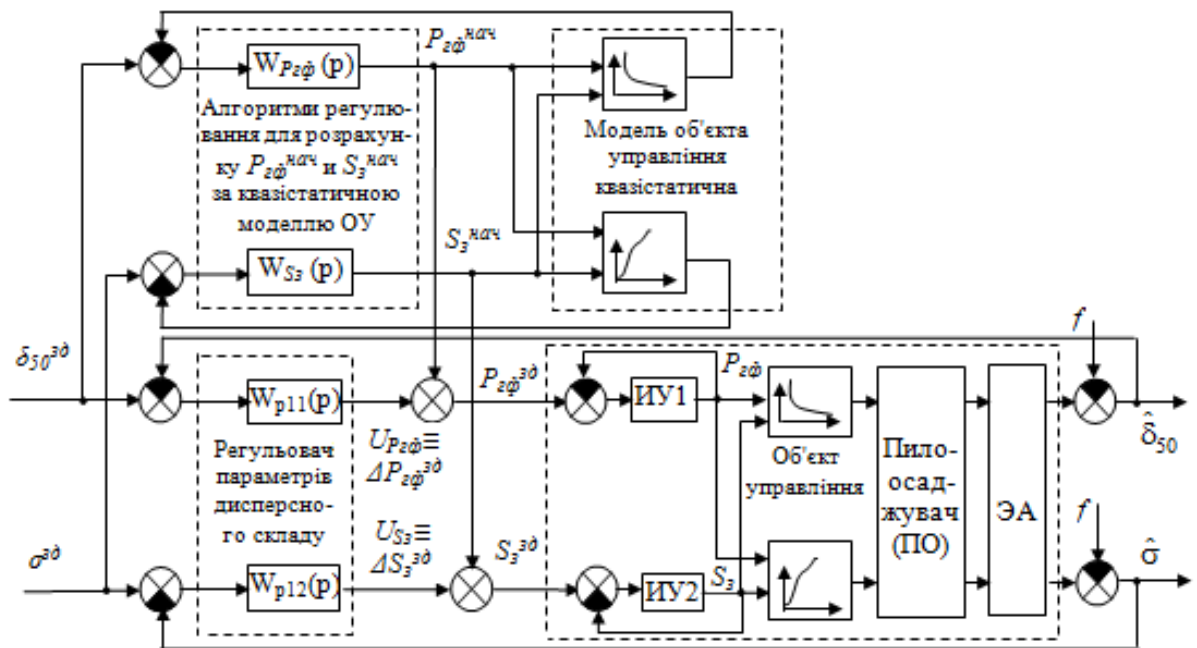


Рис. 4.9. Структурна схема системи регулювання з розрахунком початкових наближень дій, що управляють

4.5. Вдосконалення систем керування виробництва металевих порошків

Розглянута система керування дисперсним складом металевого порошку, який отримується розпилюванням розплаву виступає окремим випадком за розробки систем автоматизованого керування дисперсним складом у технологічному процесі виробництва металевих порошків. Подальшим розвитком у цьому напрямку є розробка системи підтримки ухвалення рішень (СППР) (рис 4.10).

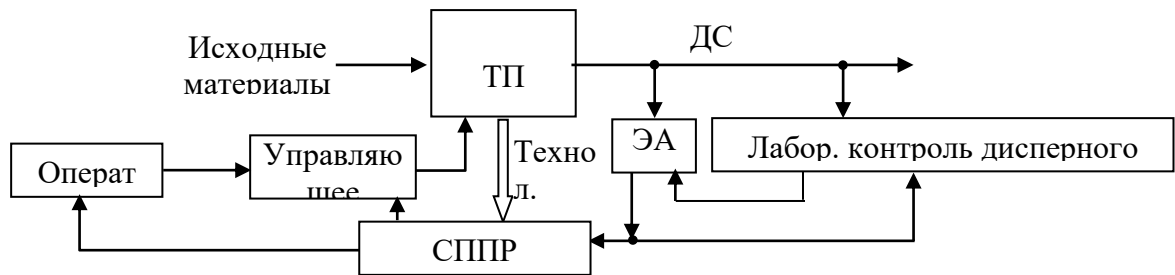


Рис. 4.10. Структурна схема керування дисперсним складом за використання системи підтримки ухвалення рішення

У тих випадках, коли у технологічному процесі виробництва порошків відсутні автоматичні пробоотборники, а у деяких випадках їх реалізація взагалі неможлива без використання систем підтримки ухвалення рішень. До сьогодні вибір рішення за керуванням дисперсним складом порошків виконують за непрямыми показниками та багато у чому ґрунтується на досвіді та інтуїції технолога, керуючого процесом. А отже, підтримкою ухвалення рішення може бути інтелектуальна комп'ютерна технологія підсилення творчих дій технолога на усіх етапах ухвалення рішення про керуючі дії на хід процесу.

Для підтримки процесу ухвалення рішень система автоматизації має виконувати такі функції: діагностика ситуації, визначення цілей, ідентифікація інформаційного стану, оптимізація рішення та оцінка його ефективності (рис. 4.11).

Ідентифікація стану об'єкта здійснюється у два етапи:

Прогнозування зміни параметрів дисперсного складу (блок прогнозування);

Коригування параметрів на основі даних від систем контролю чи збору інформації.

Система підтримки рішень дозволяє досягти економічного ефекту завдяки:

- максимальному виходу цільової фракції,
- зниженню собівартості.

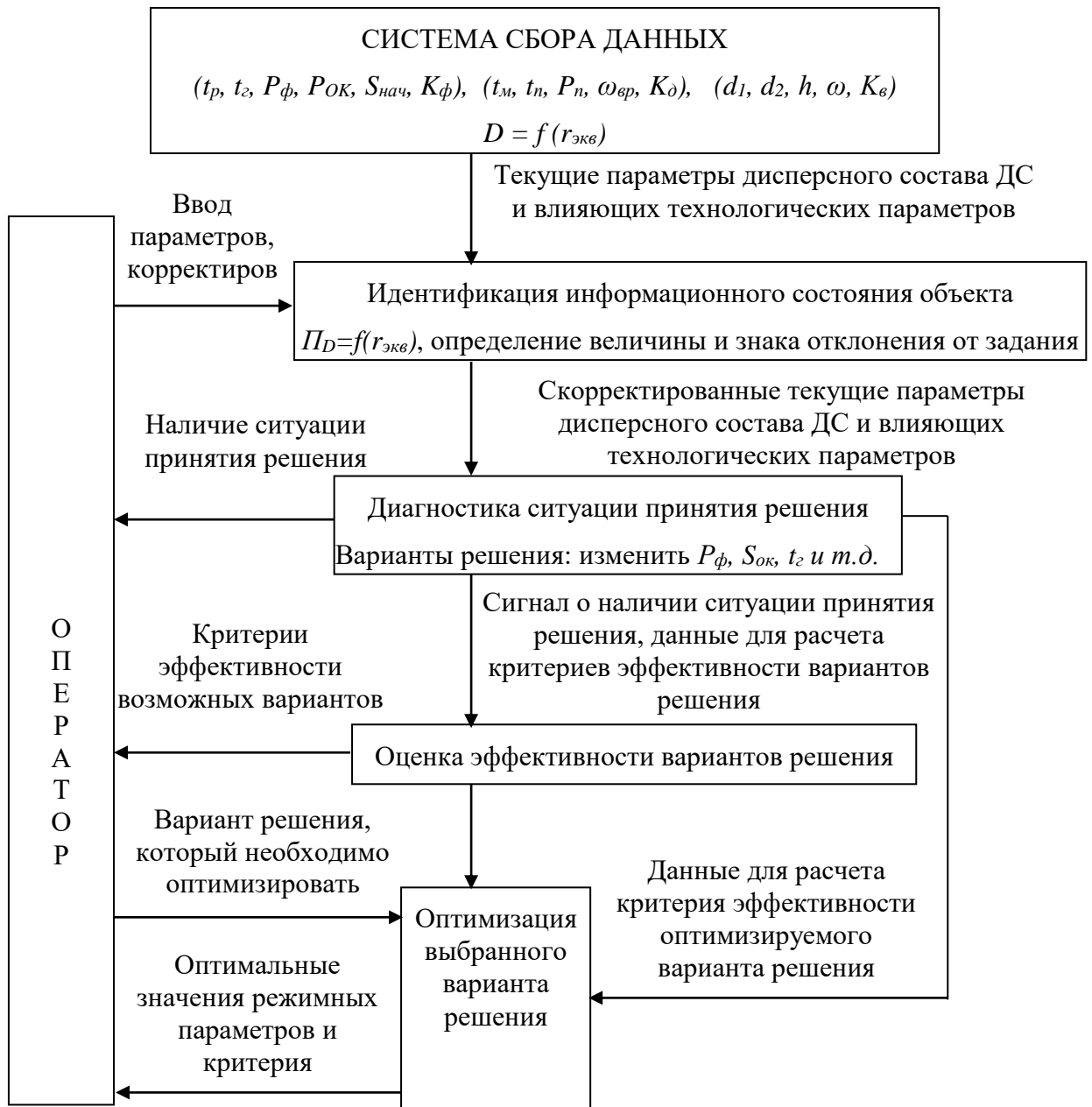


Рисунок 4.11. Структурна схема системи підтримки прийняття рішень

ВИСНОВКИ

Метою даної бакалаврської роботи є удосконалення систем контролю та регулювання дисперсного складу металевих порошків. Основою дослідження стало створення експрес-аналізаторів, здатних здійснювати контроль дисперсного складу в режимі реального часу, а також розробка нових підходів до регулювання, що передбачають вплив на окремі параметри функції розподілу частинок порошку. Це забезпечило підвищення техніко-економічних показників виробництва дисперсних систем.

У межах роботи було реалізовано:

1. Класифікацію методів аналізу та обґрунтовано вибір диференціальних методів, які забезпечують високу швидкість та можливість інтеграції в системи автоматичного контролю технологічних процесів.

2. Побудовано математичні моделі функціональних вузлів аналізатора, проведено імітаційне моделювання на основі розроблених алгоритмів і програм. Обґрунтовано параметри електричних полів, що використовуються у пристроях підготовки проби; встановлено, що оптимальний час руйнування агрегатів становить 90–100 секунд.

3. Запропоновано критерій оцінки якості дисперсного складу, який базується на максимальному значенні інтервальної ймовірності функції розподілу або максимальному виході частинок у заданому діапазоні розмірів (цільова фракція).

4. Розроблено структурні схеми систем керування, що реалізують керуючі дії на різні параметри функції розподілу та містять елементи підтримки прийняття рішень. Також запропоновано структурну схему системи регулювання дисперсного складу для виробництва алюмінієвого порошку методом розпилення розплаву.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г.Ф. Зайцев. - Киев: Выща школа, 1988. – 431 с.
2. Кунцевич В.М. Синтез оптимальных и адаптивных систем управления. Игровой подход / В.М. Кунцевич, М.М. Лычак. - Киев: Наукова думка, 1985. – 245 с.
3. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – Киев: Наукова думка, 2006. – 264 с.
4. Михайлов В.С. Теория управления / В.С. Михайлов - Киев: Вища школа, 1988.
5. Основы проектирования следящих систем / Под ред. Е.П. Попова. - М.: Машиностроение, 1978. – 388 с.
6. Романюк О.Н., Савчук Т. О. Організація баз даних і знань: Навч. посібник / Мін-во освіти і науки України. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 217 с.
7. Созонник Г.Д. Цифровые системы управления. / Г.Д. Созонник, В.К. Стеклов. – К.:Техніка, 1991. – 191 с.
8. Томашевский В. М. Моделювання систем / В. М. Томашевский. – К.: Видавнича група ВНУ, 2005. – 352 с.
9. Ямпольский Л. С., Калин О. М., Ткач М. М. Автоматизированные системы технологической подготовки робототехнического производства / Л. С. Ямпольский, О. М. Калин, М. М. Ткач. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 271 с.
- 10.Форрестер Дж. Динамика развития города. — М.: Прогресс, 1974. – 286 с.
11. Kanwar R., Bjerneberg D., Baker D. An Automated System for monitoring the Quality and Quantity of Subsurface Drain Flow // Journal of Agricultural Engineering Research. — Vol. 73. — No. 2. — June 1999. — P. 123-129.